

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

Credson de Salles

**Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta
Duração – Impulsos Atmosféricos em Resistores não
Lineares a Óxido Metálico**

**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. Manuel Luís Barreira Martinez
Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Antônio Alencar de Queiroz

Junho de 2011
Itajubá - MG

A teoria sempre acaba, mais cedo ou mais tarde, assassinada pela experiência

(Albert Einstein)

Toda verdade inédita começa como heresia e acaba como ortodoxia.

(Thomas Huxley)

*“... A soul in tension that's learning to fly
Condition grounded but determined to try...”*
*“... There's no sensation to compare with this
Suspended animation, a state of bliss...”*

(David Gilmour/Anthony Moore/Bob Ezrin/Jon Carin)

Cada um que passa em nossa vida passa sozinho, pois cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra. Cada um que passa em nossa vida passa sozinho, mas quando parte, nunca vai só nem nos deixa a sós. Leva um pouco de nós, deixa um pouco de si mesmo. Há os que levam muito, mas há os que não levam nada.

(Gibran Khalil Gibran)

Aos pais,

“... se eu pudesse fazê-los eternos, eternos eu os faria”.

RESUMO

O para-raios instalado em campo é exposto a uma série de solicitações que provocam alterações na característica não linear de seus varistores, a sua parte ativa. O foco desta pesquisa é o envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico (varistores) frente a impulsos de curta duração. Dentro deste contexto é feita a análise do envelhecimento de amostras de varistores inicialmente através do componente ativo da corrente de fuga após cada aplicação de impulso em amostras desenergizadas. Este procedimento visa determinar o envelhecimento imposto por uma corrente de descarga isoladamente da degradação imposta pela solicitação em frequência industrial. São então considerados impulsos de corrente na forma 8/20 μ s em amplitudes diferentes aplicados em grupos de 15 amostras em temperaturas diferentes. Após cada aplicação de impulso é feita a leitura do valor da corrente de fuga e da potência dissipada com as amostras em temperatura ambiente. Os dados destes ensaios são submetidos a análises estatísticas e os resultados são correlações entre o processo de envelhecimento e o número de impulsos, a influência da temperatura e da amplitude da descarga de corrente. As correlações levantadas são comparadas com os estudos realizados na década de 80, e feitas considerações relativas a prescrições de normas pertinentes.

ABSTRACT

Surge arresters are exposed to a series of stresses that trigger changes in their nonlinear behaviors. This paper deals with the ageing of metal oxide varistors concerning the stresses associated to high current short duration surges. The ageing of the samples is evaluated by analyzing the evolution of the resistive component of the leakage current after every impulse current application in non energized samples. This procedure aims to determine the ageing prescribed by discharged current in a separated way from that one imposed by the requested by industrial frequency voltage. By this way they are taken into account Impulses $8 \times 20 \mu\text{s}$ are applied to each set at different temperatures. After every application the value of the resistive component of the leakage current and the power losses were checked and compared at room temperature. These tests data are statistically analyzed and the results are correlations between the ageing evolution and number of applied impulses, the influence of the temperature and discharge current amplitude. The set correlations are compared to studies from 80's, and concerning the provisions of relevant standards.

SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
SUMÁRIO	VII
NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA	X
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
LISTA DE TABELAS	XVII

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 1	9

CAPÍTULO 2

PARA-RAIOS – UM BREVE HISTÓRICO.....	11
2.1 – COMENTÁRIOS.....	16
2.2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 2.....	16

CAPÍTULO 3

O PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO.....	19
3.1 – MECANISMO DE CONDUÇÃO DE CORRENTE	21
3.2 – CARACTERÍSTICA TENSÃO X CORRENTE DE UM VARISTOR A ÓXIDO METÁLICO	23
3.3 – MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO	24
3.4 – CARACTERÍSTICA POTÊNCIA X TEMPERATURA	25
3.5 – INVÓLUCRO DE PORCELANA	26
3.6 – INVÓLUCRO POLIMÉRICO	28
3.6.1 – PARA-RAIOS DE TUBO POLIMÉRICO.....	29
3.6.2 – PARA-RAIOS MOLDADO E INJETADO.....	29
3.7 – O DESLIGADOR AUTOMÁTICO – PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO	32
3.8 – PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS ^[3.6]	32
3.9 – PROJETOS DE PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO	34
3.9.1 – PROJETO ELETRO-MECÂNICO DE UM PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO.....	34
3.9.2 – PROJETO TÉRMICO DE UM PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO.....	35
3.9.3 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO	42
3.9.4 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO	45
3.10 – ENSAIOS	49
3.10.1 – ENSAIOS DE TIPO	50
3.10.2 – ENSAIOS DE ROTINA.....	50
3.10.3 – ENSAIOS DE RECEBIMENTO	51
3.10.4 – ENSAIOS ESPECIAIS	51

3.9 – COMENTÁRIOS.....	59
3.10. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3.....	59
CAPÍTULO 4	
PROCESSO DE ENVELHECIMENTO	63
4.1 – ENVELHECIMENTO FRENTE A TENSÕES EM FREQUÊNCIA INDUSTRIAL	65
4.2 – ENVELHECIMENTO FRENTE A SURTOS.....	66
4.3 – MECANISMOS DE FALHA DOS PARA-RAIOS	67
4.3.1 – AVALANCHE TÉRMICA (THERMAL RUNNWAY).....	68
4.3.2 – FALHA DIRETA DOS RESISTORES NÃO LINEARES DE ÓXIDO METÁLICO.....	69
4.4 – COMENTÁRIOS.....	70
4.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 4.....	71
CAPÍTULO 5	
MÉTODO DE ANÁLISE E INVESTIGAÇÃO	73
5.1 – DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS.....	74
5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	75
5.3.1 – CORRENTE DE FUGA	75
5.3.2 – IMPULSO ATMOSFÉRICO DE CORRENTE.....	77
5.4 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	78
5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	78
5.6. COMENTÁRIOS	82
5.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5	82
CAPÍTULO 6	
ENVELHECIMENTO DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO – ANÁLISE GRÁFICA.....	83
6.1. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 10 kA.....	83
6.1.1. PICO POSITIVO.....	83
6.1.2. PICO NEGATIVO	88
6.1.3. POTÊNCIA DISSIPADA	91
6.2. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 15 kA.....	93
6.2.1. PICO POSITIVO.....	93
6.2.2. PICO NEGATIVO	95
6.2.3. POTÊNCIA DISSIPADA	96
6.3. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 20 kA.....	98
6.3.1. PICO POSITIVO.....	98
6.3.2. PICO NEGATIVO	99
6.3.3. POTÊNCIA DISSIPADA	101
6.4. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 30 kA.....	102
6.4.1. PICO POSITIVO.....	102
6.4.2. PICO NEGATIVO	104

6.4.3. POTÊNCIA.....	106
6.5. PARÂMETROS INDICATIVOS DE ENVELHECIMENTO	107
6.6. O EFEITO DA TEMPERATURA	108
6.7. O EFEITO DA AMPLITUDE.....	111
6.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6.....	116
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÕES	117
7.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 7	120
CAPÍTULO 8	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
8.1. CAPÍTULO 1.....	123
8.2. CAPÍTULO 2.....	123
8.3. CAPÍTULO 3.....	124
8.4. CAPÍTULO 4.....	126
8.5. CAPÍTULO 5.....	127
8.6. CAPÍTULO 6.....	127
8.7. CAPÍTULO 7.....	127

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

A – Ampère

α – Coeficiente de não linearidade

δC – Variação do calor específico em função da temperatura [J/cm^3].

αC – Coeficiente de temperatura [$J/cm^3 \text{ } ^\circ C$].

αl – Coeficiente térmico de expansão linear

c – Calor específico

c – Capacidade térmica [$J/kg^\circ C$];

C e P – Constantes empíricas para cilindros verticais de paredes lisas

C_0 – Calor específico dos resistores a $20^\circ C$ [J/cm^3]

C_{Eq} – Capacitância equivalente da combinação série-paralelo das capacitâncias das junções

CI – Capacidade térmica do invólucro do para-raios [$J \text{ } ^\circ C^{-1}$]

CR – Capacidade térmica dos MOV [$J \text{ } ^\circ C^{-1}$]

CT – Capacidade térmica dos componentes do para-raios [$J/^\circ C$];

CV – Calor específico médio dos resistores [$J/cm^3 \text{ } ^\circ C$];

D – Coeficiente de difusão térmica

DEI – Diâmetro externo médio do invólucro [cm]

D_{max} – Diâmetro máximo do invólucro [cm]

D_q – Gradiente de temperatura

D_R – Diâmetro do resistor [cm]

E – Módulo de elasticidade [N/m^2]

E_{E-um} – Energia específica do para-raios – base tensão nominal [kJ/kV]

e_i – Emissividade do material do invólucro – 0,95

e_R – Emissividade do material dos resistores – 0,90

e_{Ri} – Emissividade equivalente entre os resistores e invólucro

E_T – Máxima energia absorvida pelos resistores – valor teórico [J];

E_{T-PR} – Capacidade de absorção de energia de um para-raios [J];

ϕ_{EI} – Diâmetro externo médio do invólucro;

ϕ_{II} – Diâmetro interno médio do invólucro

ϕ_{Max} – Diâmetro máximo do invólucro

ϕ_R – Diâmetro do resistor

F_{RC} – Fator de redução da capacidade de absorção de energia em função de NCP

FRP – Plástico reforçado com fibra de vidro

H – Constante de proporcionalidade

H_R – Altura do varistor

I – Corrente conduzida pelo varistor

I_{+1} – Pico positivo da corrente de fuga conduzida pelo varistor sob a aplicação de U_1

I_{-1} – Pico negativo da corrente de fuga conduzida pelo varistor sob a aplicação de U_1

$I_{\frac{U_R}{H_R}}$ – Corrente normalizada pelo quociente entre a tensão residual e altura do resistor

$I_{a(t)}$ – Decréscimo de corrente nos resistores mais recentes [mA]

I_{DN} – Corrente de descarga nominal do resistor

$I_F(t)$ – Corrente de fuga para o instante t [ms]

I_{F0} – Corrente de fuga inicial [mA]

I_{fuga} – Corrente de fuga

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*)

φ – Razão do comprimento do contorno da saia do invólucro pela distância entre as saias do invólucro

k – Condutividade térmica

k_1 – Constante característica do óxido de zinco

K – Constante de Boltzman ($5,72 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{k}^4$)

K_u – Relação entre a tensão de referência e o pico da tensão nominal

λ_A – Condutividade térmica do ar

λ_{EA} – Condutividade térmica do epóxi alumina

λ_{EPR} – Condutividade térmica do EPR

L_{Eq} – Indutância parasita

λ_{ES} – Condutividade térmica do epóxi - sílica

λ_i – Condutividade térmica do material do invólucro [$\text{W} \cdot \text{cm}/^\circ\text{K}$]

λ_P – Condutividade térmica da porcelana

λ_S – Condutividade térmica da borracha de silicone

LAT-EFEI – Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá

M – Acréscimo de corrente devido ao envelhecimento frente a surtos

MOV – Resistor não linear a óxido metálico (Metal oxide varistor)

MCOV – Máxima tensão de operação contínua (Maximum continuous operating voltage)

s – Segundos

N_{CP} – Número de colunas em paralelo

N_{RS} – Número de resistores série compondo uma coluna

P – Potência consumida ou dissipada pelos resistores [W]

PR – Para-raios

θ – Temperatura do componente [$^\circ\text{C}$] ou [K]

θ_A – Temperatura ambiente [°C] ou [K]

θ_{CV} – Fluxo de calor por convecção [W/°C.cm²]

θ_1 – Temperatura da superfície externa do invólucro

θ_{ii} – Temperatura da superfície interna do invólucro

θ_L – Temperatura de operação [°C]

θ_{OP} – Temperatura limite de operação [°C]

θ_R – Energia injetada no resistor por unidade de volume [J/m³]

θ_R – Temperatura do resistor [°K]

ρ – Densidade

R_{AV} – Resistência térmica entre a superfície do invólucro e o ambiente devido ao vento [°C/W]

R_{Cri} – Resistência térmica de condução através do material do invólucro

R_e – Número de Reynolds

R_{Elet} – Raio elétrico

R_{IA} – Resistência térmica entre a superfície externa do invólucro e o ambiente [°C/W]

R_{IACF} – Resistência térmica devido à convecção forçada entre a superfície externa do invólucro e o meio ambiente

R_{LEq} – Resistência linear equivalente do comportamento linear apresentado pelos grãos de óxido de zinco

R_{NEq} – Resistência não linear equivalente do comportamento não linear oferecido pelas barreiras de potencial devido ao Efeito Schottky

R_{RI} – Resistência térmica entre os resistores não lineares a óxido metálico (varistores) e a superfície do invólucro [°C/W]

R_{RIA} – Resistência térmica por radiação entre o invólucro e o ambiente

R_{RRI} – Resistência térmica por radiação entre resistores e invólucro

R_{RICN} : resistência por convecção natural entre os resistores e a superfície interna do invólucro

R_{RIACN} : resistência por convecção natural entre o ambiente e a superfície externa do invólucro

s – Segundos

σ_F – Tensão média mínima de ruptura frente a flexão [N/m²];

U_{dz1} – Tensão de polarização direta

U_{dz2} – Tensão de polarização reversa

U_1 – Tensão de referência para qual a corrente de fuga no resistor é de 1 mA determinada antes da aplicação de qualquer surto

U_m – Máximo valor rms da tensão em freqüência industrial entre fases em operação normal

U_n – Tensão nominal

U_{op} – Tensão de operação

U_r – Tensão residual de descarga

U_{ref} – Tensão de referência [pu];

ν – Coeficiente de Poisson

V_C – Volume do componente [cm³];

V_R – Volume dos resistores [cm³];

V_V – Velocidade do vento [Km/h].

Ω – Ohm

W – Calor fornecido ao para-raios devido a radiação solar [W]

W_1 – Potência dissipada pelo varistor submetido à U_1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Elevação da corrente de fuga em função do número de impulsos em varistores.....	5
Figura 3.1 – Perfil de temperatura na sinterização de um resistor a óxido metálico	20
Figura 3.2 – A estrutura de um resistor a óxido metálico.....	21
Figura 3.3 – A estrutura microscópica de um resistor a óxido metálico	21
Figura 3.4 – Analogia de um resistor a óxido metálico com a teoria dos semicondutores.....	22
Figura 3.5 – O gráfico com o circuito dos varistores em anti-série.....	22
Figura 3.6 – Circuito elétrico equivalente macroscópico de um resistor a óxido metálico	22
Figura 3.7 – Regiões condutoras da característica Tensão X Corrente de um resistor ZnO	24
Figura 3.8 – Característica Potência Consumida versus Temperatura de um varistor	25
Figura 3.9 – Para-raios de porcelana: Desenho em corte de um projeto Siemens AG, e foto de um para-raios real com invólucro de porcelana	27
Figura 3.10 – Principais projetos de para-raios com invólucro polimérico.....	28
Figura 3.11 – Desenho em corte de um para-raios com invólucro de tubo polimérico	29
Figura 3.12 – Desenho em corte do projeto de um para-raios polimérico encapado.....	30
Figura 3.13 – Desenhos em corte do projeto de um para-raios polimérico tipo gaiola	31
Figura 3.14 – Para-raios poliméricos tipo gaiola – Projeto ABB	31
Figura 3.15 – Analogia termoeletrica do invólucro de um para-raios a óxido metálico	37
Figura 3.16 – Projetos de invólucros de para-raios a óxido metálico segundo a Ontario Hydro.....	37
Figura 3.17 – Planta e corte de um resistor a óxido metálico genérico	44
Figura 3.18 – Relação entre capacidade de absorção de energia, a temperatura ambiente e a tensão aplicada ao pára-rios	47
Figura 3.19 – Verificação da estabilidade térmica da amostra	57
Figura 4.1 – Características potência consumida versus tempo	65
Figura 5.1 – Seqüência de ensaios de corrente de fuga e impulso de corrente.....	75
Figura 5.2 – Módulo de ensaios de corrente de fuga.....	76
Figura 5.3 – Forma de onda de impulso de corrente de curta duração.....	77
Figura 5.4 – Gerador de impulso de corrente de curta duração	78
Figura 5.5 – Ilustração da análise do Boxplot	80
Figura 5.6 – Análise da distribuição individual – gráfico com intervalos de confiança 95%	80
Figura 5.7 – Análise da distribuição individual – tabela com intervalos de confiança 95%	81
Figura 6.1 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em temperatura ambiente – (a) 100 impulsos (b) 20 impulsos	84
Figura 6.2 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em temperatura ambiente – Sobreposição dos modelos pleno e reduzido.	85
Figura 6.3 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C – (a) modelo pleno (b) modelo reduzido.....	86
Figura 6.4 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C – Modelo reduzido sobreposto ao pleno	86

Figura 6.5 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em a 80 °C – (a) modelo pleno (b) modelo reduzido.....	87
Figura 6.6 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 80 ° – Sobreposição dos modelos pleno e reduzido	88
Figura 6.7 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a temperatura ambiente – (a) Modelo pleno (b) Modelo reduzido	89
Figura 6.8 – Pico negativo da corrente de fuga para impulsos de 10 kA a temperatura ambiente – curvas plenas sobrepostas pela extrapolação dos modelos reduzidos. (a) Melhor (b) Retilíneo. 89	89
Figura 6.9 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C –(a) curva plena com todos os impulsos (b) curva plena com os 20 primeiros impulsos	90
Figura 6.10 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 80 °C –(a) Modelo pleno com todos os impulsos (b) Modelo pleno com os 20 primeiros impulsos	90
Figura 6.11 – Potência dissipada para 10 kA à temperatura ambiente – (a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos	91
Figura 6.12 – Potência dissipada para impulsos de corrente de 10 kA a 60 °C –(a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos	92
Figura 6.13 – Potência dissipada para impulsos de corrente de 10 kA a 80 °C – (a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos	92
Figura 6.14 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente	93
Figura 6.15 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C	94
Figura 6.16 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C	95
Figura 6.17 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente	95
Figura 6.18 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C.....	96
Figura 6.19 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C.....	96
Figura 6.20 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente.....	97
Figura 6.21 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C	97
Figura 6.22 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C	97
Figura 6.23 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente	98
Figura 6.24 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C	99
Figura 6.25 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C	99
Figura 6.26 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente	100
Figura 6.27 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C.....	100
Figura 6.28 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C.....	100
Figura 6.29 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente.....	101
Figura 6.30 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C	102
Figura 6.31 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C	102
Figura 6.32 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente	103
Figura 6.33 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C	103
Figura 6.34 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C	104
Figura 6.35 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente	105

Figura 6.36 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C.....	105
Figura 6.37 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C.....	105
Figura 6.38 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente.....	106
Figura 6.39 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C	106
Figura 6.40 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C	107
Figura 6.41 – Pico negativo para impulsos de 10 kA.....	108
Figura 6.42 – Pico negativo para impulsos de 15 kA.....	108
Figura 6.43 – Pico negativo para impulsos de 20 kA.....	109
Figura 6.44 – Pico negativo para impulsos de 30 kA.....	109
Figura 6.45 – Potência para impulsos de 10 kA	110
Figura 6.46 – Potência para impulsos de 15 kA	110
Figura 6.47 – Potência para impulsos de 20 kA	111
Figura 6.48 – Pico negativo para a temperatura ambiente.....	112
Figura 6.49 – Pico negativo para a temperatura de 60 °C.....	112
Figura 6.50 – Pico negativo para a temperatura de 80 °C.....	113
Figura 6.51 – Pico positivo à temperatura ambiente – a) 10, 15, 20 e 30 kA; b) 10 kA e 15 kA	113
Figura 6.52 – Pico positivo para a 10 kA e 15 kA – a) 60 °C; b) 80 °C.....	114
Figura 6.53 – Potência para a temperatura ambiente.....	115
Figura 6.54 – Potência para a temperatura de 60 °C.....	115
Figura 6.55 – Potência para a temperatura de 80 °C.....	116
Figura 7.1 – Probabilidade acumulada de amplitude de corrente descarregada por pára raios na área urbana na região do Rio Grande do Sul.....	118
Figura 7.2 – Probabilidade acumulada de amplitude de corrente descarregada por pára raios na área rural na região do Rio Grande do Sul.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condutividade Térmica de Materiais utilizados nos invólucros dos para-raios	39
Tabela 3.2 – Capacidade térmica de materiais utilizados na construção de para-raios	41
Tabela 3.3 – Principais características médias dos resistores a ZnO para análises térmicas	43
Tabela 3.4 – Energia máxima absorvida (limite de estabilidade térmica) para classes de para-raios .	48
Tabela 3.5 – Energia específica das diversas classes de para-raios	48
Tabela 3.6 – Tempo prospectivo máximo de vida	55
Tabela 3.7 – Procedimento para o ensaio em função dos resultados obtidos	55
Tabela 5.1 – Ensaio de Impulso de corrente.....	77
Tabela 5.2 – Dez primeiros impulsos de 10 kA a 60 °C de uma amostra.....	79
Tabela 5.3 – Dez impulsos de 20 kA a 60 °C para as 15 amostras.....	81

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão e redes aéreas de distribuição urbanas e rurais são vulneráveis a sobretensões que podem provocar a queima de equipamentos, tanto da concessionária quanto do consumidor de energia elétrica. As sobretensões podem ser de origem externa, como as descargas atmosféricas, ou internas como surtos de manobra de chaves seccionadoras e disjuntores. A proteção dos sistemas elétricos contra os surtos de tensão é realizada com a instalação dos para-raios, que reduzem o nível de sobretensão a valores compatíveis com a suportabilidade destes sistemas ^[1.1].

Atualmente existem dois elementos de características não lineares a partir dos quais são construídos os para-raios: o carboneto de silício – SiC – e o óxido metálico, mais conhecido como óxido de zinco – ZnO – por representar a maior parte do composto.

Os para-raios a SiC são basicamente formados por centelhadores montados em série com os resistores de carboneto de silício. Os centelhadores possuem duas funções: isolar o para-raios do sistema em regime permanente; e auxiliar a extinção da corrente subsequente. No primeiro caso, devido à própria natureza do SiC , o para-raios submetido a uma tensão de operação em frequência industrial apresenta uma corrente de fuga capaz de destruí-lo em poucos ciclos. Na segunda função, a corrente que flui através dos elementos não lineares após a corrente de descarga é extinta em sua passagem pelo zero ou na sua proximidade, dependendo do projeto do centelhador.

Apesar de ser utilizado por várias décadas e de sucessivas melhorias, a presença dos centelhadores e as propriedades do SiC terminaram por estagnar a evolução

tecnológica deste tipo de para-raios. Atualmente ainda existe uma quantidade significativa destes para-raios instalada nos sistemas elétricos, mas sua produção vem sofrendo descontinuidade.

A tecnologia dos varistores de SiC perdurou sem concorrência até o final da década de 60, quando a Matsushita Electrical Co. Ltd apresentou um dispositivo formado por elementos a base de ZnO e pequenas quantidades de outros óxidos que apresenta elevado grau de não linearidade.

Os varistores de ZnO começaram a ser produzidos em escala industrial a partir de 1968 para fins de proteção de circuitos eletrônicos. A partir deste desenvolvimento, diversas empresas sob a licença da Matsushita iniciaram estudos visando o desenvolvimento de varistores para aplicação em sistemas de potência. Os primeiros para-raios de ZnO foram lançados no mercado no final da década de 70 pela Meidensha Electric Manufacturing Company Ltda. Na década de 80 diversas empresas japonesas, européias e americanas desenvolveram e produziram para-raios a ZnO para redes de distribuição, transmissão e subestações.

O elevado grau de não linearidade dos resistores a óxido metálico permite ao para-raios quando submetido à tensão normal de operação do sistema, conduzir apenas uma corrente de fuga na faixa de microampères. Este fato tornou dispensável a utilização dos centelhadores série e a conseqüente eliminação do problema da corrente subsequente. Por outro lado, o para-raios fica constantemente submetido à tensão nominal do sistema que protege.

O para-raios ideal é um dispositivo de proteção contra sobretensões que apresenta impedância infinita entre seus terminais sob regime permanente; entra em condução instantaneamente na ocorrência de uma sobretensão com valor próximo ao nominal do sistema (mantendo este nível de tensão durante toda a sobretensão); e cessa a condução assim que a tensão do sistema retorna ao estado inicial com sua característica Tensão X Corrente restaurada. Ainda, esta operação não causa distúrbios ou degradação ao sistema ou ao próprio para-raios. Os para-raios reais, no entanto, não atendem plenamente a nenhum requisito de um para-raios ideal, porque os resistores a óxido metálico, seus componentes ativos, não são estruturas perfeitas.

Além das solicitações em frequência industrial, as altas correntes de descarga conduzidas pelos para-raios quando submetidos a sobretensões provocam alterações na estrutura dos resistores não lineares. Os efeitos isolados da condução de densidades de corrente próximas ou maiores que a nominal praticamente não possuem referências na literatura ou em normas específicas.

Certos ensaios recomendados em normas consistem na aplicação de impulsos de corrente com amplitudes equivalentes a várias vezes a corrente nominal de descarga do para-raios. O objetivo destes ensaios é verificar, entre outros, a capacidade de resfriamento do para-raios após conduzir uma corrente de descarga de grande amplitude, estando submetido à tensão nominal do sistema. No entanto, os efeitos deste procedimento na vida útil dos resistores não lineares não são comentados.

Dentro deste contexto, Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta ^[1.2] apresentaram em abril de 1982 os resultados de um trabalho experimental sobre o envelhecimento dos resistores a óxido metálico. O ponto de partida foi o fato de que este tipo de para-raios, em ascensão na época, não possuindo espaçamentos em série (centelhadores) com os resistores era continuamente exposto à solitação da tensão do sistema e, portanto, submetido ao envelhecimento contínuo. A degradação e a estabilidade térmica dos resistores não lineares após a operação por ocorrência de surto representavam um problema até então inexistente nos para-raios convencionais, devido à presença dos centelhadores.

Nos para-raios a óxido metálico, podem surgir avalanches térmicas repentinamente após a operação frente a um surto de manobra se a energia absorvida pelo para-raios for maior que a sua capacidade de dissipação. Por outro lado, a elevação de temperatura proporcionada pelo surto causa a elevação da corrente de fuga e conseqüentemente, uma elevação na potência a ser dissipada na forma de calor e o para-raios, então, apresenta um fenômeno cíclico realimentado positivamente até a avalanche térmica de forma não imediata.

As condições para as avalanches térmicas são função do quanto os resistores foram degradados devido a esforços da tensão do sistema ou a operações frente a surtos durante a vida útil. De acordo com [1.2] as características de degradação são o fator mais importante na determinação da vida útil de um para-raios a óxido metálico e, naquela época, já existiam vários estudos sobre o envelhecimento devido aos esforços da tensão a.c. do sistema; mas ainda hoje as informações sobre o envelhecimento frente a surto são restritas.

Os autores de [1.2], no entanto, consideraram o efeito combinado da degradação frente à solitação em frequência industrial do sistema com as solitações de um surto. Mais precisamente, os efeitos combinados de uma corrente de surto em um para-raios por onde fluía uma corrente de fuga antes, flui durante, e continuará fluindo após o surto. A justificativa é de ser esta a situação real encontrada em campo.

Nesses experimentos foram utilizados elementos de duas composições diferentes, ambos em peças de 30 mm de diâmetro por 10 mm de altura, nos quais foram aplicados três tipos de surto:

- Impulso de corrente na forma $4 \times 10 \mu\text{s}$;
- Impulso de corrente na forma $8 \times 20 \mu\text{s}$;
- Impulso de manobra na forma $500 \times 1500 \mu\text{s}$.

Em todos os casos, o impulso foi aplicado simultaneamente à aplicação de valores em torno de 85% da tensão máxima de operação contínua (valores entre 65% e 75% eram utilizados para para-raios em campo). A tensão e o impulso eram aplicados à amostra inserida em um forno onde a temperatura especificada (de 60 °C a 130 °C) era mantida durante todo o período de experimento – 1000 horas.

A degradação das amostras foi avaliada através das alterações na característica da tensão U_{1mA} antes e depois da absorção de surto, ou seja, na tensão para qual o componente resistivo da corrente de fuga no varistor é de 1 mA, antes da absorção de qualquer surto comparada com a aplicação de sucessivos impulsos. A elevação da corrente de fuga após a aplicação de certo número de impulsos é mais evidente em seu componente resistivo, e na tendência a polarização, com a perda da simetria (ou ampliação da assimetria) dos picos positivo e negativo.

Os autores verificaram as alterações na característica de tensão U_{1mA} aplicada tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua. No entanto, não foi mencionada a polaridade da aplicação da tensão em corrente contínua em relação à corrente alternada.

A leitura e/ou registro da forma de onda de tensão e corrente de fuga das amostras submetidas a tensão em frequência industrial antes e depois da aplicação de impulsos de corrente foram realizadas com osciloscópios analógicos e fotografias. Este procedimento, o disponível na época, talvez tenha limitado os autores a não levantar as alterações na potência dissipada pela amostra durante o experimento.

Como resultado obtiveram que o envelhecimento dos resistores a óxido metálico é função dos seguintes fatores:

- Forma do impulso de corrente;
- Densidade da corrente do impulso;
- Temperatura da amostra no momento da aplicação do impulso de corrente;
- Número de surtos absorvidos;
- Tensão em frequência industrial aplicada.

Encontraram que a degradação das amostras é aproximadamente linear em relação ao número de impulsos de corrente aplicado. No entanto, a degradação relativa ao primeiro surto é maior que as apresentadas pelos surtos seguintes, conforme ilustrado na Figura 1.1 ^[1,2], onde o eixo das abscissas representa o valor normalizado do acréscimo da corrente de fuga após cada aplicação de impulso. Ou seja, conforme a Equação 1.1:

$$m = \frac{\Delta I_F}{I_{F0}} \quad (1.1)$$

Onde:

ΔI_F : variação da corrente de fuga de um varistor após um impulso de corrente;

I_{F0} : corrente de fuga do varistor antes da aplicação do primeiro impulso.

A relação com a temperatura pode também ser evidenciada na Figura 1.1, pelo aumento na tangente de cada reta [1.2]. Não apenas a tendência de envelhecimento propriamente dita como também a degradação inicial da primeira absorção de energia a uma temperatura mais elevada.

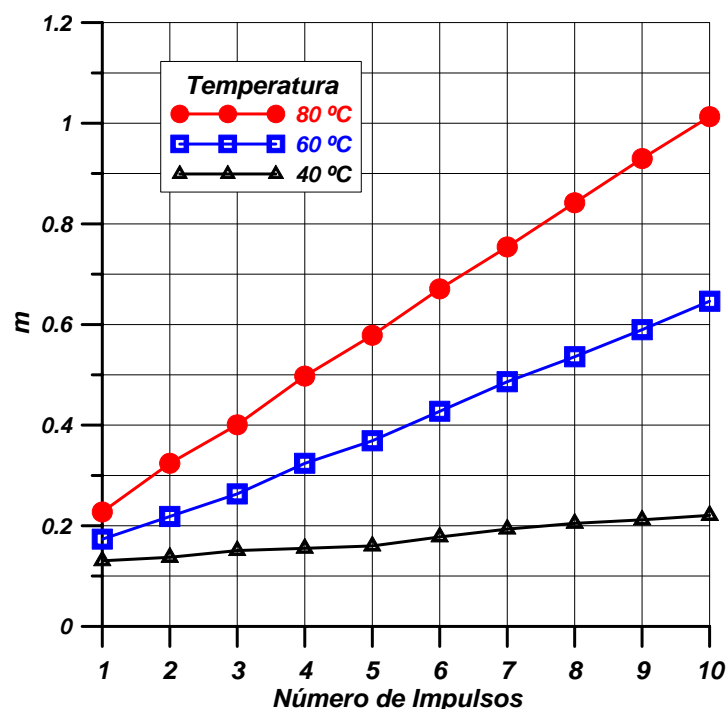


Figura 1.1 – Elevação da corrente de fuga em função do número de impulsos em varistores

O objetivo desta tese é analisar o processo de envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico (MOV) frente a surtos atmosféricos, tendo como base a metodologia utilizada e os resultados publicados em [1.2]. De forma semelhante, são verificados os efeitos da densidade da corrente, da temperatura da amostra no instante da aplicação do impulso de corrente e do número de impulsos aplicados à amostra nas características para a tensão de referência U_{1mA} .

A primeira diferença, no entanto está no modo de aplicação do impulso de corrente. Os autores de [1.2] aplicaram os impulsos de corrente com as amostras submetidas a valores em torno de 0,85 p.u. da tensão de operação. Este procedimento impõe um envelhecimento às amostras, mas não permite, no entanto, quantificar a parcela referente a cada solicitação, ou seja, quanto de um envelhecimento como um todo é devido

à solicitação de uma descarga atmosférica, e quanto se deve à tensão em frequência industrial antes, durante e após a descarga de corrente. Desta forma, a presente pesquisa levou em consideração a aplicação de impulsos de corrente em amostras desenergizadas.

Em [1.2] não há menção a respeito do número de amostras utilizadas em cada modalidade de ensaio ou de ferramentas estatísticas para a análise dos resultados. O número máximo de aplicações citado foi 10, e o envelhecimento para um número superior a este seria estimado por extrapolação de um modelo linear. Os autores não comentam o parâmetro potência ou o fenômeno de polarização.

O presente estudo considera um número inicial de amostras igual a 15 para efetuar análises estatísticas dos resultados e a então verificação da consistência física. Com a aplicação de impulsos a tendência foi a destruição de amostras e/ou sua eliminação da massa de dados através da análise estatística. Foram então aplicados impulsos de corrente até que o número de amostras fosse reduzido a dois terços do inicial, ou que os resultados não mais apresentassem significado prático.

A leitura das características para a tensão de referência U_{1mA} após cada aplicação de impulso foi realizada em tensão alternada e com a amostra instalada sempre na mesma posição física, ou seja, os efeitos dos picos positivo e negativo sempre eram identificados. A polaridade considerada dos impulsos foi a positiva, também com as amostras instaladas com a mesma posição física, para evitar que fossem aplicados os efeitos de um impulso de polaridade inversa.

Os valores de pico positivo e negativo foram lidos de forma independente sob U_{1mA} , e matematicamente obtido o terceiro parâmetro: a média dos picos. O quarto parâmetro considerado foi a potência, cujas alterações foram registradas simultaneamente aos picos positivo e negativo.

De forma semelhante a [1.2] foi encontrada a existência de proporcionalidade entre a degradação das amostras e o número de impulsos aplicados. No entanto, o modelo retilíneo não se mostra adequado, principalmente quando se usa extrapolações para estimar o envelhecimento para um número maior de impulsos de corrente.

Nos vários conjuntos de ensaios, o melhor modelo é não linear. Em densidades mais elevadas de impulso de corrente a degradação é mais acelerada, resultando que os diferentes níveis de degradação não necessariamente são mais bem representadas pela mesma equação.

As normas nacionais e internacionais recomendam procedimentos que visam garantir a qualidade dos equipamentos, neste caso específico dos para-raios. No entanto, com base na degradação observada após a aplicação de impulsos de corrente com densidades muito superior à nominal dos varistores, a execução destes procedimentos

podem reduzir a qualidade e confiabilidade dos para-raios ao posicioná-los em um ponto próximo ao final de sua vida útil.

No ensaio de ciclo de operação, por exemplo, são aplicados dois impulsos de amplitude elevada com a amostra submetida à sua máxima tensão de operação contínua. Nos pára raios de 5 kA, duas aplicações de 65 kA, e nos de 10 kA, duas aplicações de 100 kA. Ou seja, duas aplicações de, no mínimo, 10 vezes a corrente nominal. O objetivo é verificar a estabilidade térmica da amostra, ou seja, verificar sua capacidade de se resfriar após conduzir uma (ou duas) corrente(s) de descarga de amplitude elevada.

Duas solicitações desta amplitude implicam em impor um grau elevado de envelhecimento às amostras, ou até levá-las à destruição. Os pontos a serem observados neste caso são a tensão residual do para-raios frente a um impulso de amplitude elevada, a probabilidade de ocorrência de uma única descarga em tais dimensões, e quais observações feitas pelas normas pertinentes acerca do envelhecimento imposto às amostras, caso a destruição não ocorra.

A tensão residual de um para-raios conduzindo uma corrente de descarga maior do que dez vezes sua corrente nominal provavelmente excederia o nível de suportabilidade do equipamento protegido, ou seja, a suportabilidade de um para-raios nesta situação não é garantia de que o seu papel de proteção seria desempenhado.

Com relação aos impulsos de corrente elevada, no sul do Brasil, uma das regiões de maior nível isoceráunico da América Latina, por exemplo, 99% das correntes descarregadas por para-raios são menores do que 80 kA na área rural, e menores que 50 kA na área urbana ^[1.3-1.4]. Considerando uma taxa de probabilidade nestas proporções para uma única corrente descarregada em amplitudes mais elevadas, a probabilidade de duas ocorrências de correntes com amplitudes ainda mais elevadas torna-se ainda mais baixa.

A não disponibilidade de resultados e/ou informações a respeito do envelhecimento frente a surtos de resistores não lineares a óxido metálico, a data avançada de um dos mais importantes trabalhos sobre o assunto, e a ausência de comentários nas normas nacionais e internacionais tornam interessante uma análise do comportamento da parte ativa dos para-raios frente a estas solicitações.

Tanto em campo quanto em laboratório, as solicitações impostas aos para-raios, e, por conseguinte aos resistores não lineares, podem não encontrar um ponto de consistência. A justificativa para a manutenção desta situação pode permanecer indefinidamente sem explicação por razões desconhecidas.

É também objetivo desta tese discutir um método de ensaio capaz de verificar/determinar a corrente nominal de um resistor não linear com base em seu envelhecimento e taxa de falha; bem como discorrer, com base em verificações de campo e

laboratório, a real necessidade da aplicação de impulsos de corrente com valores que atingem dez vezes (ou mais) o valor nominal, face à probabilidade de ocorrência de uma descarga de tal amplitude, à eficácia da proteção oferecida (tensão residual) frente a uma solicitação tão elevada e, principalmente, à degradação imposta aos resistores lineares.

De acordo com as normas nacionais e internacionais a definição das correntes nominais e os ensaios de impulso de corrente com amplitude elevada verificam somente a capacidade de resfriamento da amostra e pouca atenção é dispensada aos modos de envelhecimento exceto sob tensão em frequência industrial. No entanto, a partir de certo valor de amplitude, em específico o ensaio de corrente elevada se mostra mais adequado para verificar a probabilidade de avaria mecânica da unidade/resistores do que a própria capacidade de resfriamento. Nestes casos, até mesmo a degradação imposta seria um parâmetro impossível de ser avaliado.

Para a discussão desses pontos esta tese é dividida em sete capítulos além desta introdução. O Capítulo 2 traz por um breve histórico sobre o para-raios, desde os centelhadores utilizados nos circuitos telefônicos, até os para-raios de ultra alta tensão utilizados em subestações e longas linhas de transmissão.

Visando o embasamento global sobre o para-raios a óxido metálico, os resistores não lineares que compõem sua parte ativa, os invólucros, e as bases para projetos de um para-raios deste tipo são comentados no Capítulo 3, bem como os parâmetros característicos de um para-raios, e os ensaios descritos no projeto de norma nacional e normas internacionais por vezes utilizadas como referência para fabricantes e usuários no Brasil.

Como o objetivo de abordar a degradação, principal assunto desta tese, o Capítulo 4 comenta o processo de envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico tanto frente a tensões em frequência industrial, quanto frente a surtos, e aborda os mecanismos de falha dos para-raios, como a avalanche térmica e a falha direta.

O método de investigação desenvolvido nesta tese é abordado no Capítulo 5, que descreve os métodos de ensaio, os parâmetros iniciais, o levantamento de dados com a análise estatística e os respectivos critérios de avaliação. São também descritos os ensaios de corrente de fuga e de impulso de corrente.

A análise do envelhecimento dos resistores a óxido metálico frente a surtos de curta duração é abordada no capítulo 6 através de gráficos levantados com base nos resultados dos ensaios. Os gráficos apresentados mostram a evolução do envelhecimento frente a surtos em função do número de impulsos de corrente aplicados, considerando a amplitude dos impulsos de corrente e a temperatura das amostras no instante do impulso atmosférico de corrente. Com base no comportamento dos gráficos levantados é avaliada a

confiabilidade da utilização de cada um dos parâmetros fornecidos pelo ensaio de corrente de fuga para representar o envelhecimento frente a surto dos resistores não lineares.

E finalmente, as conclusões/comentários, traçando um paralelo com [1.2] e com as recomendações previstas nas normas vigentes são apresentadas no Capítulo 7, e as referências bibliográficas de toda a tese é descrita no Capítulo 8.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 1

- [1.1] MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos* – 3ª edição – Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A, 2005. 792 p.
- [1.2] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [1.3] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Disribution Networks*”. Proceedings of X SIPDA – Curitiba 2009.
- [1.4] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Disribution Networks Surge Arresters*”. Proceedings of PowerTech 2009 Bucarest - Romenia.

CAPÍTULO 02

PARA-RAIOS – UM BREVE HISTÓRICO

O desenvolvimento do para-raios contemplou três fases principais relacionadas ao progresso da indústria da eletricidade no final do século XIX e início do século XX e uma fase complementar altamente tecnológica no final da década de 1970 ^[2.1].

A primeira fase foi determinada pela evolução dos sistemas elétricos com potência de curto-circuito desprezível, como a dos circuitos de telefonia. A segunda corresponde à evolução dos sistemas elétricos em média tensão e reduzida potência de curto-circuito, como os circuitos de distribuição primária, iluminação e transporte. A terceira fase foi determinada pela evolução dos sistemas elétricos em alta tensão e elevada potência de curto-circuito como os sistemas de transmissão de potência. E a quarta fase foi marcada pela evolução dos sistemas em extra alta tensão e elevada potência de curto-circuito tais como os grandes sistemas de transmissão de potência, sistemas em corrente contínua e subestações blindadas ^[2.1].

O surgimento dos primeiros circuitos telegráficos em grandes extensões continentais trouxe a necessidade da sua proteção contra descargas atmosféricas, que era fornecida por meio de pequenos centelhadores, fato ainda comum nas instalações telefônicas atuais. O baixo nível de curto-circuito destes sistemas proporciona aos centelhadores uma operação praticamente automática, permitindo que o sistema retorne às suas condições operativas iniciais sem a atuação de um dispositivo complementar.

O valor instantâneo do impulso de tensão a partir do qual os centelhadores entram em condução e desviam a corrente de surto para a terra define a primeira das

grandezas características dos dispositivos de proteção contra surtos de tensão convencionais, a *Tensão Disruptiva*.

Com a evolução dos níveis de tensão dos sistemas elétricos de potência, um novo problema veio à tona: controlar a corrente de curto-circuito para a terra subsequente à atuação dos centelhadores. Este talvez tenha sido o ponto chave de todas as pesquisas sobre proteção contra surtos de tensão e principal propulsor do seu desenvolvimento nas primeiras três décadas do século XX.

O primeiro registro de investigação das “Correntes Subseqüentes” foi reportado em maio de 1894, através do “American Institute of Electrical Engineers – AIEE” por “A.J.Wurts”, conceituando os fenômenos relacionados com os “Non Arching Metals”, ligas em “zinco-cobre”. Estas ligas conduzem corrente em uma direção, mas necessitam de uma tensão extremamente alta (se comparada com a tensão para condução no sentido direto) para iniciar a condução na direção reversa.

Durante anos esta idéia foi amplamente utilizada na construção destes centelhadores sofisticados que, na literatura técnica, eram denominados “*para-raios multicentelhadores*”. Segundo este princípio, os para-raios permaneciam em condução subsequente à descarga de um impulso de corrente por alguns semiciclos da tensão em frequência industrial (caracterizando um curto-circuito fase terra), restringindo sua aplicação aos circuitos em corrente alternada com baixa potência de curto-circuito.

Por muitos anos os projetos de para-raios ficaram concentrados na utilização de resistências em série com os para-raios multi centelhadores, principalmente em sistemas de alta potência de curto-circuito, onde meio ciclo de corrente subsequente (de curto-circuito fase terra), é o suficiente para danificar o para-raios. O principal problema desta solução é que apesar de reduzir a corrente subsequente, aumenta a tensão residual e consequentemente o nível da tensão de proteção.

Tensão residual é o valor da queda de tensão que aparece entre os terminais de um para-raios quando conduz corrente de descarga. Quanto maior a tensão residual, maior a tensão a partir da qual o para-raios começa a proteger o sistema.

Esta situação resultou na necessidade de uma resistência variável (não linear) capaz de reduzir a corrente subsequente sem resultar em um nível de proteção elevado. Naquela época, no entanto, a ciência dos materiais elétricos se encontrava em estágio embrionário e os materiais semicondutores eram praticamente desconhecidos. A solução encontrada foi colocar em curto a resistência série através de multi centelhadores paralelos, o que apesar de simples, definiu uma série de conceitos utilizados nos projetos dos centelhadores ativos das últimas gerações de para-raios a carboneto de silício – SiC.

Neste conceito os impulsos de baixa amplitude circulam pela resistência série, e

os de amplitude elevada, pelos multi centelhadores paralelos resultando, teoricamente, em um nível de proteção reduzido. Na limitação da corrente subsequente, o resistor série desestabiliza o arco formado nos multi centelhadores em paralelo com resistores de equalização, facilitando sua extinção pelos multi centelhadores série em alguns semi-ciclos.

Tão logo os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos começaram a crescer, principalmente com as linhas de transmissão em alta tensão, os para-raios multi centelhadores passaram a falhar sistematicamente ^[2.1], normalmente, devido à não interrupção da corrente subsequente (reselagem). Nesta época surgiram as primeiras noções sobre surtos em altas frequências devido a manobras nos sistemas elétricos e seus efeitos nos equipamentos de proteção contra surtos de tensão. Problemas semelhantes voltaram a acontecer por volta de 50 anos depois nos para-raios a carboneto de silício para sistemas em extra alta tensão.

A primeira solução efetivamente viável utilizou dispositivos eletrolíticos conhecidos como células de alumínio no lugar do resistor conectado ao sistema elétrico através de um centelhador, usualmente na forma de chifre. A literatura denomina este conjunto, para-raios eletrolítico ou para-raios em alumínio.

Apesar de seu excelente desempenho em campo, sua manutenção extremamente laboriosa, o seu custo elevado ^[2.1] e, conseqüentemente, a relação entre os custos dos equipamentos protetor e protegido, seu campo de aplicação foi praticamente restrito às grandes subestações onde predominou por mais de uma década, até o advento dos primeiros para-raios a estado sólido, por volta do fim da década de 1910 e início da década de 1920.

Os para-raios a filme óxido, de construção física similar aos eletrolíticos (um centelhador em série com um resistor), tinham como componente básico um composto químico seco em pó que ligeiramente aquecido muda drasticamente da condição de condutor para isolante. Possuíam manutenção mais simples e de menor custo em relação aos eletrolíticos ^[2.1].

A evolução do sistema “filme óxido”, na busca de para-raios para média tensão de custo compatível com o equipamento protegido, resultou no sistema tecnicamente denominado “*Pellet*”. Este sistema é baseado em alguns princípios da química coloidal que abordam o comportamento das partículas sólidas que tratam da adesão e recobrimento de partículas de grande diâmetro por aquelas de diâmetro menor (o princípio do recobrimento das cerejas por grãos de açúcar). As *Pellets* são obtidas através do processamento e recobrimento, com um material isolante em pó, no caso, pequenas esferas de peróxido de chumbo – PbO_2 que resulta na transformação de cada esfera em uma célula a filme óxido.

Por esta época já corriam, aproximadamente, 40 anos da introdução dos princípios que definem o comportamento dos “*Non Arching Metals*”, período no qual vários progressos foram alcançados na determinação das grandezas relacionadas aos surtos de tensão nos sistemas elétricos, principalmente os atmosféricos. Também foi observada a evolução de equipamentos e da definição de técnicas de ensaio representativas que, em conjunto com a evolução dos sistemas elétricos e dos materiais, resultou em uma drástica mudança nas técnicas de proteção contra surtos. Este ponto de inflexão foi responsável pela disseminação dos para-raios nos sistemas elétricos com a introdução dos resistores não lineares a carboneto de silício – SiC, no início da década de 30 ^[2.1].

Os resistores a SiC foram os primeiros corpos sólidos com as principais características necessárias à construção de para-raios compactos de custo reduzido e, principalmente, de desempenho compatível com a crescente sofisticação dos sistemas elétricos. As técnicas de proteção contra surtos de tensão evoluíram, então, rapidamente permitindo a crescente redução dos níveis de suportabilidade dos equipamentos sem a qual, a construção dos grandes sistemas de transmissão em extra e ultra alta tensão seria economicamente impossível.

A evolução dos projetos de para-raios a SiC (convencionais) teve seus principais esforços dirigidos ao aperfeiçoamento de seus centelhadores que foram equipados com dispositivos de equalização do potencial interno, cujo desempenho é influenciado pela presença de contaminação ambiental. Na seqüência da evolução, passaram a participar ativamente do processo de interrupção da corrente subsequente logo após a introdução do princípio do sopro magnético, por fim dos anos 50, início dos anos 60. Este fato resultou na segunda grande revolução das técnicas de operação contra surtos, pois possibilitou a redução instantânea da corrente subsequente ao nível de proteção contra surtos. Seus reflexos foram imediatos nos níveis de suportabilidade da isolação dos equipamentos, principalmente os de alta e extra alta tensão e, conseqüentemente, nos custos de implantação dos grandes sistemas.

Com a evolução dos sistemas elétricos de potência o papel dos para-raios passou a ser cada vez mais relevante. No entanto, alguns dos pontos fracos dos para-raios convencionais impostos pelos centelhadores começaram a ser sistematicamente realçados. Dentre estes o mais importante foi o baixo desempenho frente a descargas de manobra, extremamente importante nos grandes sistemas em extra e ultra alta tensão em corrente alternada. Como agravante, apresentou um comportamento inadequado frente a grande parte das solicitações dos sistemas em corrente contínua e nas subestações blindadas.

No caso da corrente contínua, a ausência de zeros na forma de tensão faz necessário trabalhar com para-raios a SiC com centelhadores ativos e, neste caso, o ciclo de operação (trabalho térmico imposto pela descarga de corrente subsequente) é sempre o

máximo, fato que estatisticamente reduz sua vida útil. Nas subestações blindadas, sujeitas a surtos de frente rápida, o para-raios a SiC pode ser inadequado devido à presença dos centelhadores e conseqüentemente ao retardo imposto por eles.

Paralelamente à evolução tecnológica dos sistemas elétricos, a associação entre “Cerâmica Técnica” e o desenvolvimento dos semicondutores a estado sólido, proporcionou o início de uma intensa fase de pesquisa para a obtenção de novos materiais de uso eletrotécnico. Como fruto destes esforços, nos fins dos anos 70, um resistor não linear [2.2] composto por óxido de zinco – ZnO, um óxido metálico dopado com uma mistura de outros óxidos metálicos, passou a ser utilizado na construção de para-raios.

Os para-raios a óxido metálico, devido ao alto grau de não linearidade de seus resistores, podem ser construídos sem centelhadores de espécie alguma o que lhe proporciona um desempenho superior aos de SiC frente a descargas de manobra, nos sistemas de corrente contínua, e subestações blindadas.

A abolição dos centelhadores, no entanto, não foi a linha originalmente adotada por todos os fabricantes. A General Electric™ adotou inicialmente em seus para-raios classe estação os centelhadores paralelos. A Ohio Brass™, por outro lado, inicialmente adotou nesta linha, os centelhadores série.

As solicitações impostas aos para-raios a óxido metálico sem centelhadores são superiores às impostas aos seus equivalentes a SiC. Deste modo, sua introdução principalmente nos sistemas de extra alta tensão foi acompanhada de uma série de estudos para determinar seu desempenho em campo. Um dos primeiros pontos fracos detectados foi a degradação frente a solicitações em frequência industrial, praticamente contornada com a introdução de uma série de resistores com desempenho mais estável não só frente a estas solicitações como as de impulsos atmosféricos e de manobra.

Os resistores a óxido metálico apresentam características técnicas mais constantes que os a SiC, o que propicia a definição de processos produtivos com elevado grau de automação. Este fato reduziu custos e provocou a descontinuidade da produção dos para-raios convencionais, pelo menos para sistemas em alta tensão e superiores.

No momento a evolução dos para-raios a óxido metálico segue um conjunto de orientações cujo principal objetivo é o projeto de resistores compactos, de melhor desempenho frente às solicitações impostas pelo sistema [2.3–2.4], e avaliar os reais ganhos da reintrodução dos centelhadores série nos projetos para média tensão [2.5–2.8].

É possível afirmar que, ao lado do conjunto *disjuntores-relés de proteção*, estes são os mais bem sucedidos equipamentos para a proteção contra surtos de tensão. Os para-raios foram um dos poucos equipamentos elétricos desenvolvidos de forma quase que

totalmente experimental, de maneira bastante distinta dos transformadores, geradores, motores e outros cujo comportamento é possível de ser equacionado.

Deste modo, o desenvolvimento dos para-raios foi sustentado por um conjunto de dados de campo relativos às solicitações de descargas atmosféricas e dos sistemas de potência que evoluíram positivamente através dos anos, aliado ao crescente conhecimento do comportamento de determinados materiais para uso eletrotécnico.

O progresso obtido ao longo dos anos com materiais mais adequados e a melhoria de desempenho é inquestionável. Porém, o caminho percorrido foi árduo e orientado por uma seqüência lógica, que teve seu obscuro início com a construção dos primeiros centelhadores e tem continuidade no presente com os modernos para-raios a óxido metálico sem centelhadores. No entanto, boa parte dos princípios delineados, ainda nos primórdios da técnica, permanece válida e em uso.

2.1 – COMENTÁRIOS

A história do desenvolvimento do para-raios se confunde com a história do desenvolvimento do próprio sistema de potência. Desde os circuitos de telecomunicações com os pequenos centelhadores, até os grandes sistemas de transmissão de potência em ultra alta tensão e os para-raios a óxido metálico com invólucros poliméricos. Talvez por representar uma tecnologia recente ao longo da existência e desenvolvimento do para-raios, não se encontram, na literatura, informações disponíveis a cerca do envelhecimento frente a surto dos resistores não lineares a óxido metálico, assunto desta tese.

2.2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 2

- [2.1] M.L.B. Martinez, “Para-raios para Sistemas de Média Tensão – Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – 1992.
- [2.2] Sakshaug, E.C. et al, “A New Concept in Station Arrester Design”, Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE – PAS pp. 647-656 – 1977.
- [2.3] Imataki, M. et al, “Advanced Metal Oxide Surge Arrester for Gas Insulated Switchgear”, Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE – PAS 103 – pp 2990-2998 – 1984.
- [2.4] Miznuo, M. et al. “Thermal Stability and Life of the Gapless Surge Arrester”, Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 100 – pp 2664-2671 – 1981.

- [2.5] Martinez, M.L.B., “Para-raios a ZnO – Tipos Construtivos”, I Seminário Sobre materiais do Setor Elétrico, Curitiba – 1987.
- [2.6] Martinez, M.L.B., “Para-raios a Óxido de Zinco – ZnO para Sistemas de Distribuição – Características Construtivas – Comentários Gerais”, I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte – 1990.
- [2.7] Westrom, A.C., Law, S.W., “Increasing the Reliability of Metal Oxide Arrester”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE – PWRD 5 – pp. 1823-1829 – 1990.
- [2.8] Cogo, J.R., Martinez, M.L.B., “Aspectos Tecnológicos da Construção de Para-raios para Sistemas de Potência em Média Tensão”, VI Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá – 1992.

CAPÍTULO 03

O PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Os resistores não lineares a óxido metálico (MOV), também conhecidos como varistores, são corpos cerâmicos cilíndricos de alta densidade, normalmente da ordem de $5,4 \text{ g/cm}^3$ a $5,6 \text{ g/cm}^3$ (valor teórico), obtidos através de moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas, em geral sob atmosfera oxidante ^[3.1]. São obtidos da mistura de óxido de zinco (ZnO) (de 90% a 97% em peso) e outros óxidos metálicos como o antimônio – Sb_2O_3 , o manganês – MnO_2 , o bismuto – Bi_2O_3 , o cobalto – Co_2O_3 , o cromo – Cr_2O_3 , o níquel – NiO e o alumínio Al_2O_3 ^[3.1-3.2]. O ZnO é obtido pela oxidação do vapor de zinco metálico, que permite a manutenção de baixo nível de impurezas e tamanho médio da partícula de $0,3 \mu\text{m}$.

Um processo de mistura otimizado requer tamanhos médios reduzidos de partículas para evitar a decantação excessiva durante as etapas de homogeneização e secagem do material. Após a adequação das matérias primas, processa-se uma pré-mistura, sinterizada a temperaturas entre $700 \text{ }^\circ\text{C}$ e $900 \text{ }^\circ\text{C}$, onde ocorre a primeira difusão dos óxidos dentro da matriz formada pelos grãos de ZnO .

A pré-mistura assim formada é complementada por um novo processo de mistura e moagem úmida, secagem e adição de plastificantes (idealmente) com o auxílio de um ciclone atomizador (spray drier system) que processa as duas últimas etapas e evita os resultados indesejáveis da decantação devido à diferença de densidades dos óxidos. O pó então obtido, com umidade entre 0,1 e 0,5 %, é prensado em forma cilíndrica sob pressões de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$ a 21 kgf/cm^2 . Os resistores neste estágio apresentam densidade média da ordem de $2,8 \text{ g/m}^3$ ^[3.1].

Os resistores são então sinterizados em fornos de temperatura controlada por 1 a 2 horas de 1150 °C a 1250 °C. Nesta etapa acontece a formação das camadas intergranulares na região de contorno dos grãos de ZnO. A formação destas barreiras físicas e elétricas entre os grãos adjacentes de ZnO são proporcionadas pelos óxidos de antimônio e de bismuto. Neste processo, a temperatura do forno é elevada a uma taxa de 100 °C/hora até o ponto de 700 °C, quando a taxa é alterada para 25 °C/hora até alcançar os 900 °C. Este aquecimento mais lento visa evitar a formação de trincas por contração. A partir dos 900 °C, a taxa de aquecimento volta a ser de 100 °C/hora até atingir valores dentro da faixa de 1150 a 1250 °C, onde permanece por 1 a 2 horas. Nesta etapa são formadas as camadas intergranulares ao redor dos grãos de ZnO. E então segue o resfriamento a uma taxa de 50 °C/hora ^[3.1].

A Figura 3.1 ^[3.1] mostra a variação de temperatura do processo típico de sinterização de um resistor não linear a óxido metálico.

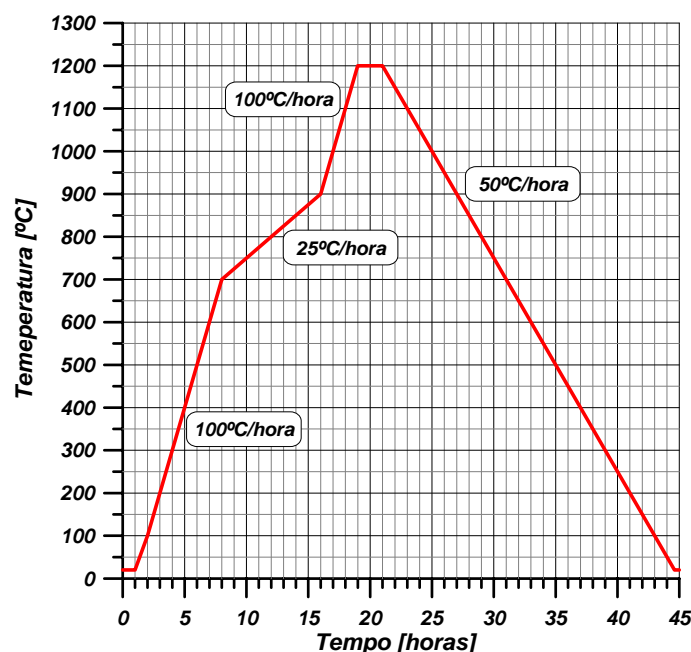


Figura 3.1 – Perfil de temperatura na sinterização de um resistor a óxido metálico

As superfícies planas do resistor são então usinadas e cobertas com um eletrodo metálico (geralmente alumínio) com espessura inferior a 0,1 mm para assegurar uma distribuição uniforme de corrente. A superfície lateral é revestida por um colar isolante para evitar a migração de oxigênio, responsável pela aceleração do envelhecimento, e prevenir a ocorrência de descargas laterais devido a correntes elevadas. O bloco cerâmico é então submetido a uma série de ensaios, depois dos quais pode estar qualificado ou não para ser utilizado nos para-raios.

As propriedades elétricas do varistor, inexistentes na matéria prima utilizada, são obtidas no processo de manufatura que, finalizado, proporciona uma estrutura como a

representada na Figura 3.2, onde as partículas condutoras (grãos de ZnO) são envolvidas na matriz semicondutora ^[3.3]:

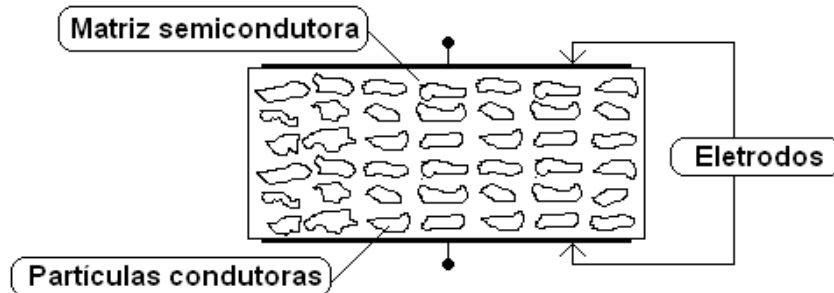


Figura 3.2 – A estrutura de um resistor a óxido metálico

3.1 – MECANISMO DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

Em um varistor a corrente circula pelos caminhos que apresentam o menor número de junções. Se a estrutura for homogênea e se o número de junções-série for grande o suficiente, a corrente se distribui uniformemente por toda a seção transversal do resistor. A perda de potência ocorre nas junções pelas quais circula corrente, porém, para o resistor como um todo, a perda de potência é uniforme.

Uma vista microscópica de um varistor é ilustrada pela Figura 3.3 ^[3.4] onde são representados dois grãos de ZnO separados por uma fina camada intergranular.

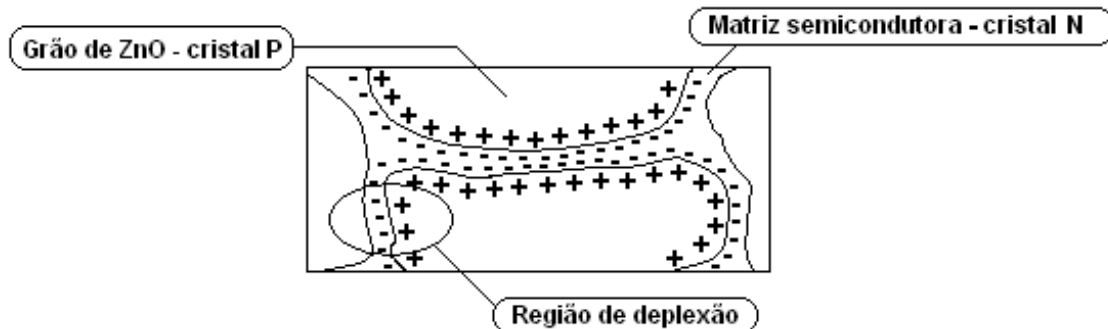


Figura 3.3 – A estrutura microscópica de um resistor a óxido metálico

A Figura 3.4 ^[3.4] mostra a analogia de um varistor com a teoria dos dispositivos semicondutores. O varistor possui elevada capacidade de condução de corrente de surto que resulta em baixas tensões durante a passagem da corrente de descarga, ao mesmo tempo em que oferece uma alta resistência à corrente subsequente fornecida pelo sistema. A conexão resultante possui uma característica tensão corrente como representado na Figura 3.5 ^[3.4], onde U_{dz1} e U_{dz2} são valores de tensão de polarização direta e reversa, respectivamente. Para estes valores o varistor passa da condição de material isolante para material condutor e a cada pequeno acréscimo no valor de tensão ocorre um elevado

acréscimo no valor da corrente. Um varistor pode ser idealizado por uma conexão série paralela de vários pequenos diodos dispersos por toda a estrutura interna da matriz semicondutora onde os valores finais U_{dz1} e U_{dz2} são de aproximadamente 3000 V.

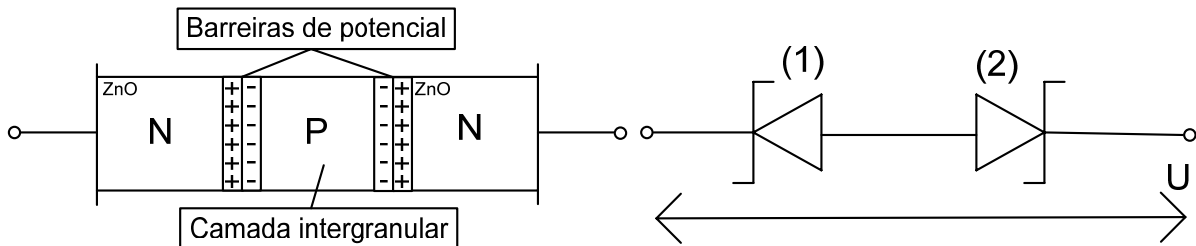


Figura 3.4 – Analogia de um resistor a óxido metálico com a teoria dos semicondutores

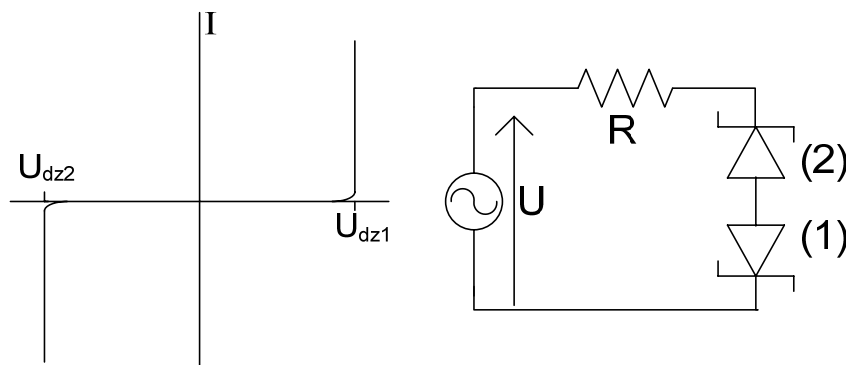


Figura 3.5 – O gráfico com o circuito dos varistores em anti-série

O modelo elétrico de cada conjunto “grão de ZnO – camada intergranular – grão de ZnO” e, conseqüentemente, de todo o varistor, pode ser macroscopicamente representado pelo circuito da Figura 3.6 [3,5].

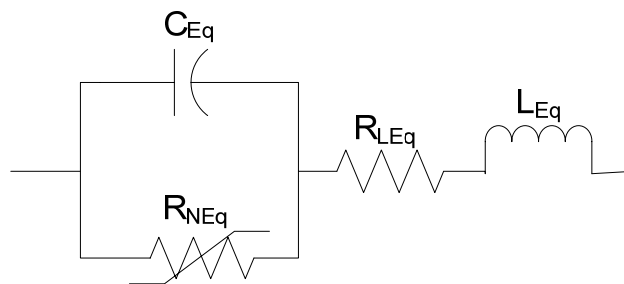


Figura 3.6 – Circuito elétrico equivalente macroscópico de um resistor a óxido metálico

Na Figura 3.6:

C_{Eq} : Capacitância equivalente da combinação série – paralelo das capacitâncias das junções, relacionadas diretamente com as regiões de depleção (micro capacitores);

R_{LEq} : Resistência linear equivalente do comportamento linear apresentado pelos grãos de ZnO e, em última análise, responsável pela elevação observada na característica tensão versus corrente para grandes densidades de corrente;

R_{NEq} : Resistência não linear equivalente do comportamento não linear oferecido pelas barreiras de potencial devido ao Efeito Schottky;

L_{Eq} : Indutância parasita (≈ 10 nH a 20 nH) desprezível frente a solicitações em frequência industrial.

A resistência não linear – R_{NEq} imposta pela barreira de potencial possui um valor elevado na região próxima à tensão de condução, onde o varistor apresenta um comportamento semelhante ao de um capacitor. A partir da tensão de condução, o valor de R_{NEq} cai abruptamente e a corrente se eleva na mesma proporção.

3.2 – CARACTERÍSTICA TENSÃO X CORRENTE DE UM VARISTOR A ÓXIDO METÁLICO

A característica *Tensão x Corrente* de um varistor é basicamente determinada pelo comportamento eletrônico das regiões de fronteira (ou de contorno) entre os grãos de ZnO e a camada intergranular rica em bismuto (Bi) e antimônio (Sb) que os envolve. A não linearidade provém da característica semicondutora tipo *N* do ZnO e tipo *P* da camada intergranular, conforme mostrado na Figura 3.4. Com este arranjo, as junções ZnO – *camada intergranular* apresentam cargas fixas, constituindo-se em regiões de depleção, as Barreiras de Schottky, responsáveis pelo comportamento não linear das junções e, conseqüentemente, dos varistores.

O comportamento não linear pode ser explicado pelo modelo tradicional de Schottky que considera uma densidade de carga interfacial constante para o qual o campo externo aplicado reduz as barreiras de potencial. No entanto, a simplicidade deste modelo resulta em uma forte dependência entre o comportamento não linear e a temperatura, fato não observado na prática. O modelo de Schottky modificado considera a possibilidade da concentração de carga interfacial que é função da tensão aplicada. Tal consideração reduz a níveis confirmados em laboratório a dependência da corrente com a temperatura.

Simplificadamente, a característica *Tensão x Corrente* de um varistor apresenta três regiões distintas, conforme a Figura 3.7 ^[3.5]:

- Região 1: alto valor ôhmico e comportamento linear para baixas correntes;
- Região 2: de transição, altamente não linear;
- Região 3: baixo valor ôhmico e comportamento linear para altas correntes.

De acordo com os mecanismos de Schottky ^[3.2], na região 1, a tensão aplicada resulta em um campo elétrico de baixa densidade incapaz de uma redução significativa nas barreiras de potencial e o MOV apresenta um comportamento típico de um resistor linear de alto valor ôhmico. Na região 2, o aumento da tensão aplicada resulta em maior campo elétrico capaz de reduzir as barreiras de potencial e o varistor passa a apresentar um

comportamento altamente não linear. Existe um limite para a redução das barreiras de potencial a partir do qual o varistor entra na região 3 onde se comporta como um resistor de baixo valor ôhmico controlado pelos cristais de ZnO.

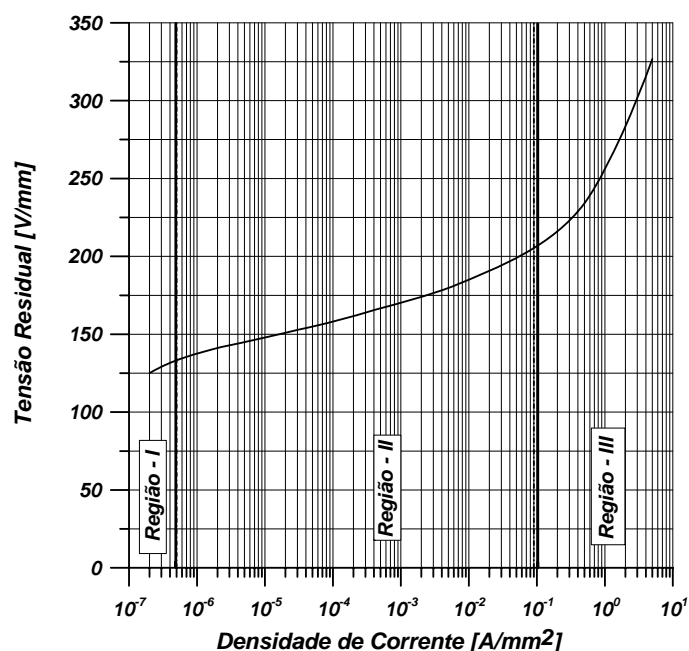


Figura 3.7 – Regiões condutoras da característica Tensão X Corrente de um resistor ZnO

A resistência não linear oferecida pela barreira de potencial é elevada para valores de tensão inferiores à tensão de condução, onde o varistor apresenta um comportamento semelhante ao de um capacitor. Para tensões próximas à nominal, a resistência fica em torno de 5 MΩ e para tensões relativas à corrente de descarga, $\leq 1\Omega$.

3.3 – MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

O comportamento não linear (região 2 da Figura 3.7) de um varistor de ZnO pode ser expresso pela Equação 3.1 [3.6]:

$$I = k_1 \times U^\alpha \quad (3.1)$$

Onde:

U : tensão aplicada ao varistor;

k_1 : constante característica do ZnO;

I : corrente conduzida pelo varistor;

α : coeficiente de não linearidade.

O valor de α depende da constituição química do bloco cerâmico, do tempo e temperatura de sinterização e do tempo de resfriamento. A resistência dos varistores varia, então, com a tensão, e apresenta um coeficiente de não linearidade da ordem de 50. Este

fato permite ao para-raios a óxido metálico apresentar apenas uma corrente de fuga ($\approx 30 \mu\text{A}$) frente a solicitações nominais do sistema, e escoar correntes de grandes amplitudes (ordem de kA) durante sobretensões atmosféricas ou de manobra [3.5].

A Equação 3.1 não deve ser utilizada indiscriminadamente para prever o comportamento de um resistor não linear, principalmente para descargas de corrente elevada, pois devido ao mecanismo de descarga de corrente, é possível a ocorrência de erros significativos.

3.4 – CARACTERÍSTICA POTÊNCIA X TEMPERATURA

Em operação normal o para-raios e, conseqüentemente o varistor, sofrem aquecimento por radiação solar e pelo consumo de potência em frequência industrial. Devido à sua característica semicondutora, uma elevação na temperatura de operação provoca a elevação da corrente de fuga e da potência consumida. Este fato resulta, a princípio, em um fenômeno cíclico com tendência à instabilidade. A relação entre *potência consumida* – *potência dissipada* e a temperatura de operação dos resistores é mostrada na Figura 3.8 [3.7].

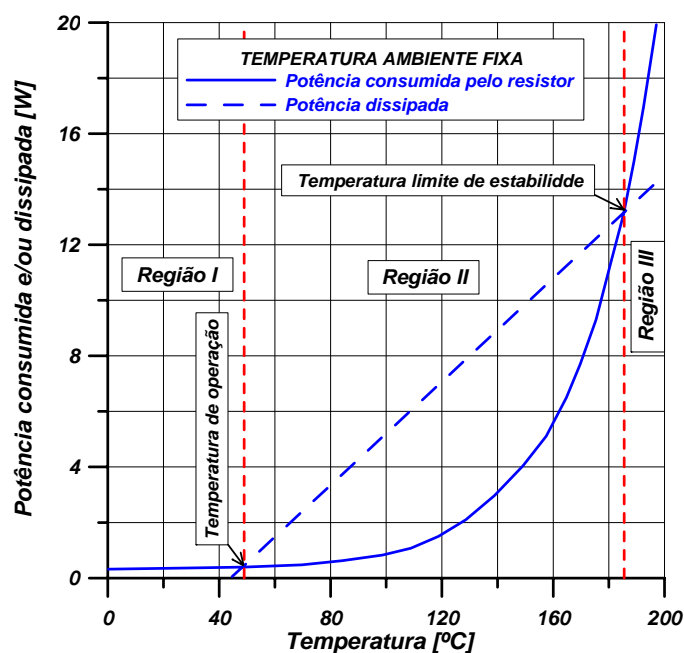


Figura 3.8 – Característica Potência Consumida versus Temperatura de um varistor

A Figura 3.8 mostra que, para uma tensão fixa, o consumo e a dissipação de potência aumentam com a elevação da temperatura do MOV. Existem 3 regiões distintas delimitadas pelas duas intersecções entre a curva da potência consumida pelos resistores e a da potência dissipada pelo invólucro. A primeira – Região I – é denominada capacidade de geração de calor do para-raios. A Região II é definida pela capacidade de dissipação de

calor do para-raios. E na Região III, como a potência consumida pelo resistor é maior que sua capacidade de dissipação sem limitação e de forma cíclica, é onde ocorre a avalanche térmica [3.7].

Teoricamente, os para-raios podem suportar elevações de temperatura devido a surtos atmosféricos e de manobra, ou a sobretensões em frequência industrial, até o seu limite de estabilidade térmica. E, portanto, a faixa de temperatura entre os pontos de operação e de limite de estabilidade térmica define a margem operativa teórica de absorção de energia de um varistor a óxido metálico (sem centelhadores série). A análise da Figura 3.8 permite definir o valor teórico de operação contínua e verificar sua adequabilidade ao valor da tensão nominal. Esta análise deve considerar o conjunto das máximas solicitações normalizadas que pode ser substituído por hipóteses operativas em frequência industrial, surtos atmosféricos e/ou de manobra.

3.5 – INVÓLUCRO DE PORCELANA

O invólucro de porcelana é uma peça cerâmica no interior do qual estão instalados os varistores. Por sua construção, o volume interno do invólucro de porcelana é superior ao volume ocupado pelos varistores, permitindo um espaço interno lateral em ar. O comprimento da parte ativa é completado até o comprimento interno do invólucro de porcelana através de espaçadores metálicos, geralmente tubos de alumínio. Em alguns casos são utilizados tubos maciços que servem como dissipadores de calor o que aumenta a capacidade de absorção de energia térmica dos para-raios.

A Figura 3.9 mostra, à esquerda, a seção de uma unidade de para-raios a ZnO com invólucro de porcelana aplicado em sistemas de alta tensão – projeto Siemens; a coluna de varistores acompanhada do suporte de construção compõe a parte ativa do para-raios [3.9]. E à direita, um para-raios real a óxido de zinco com invólucro de porcelana.

A pilha de varistores é mecanicamente fixada dentro do invólucro através das hastes em plásticos reforçados por fibra de vidro – FRP – e centralizada pelos anéis de centralização feitas do mesmo material. No sentido longitudinal, a pilha é fixa por uma mola de compressão que também serve para manter o contato com os terminais do para-raios e dos resistores entre si [3.9].

Estudos realizados por fabricantes, concessionárias de energia e laboratórios de pesquisa apontam a perda de estanqueidade como a responsável por 80% a 90% das falhas nos para-raios de distribuição. A falha de vedação nas gaxetas superiores ou inferiores permite a entrada de ar úmido e/ou poluído, que altera as características elétricas dos varistores. Tais alterações conduzem o para-raios à falha total ou degradação parcial.

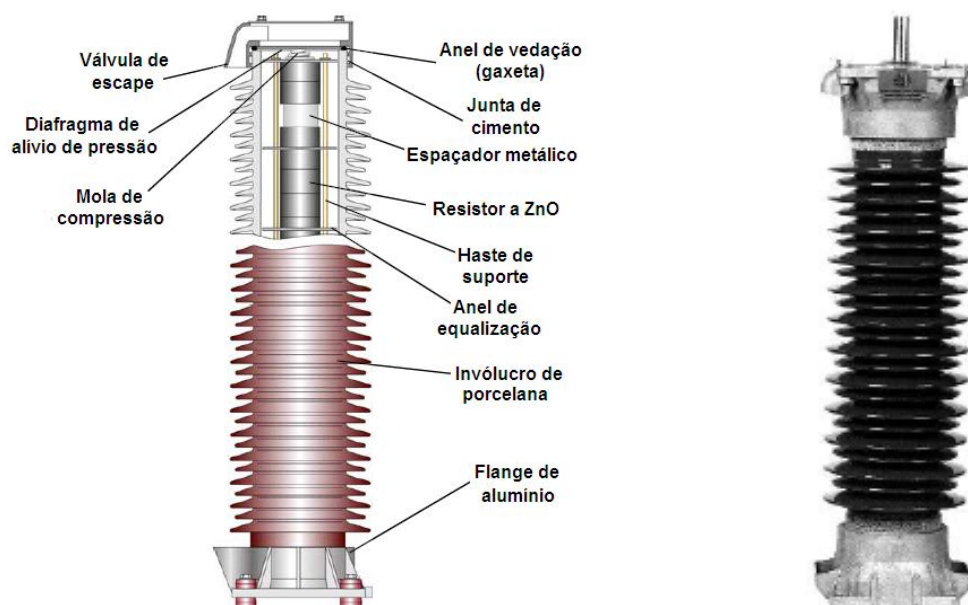


Figura 3.9 – Para-raios de porcelana: Desenho em corte de um projeto Siemens AG, e foto de um para-raios real com invólucro de porcelana

Em caso de falha, é estabelecida uma corrente em frequência industrial capaz de estabelecer um arco interno que produz gases. Estes gases ionizados causam uma rápida elevação da pressão interna que tende a provocar a fragmentação do invólucro ou a explosão do para-raios que não possua um dispositivo de alívio de alta pressão.

Nos para-raios que possuem o dispositivo de alívio de pressão, a sobre-pressão interna causa a abertura do diafragma de vedação e os gases escapam pelos dutos de ventilação nas duas extremidades que são geralmente direcionados um contra o outro. O resultado então é um arco externo e um alívio de pressão evitando a fragmentação e/ou a explosão do invólucro.

A perda de estanqueidade em para-raios com invólucro de porcelana pode ocorrer por danificação das gaxetas de vedação durante o fechamento, pelo próprio envelhecimento, por trincas ou fissuras na porcelana ou na cimentação. Estudos apontam que as falhas de projeto correspondem a 53% das falhas por perda de vedação nos para-raios em porcelana, e o envelhecimento das gaxetas, a 18% [3,27].

A contaminação externa do invólucro pode gerar ionização interna causando a degradação do para-raios. Investigações em campo e em laboratórios têm mostrado que qualquer variação de tensão ao longo da porcelana, devido a chuva, fumaça ou poluição é capaz de gerar descargas internas que produzem alterações químicas irreversíveis no gás de enchimento. A criação destes novos gases gerados por descargas parciais acarretam o envelhecimento acelerado dos resistores não lineares.

O efeito da contaminação externa é mais crítico em para-raios formados por mais de uma seção, onde a corrente de fuga externa pelo invólucro da seção superior pode

ser transferida para a parte interna da seção inferior por acoplamento galvânico com os flanges metálicos. Este fato aumenta o componente resistivo da corrente de fuga e as perdas através dos varistores a ZnO .

3.6 – INVÓLUCRO POLIMÉRICO

Uma evolução tecnológica significativa para os para-raios de ZnO sem centelhadores surgiu em meados da década de 80, com o desenvolvimento de materiais poliméricos. A primeira concepção do invólucro polimérico foi basicamente a substituição da porcelana pelo polímero. Posteriormente surgiram outras concepções de instalação do invólucro e de sustentação mecânica da parte ativa, principalmente para distribuição.

Problemas como a perda de estanqueidade e fragmentação com ou sem explosão vem sendo reduzidos com a utilização de invólucros poliméricos, os quais, em relação aos invólucros de porcelana, ainda apresentam redução de perdas por correntes de fuga através do invólucro, principalmente em ambientes de umidade elevada; peso em torno de 50% menor; quando possuem volume reduzido de gases internos não necessitam de sistemas de alívio de pressão; possuindo melhor capacidade de dissipação de calor; e melhor desempenho sob contaminação.

A Figura 3.10 mostra os três diferentes projetos de para-raios com invólucro polimérico ^[3.8]. O projeto A é o de tubo polimérico, similar aos para-raios com invólucro em porcelana. O projeto B é o para-raios moldado, e o projeto C é o para-raios injetado.

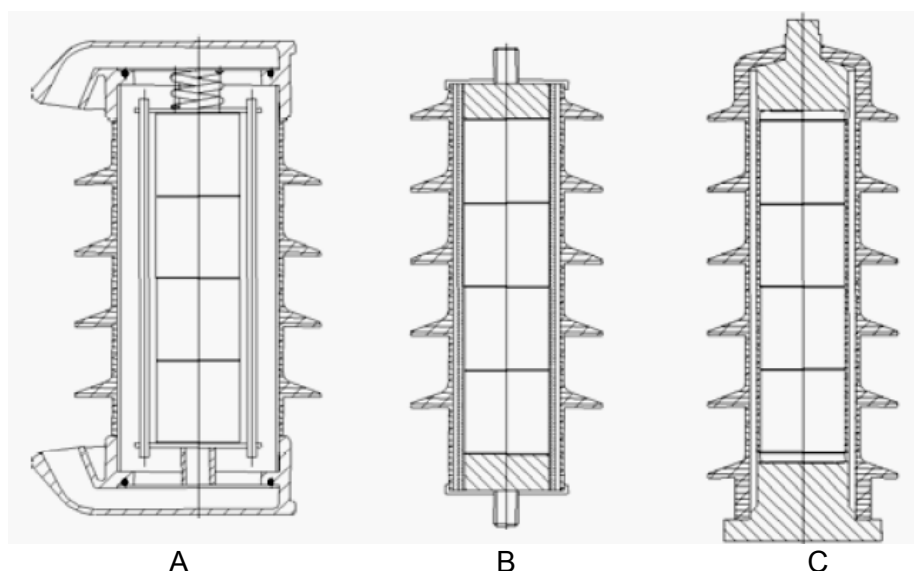


Figura 3.10 – Principais projetos de para-raios com invólucro polimérico

No para-raios moldado a parte ativa é fabricada em separado e posteriormente inserida no invólucro isolante moldado por meio de pressão ou deslizamento. Os materiais são presos apenas mecanicamente um ao outro. A interface do encapsulamento e a face

interna do invólucro é geralmente preenchida por fluido de silicone. Neste caso o sistema de vedação utiliza tampas terminais.

No projeto da Figura 3.10.C o material polimérico é diretamente moldado em suas partes internas, ou seja, nos resistores e na estrutura mecânica. Uma resina é utilizada para assegurar a aderência química dos diferentes materiais com silicone. Esta concepção dispensa o uso de tampas terminais e reduz a probabilidade da existência de espaços de ar que proporcionam o surgimento de descargas parciais.

3.6.1 – PARA-RAIOS DE TUBO POLIMÉRICO

Basicamente, este projeto apenas substituiu o corpo de porcelana pelo polimérico como pode ser observado na Figura 3.11 [3.9]. É utilizado principalmente em sistemas de alta e extra alta tensão onde é requerido um desempenho mecânico superior aos dos sistemas de distribuição. A rigidez mecânica da parte ativa é proporcionada por varetas de plástico reforçado com fibra de vidro (FRP) presas aos flanges terminais que mantém fixa a pilha de resistores.

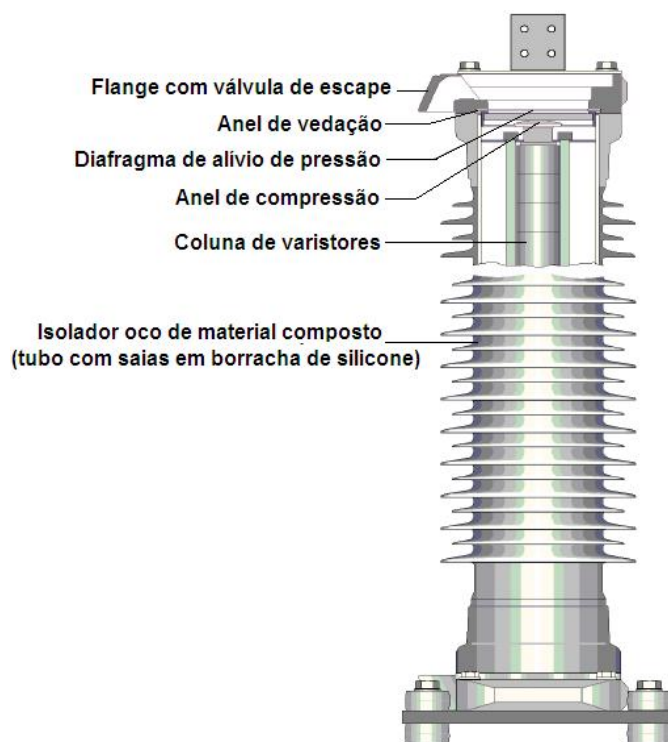


Figura 3.11 – Desenho em corte de um para-raios com invólucro de tubo polimérico

3.6.2 – PARA-RAIOS MOLDADO E INJETADO

Dependendo do projeto, o invólucro é vestido na parte ativa ou moldado diretamente na parte ativa. Nestes dois ainda existem dois projetos diferentes conforme viabilidades mecânicas e econômicas. Estes são denominados Polimérico Encapado e Polimérico tipo Gaiola [3.10].

PARA-RAIOS POLIMÉRICO ENCAPADO ^[3.10]

O para-raios polimérico encapado, conforme Figura 3.12 ^[3.10] utiliza uma capa em fibra de vidro impregnada em resina epóxi que envolve a pilha de varistores, incluindo os terminais metálicos. Após a polimerização da resina epóxi, o material do invólucro que forma as saias e a isolamento é moldado diretamente sobre a capa.

A capa em plástico reforçado por fibra de vidro forma um encapsulamento mecanicamente estável em torno dos varistores. Em caso de uma sobre solicitação ou curto-circuito, a pressão gerada pelo arco dentro do invólucro é limitada pela sua resistência mecânica. Se a espessura da capa for muito grande, podem ser gerados altos valores de pressão, levando o invólucro a explosão e violentas emissões de estilhaços. Desta forma, a espessura da capa deve ser balanceada entre o comportamento seguro de alívio de pressão e a resistência mecânica.

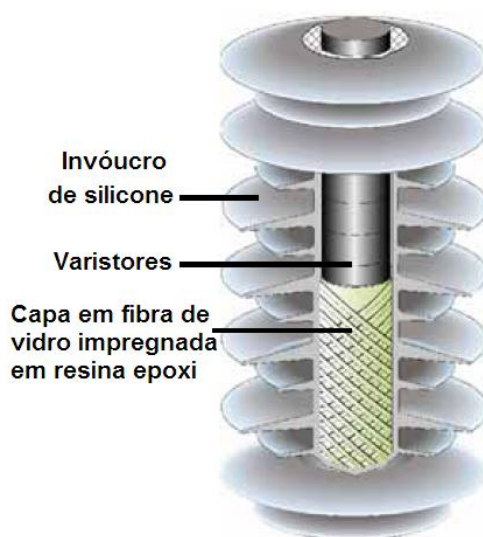


Figura 3.12 – Desenho em corte do projeto de um para-raios polimérico encapado

A simplicidade deste projeto permite a manufatura a um custo particularmente viável para sistemas de média tensão, onde os custos são decisivos e a confiabilidade não é tão representativa comparada com sistemas de alta tensão. Possuem, no entanto, resistência mecânica menor que os projetos tubo polimérico e tipo gaiola.

PARA-RAIOS POLIMÉRICO TIPO GAIOLA ^[3.10]

Ao invés de utilizar o suporte mecânico de uma camada de FRP para acomodar a pilha, os próprios varistores podem ser utilizados como parte do suporte mecânico. Isto é obtido prendendo-os entre os terminais utilizando uma gaiola de hastes em FRP, o que dá nome ao projeto. A isolamento em borracha de silicone é então moldada diretamente sobre os varistores sem deixar qualquer volume de gás interno.

Este projeto pode ser utilizado tanto em média quanto em alta tensão. A Figura 3.13 ^[3.10] mostra o para-raios tipo gaiola projeto Siemens ^[3.10]. Devido ao contato direto com o material polimérico, o calor produzido pelos varistores é dissipado mais facilmente comparado com o projeto de tubo polimérico. Este fato aumenta a estabilidade térmica. A Figura 3.14 ^[3.11] mostra os projetos mecânicos básicos de para-raios tipo gaiola da ABB.

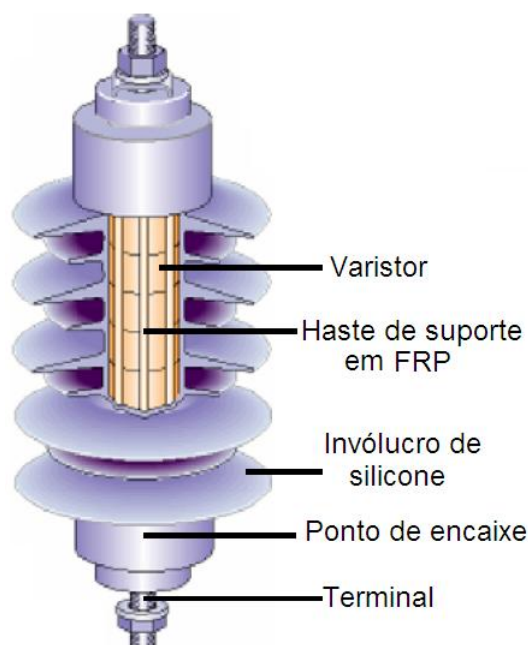


Figura 3.13 – Desenhos em corte do projeto de um para-raios polimérico tipo gaiola

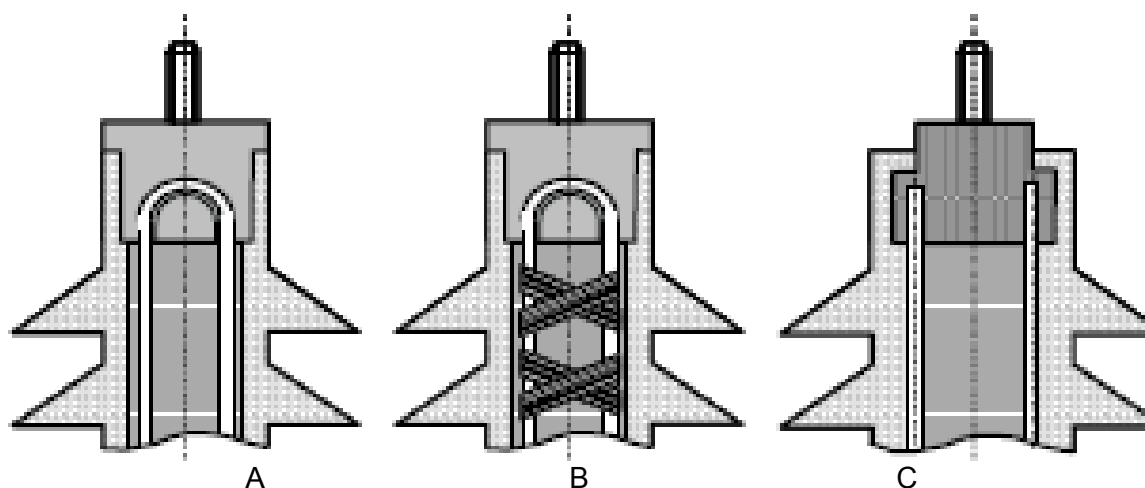


Figura 3.14 – Para-raios poliméricos tipo gaiola – Projeto ABB

O modelo A é projetado com laços fixados em suportes nas flanges terminais. Este projeto foi primeiro introduzido em para-raios de distribuição e estendido para alta tensão. O projeto B utiliza amarração adicional do material polimérico para fornecer as características mecânicas de curto-circuito para a aplicação em alta tensão e extra alta tensão. O projeto C da Figura 3.14 também foi inicialmente aplicado em para-raios de distribuição e depois desenvolvido para alta tensão.

3.7 – O DESLIGADOR AUTOMÁTICO – PARA-RAIOS DE DISTRIBUIÇÃO

É constituído de um elemento resistivo colocado em série com uma cápsula explosiva protegida por um corpo de baquelite. É projetado para não operar com a passagem das correntes de descarga nominais. Sua função é desligar o para-raios defeituoso da rede através da sua auto-exploração. Adicionalmente serve como indicador visual de defeito do próprio para-raios. Alguns para-raios não possuem o desligador automático, nos quais a falha nos blocos cerâmicos leva o sistema à condição de curto-circuito monopolar cuja identificação a olho nu é praticamente impossível [3.6].

3.8 – PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS [3.6]

Os principais parâmetros característicos de um para-raios a óxido metálico são:

TENSÃO DE REFERÊNCIA

É o valor de pico de tensão a partir do qual, o componente resistivo da corrente de fuga passa a aumentar consideravelmente com pequenos aumentos de tensão – limiar da não linearidade. É aplicada somente a para-raios de ZnO sem centelhadores e define o ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de elevada não linearidade. É utilizada como parâmetro na especificação das características de operação destes para-raios. Sua leitura é utilizada na seleção de corpos de prova utilizados nos ensaios de ciclo de operação, característica “Tensão de frequência fundamental X Tempo” e corrente suportável de longa duração.

CORRENTE DE REFERÊNCIA

É o valor de crista (em caso de assimetria, o maior valor entre as duas polaridades) do componente resistivo da corrente de fuga em frequência industrial utilizada para determinar a tensão de referência do para-raios. Valores típicos de amplitude são compreendidos entre 1 mA e 20 mA.

TENSÃO NOMINAL

É o valor de tensão em frequência industrial para o qual o para-raios é projetado. A tensão nominal é utilizada como um parâmetro de referência para a especificação das características de proteção e de operação do para-raios. Geralmente é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, o qual apenas é permitido ultrapassar sob as condições explicitamente estabelecidas pelo fabricante.

Em para-raios com centelhadores a tensão nominal é definida como a máxima tensão eficaz de frequência fundamental que pode ser aplicada continuamente entre os terminais de um para-raios e para o qual ele deve operar corretamente sem modificar suas características. Este valor de tensão é utilizado no ensaio de ciclo de operação.

Em para-raios sem centelhadores, é o valor de tensão eficaz em frequência fundamental para o qual o para-raios é projetado para operar corretamente e manter a sua estabilidade térmica sob condições de sobretensão temporária durante 10 segundos, após a absorção de uma energia prévia, conforme estabelecido no ensaio de ciclo de operação. Geralmente é o valor eficaz da tensão de referência e maior que a máxima tensão de operação contínua.

MÁXIMA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA – MCOV

É o valor máximo permissível de tensão na frequência industrial que pode ser continuamente aplicado entre os terminais do para-raios, sem provocar degradação ou alteração de suas características operacionais.

Em outras palavras pode ser definido como o maior valor de tensão em frequência industrial que, aplicado ao para-raios resulta em um comportamento termicamente estável após um ensaio de ciclo de serviço padrão. Esta é uma grandeza inerente ao projeto do para-raios e não deve ser confundida com a “Máxima tensão de operação contínua do sistema”.

De modo geral os para-raios a óxido metálico podem operar sob tensões maiores que sua MCOV desde que não seja em caráter permanente. Nestes casos, a capacidade de absorção de energia destes para-raios apresenta limites inferiores aos normais, tornando-os mais vulneráveis a descargas de corrente atmosférica ou de manobra.

FREQÜÊNCIA NOMINAL

Frequência para qual o para-raios foi projetado.

CORRENTE DE DESCARGA NOMINAL

Corrente que circula pelo para-raios quando atua frente a um surto, aplicada em ensaio; seu valor de crista na de onda 8/20 μ s é utilizada para classificar o para-raios. Em para-raios com centelhadores, é utilizada para iniciar a corrente subsequente no ensaio de ciclo de operação.

CORRENTE DE DESCARGA

Consiste na corrente de impulso que flui através do para-raios, caracterizada pela forma de onda, amplitude e polaridade.

CARACTERÍSTICA TENSÃO RESIDUAL X CORRENTE DE DESCARGA

Curva que relaciona os valores de pico da tensão residual com valores de pico da corrente de descarga.

CLASSE DE DESCARGA

Indicativa da capacidade do para-raios de escoar correntes de carga de linhas

de transmissão, ou seja, da capacidade de absorção de energia do para-raios.

TENSÃO RESIDUAL

Tensão que aparece nos terminais do para-raios quando este conduz a corrente de descarga nominal. Sua amplitude depende de dois fatores:

- Forma de impulso (taxa de crescimento da corrente);
- Amplitude da corrente de descarga.

Em para-raios com centelhadores a tensão residual consiste na tensão total aplicada aos seus terminais após a descarga disruptiva dos centelhadores. Em para-raios sem centelhadores, este parâmetro define suas características de proteção. Neste caso são utilizados os valores de tensão residual frente a impulso de frente íngreme, atmosféricos e de manobra.

CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA ^[3.5]

Este parâmetro já comentado no item anterior é geralmente declarado pelos fabricantes na forma de kV/kJ (nominal ou MCOV) e está associado a um impulso de corrente com forma de onda e amplitude definidas.

ESTABILIDADE TÉRMICA DO PARA-RAIOS

Um para-raios é considerado termicamente estável se após o ensaio de ciclo de operação, a temperatura resultante nos resistores não lineares que compõem o para-raios decresce com o tempo, quando o para-raios é energizado na MCOV.

3.9 – PROJETOS DE PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

O projeto dos para-raios – que são constituídos por um ou mais varistores e geralmente não apresentam centelhadores – deve permitir o equilíbrio entre a capacidade de absorção de energia dos resistores e a capacidade de dissipação do invólucro.

3.9.1 – PROJETO ELETRO-MECÂNICO DE UM PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

As dimensões básicas de um varistor, diâmetro e altura são relacionadas às solicitações de tensão em frequência industrial e aos níveis de proteção do para-raios. Dentro deste contexto, os valores das tensões nominal, de operação contínua, e residual para impulsos de manobra e atmosféricos são determinados iterativamente de acordo com a classe de tensão e de corrente de descarga nominal do para-raios.

O ponto de partida para o projeto de um resistor não linear ou de um para-raios é a tensão de referência que, aplicada a um resistor faz circular a corrente de referência predominantemente resistiva. A escolha destes valores é um processo iterativo que deve considerar os limites de absorção de energia, em específico sob condições de tensão em

frequência industrial de baixa amplitude e de estabilidade térmica [3.5].

Considerando, em alguns casos, o processo iterativo de análise térmica do conjunto resistores e invólucro em regime permanente, uma primeira aproximação das dimensões básicas de um varistor é calculada pelas Equações 3.2 e 3.3 [3.7]:

$$H_R = \frac{1000.K_u \cdot \sqrt{2}.U_N}{U_{ref}} \text{ valores em p.u.} \quad (3.2)$$

$$\phi_R = \sqrt{\frac{4000.I_{DN}}{\pi \left(\frac{I_{U_R}}{H_R} \right)}} \quad (3.3)$$

Onde:

H_R : Altura do resistor não linear a óxido metálico [mm/cm];

ϕ_R : Diâmetro do resistor [mm/cm];

K_u : Relação entre a tensão de referência e o pico da tensão nominal;

U_N : Tensão nominal do resistor (geralmente 3 kV);

U_{ref} : Tensão de referência [pu];

I_{DN} : corrente de descarga nominal do resistor;

$\frac{I_{U_R}}{H_R}$: Corrente normalizada para o quociente entre tensão residual e altura do

resistor.

A partir as dimensões básicas do resistor sinterizado é realizada a conversão das características *Tensão x Corrente* para as várias temperaturas de ensaio, e para as dimensões padrão obtidas para o resistor protótipo. Nas fases iterativas de definição destes projetos é usual adotar relações matemáticas diretas.

As dimensões do projeto final determinam os valores da corrente de fuga – em específico do componente resistivo – e, conseqüentemente, da potência consumida, dos valores das temperaturas de operação e de estabilidade do sistema resistores-invólucro. Estes valores estão relacionados com as margens teóricas de absorção de energia e com a amplitude de operação contínua do para-raios [3.6].

3.9.2 – PROJETO TÉRMICO DE UM PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Em para-raios sem centelhadores, os varistores são os elementos responsáveis pelo controle da corrente de fuga que gera consumo de potência. Este consumo, somado à radiação solar causam um aquecimento no para-raios em operação normal. Ao escoar correntes de descarga, o conjunto sofre um aquecimento elevado, após o qual dever ser capaz de se resfriar. O projeto de um para-raios deve então considerar o comportamento térmico do sistema formado pelos resistores, invólucro e meio ambiente [3.7 a 3.12].

MODELO TÉRMICO PARA RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO

As características “*Tensão x Componente resistivo da corrente de fuga*” são determinadas para várias temperaturas de operação dos resistores e a partir destes dados são calculados os valores de potência consumida. Em geral estes dados são apresentados de forma gráfica, e o algoritmo utilizado deve contemplar as seguintes iterações:

- 1) Representação das características tensão aplicada versus componente ativo da corrente de fuga;
- 2) Cálculo da forma e valores instantâneos do componente ativo da corrente de fuga para uma tensão senoidal e para as várias temperaturas de operação;
- 3) Para cada corrente obtida no passo anterior, determinar o espectro harmônico, por transformada de Fourier, por exemplo;
- 4) Cálculo da potência consumida pelo resistor, para cada forma de corrente obtida no passo anterior.

Na maioria das aplicações, a tensão em frequência industrial aplicada ao para-raios pode ser considerada constante dentro de certos limites, pois em operação, a tensão é fornecida pelo sistema que é “visto” pelo para-raios como um barramento infinito. Considerando que a temperatura dos varistores é função, entre outros, da absorção prévia de surtos atmosféricos ou de manobra, é usual utilizar a relação “*Tensão Aplicada X Componente Resistivo da Corrente de Fuga*” no levantamento da relação entre a potência consumida e a temperatura de operação para diversos valores aplicados em p.u. da tensão de referência ^[3.13 a 3.16].

MODELOS TÉRMICOS PARA OS INVÓLUCROS DOS PARA-RAIOS

O modelo matemático do comportamento térmico do para-raios completo pode ser resumido pelo modelo do invólucro que representa o conjunto onde os resistores são a fonte de calor. Em geral, as primeiras etapas do projeto de um para-raios sem centelhadores contemplam modelos térmicos de características estáticas que definem as temperaturas de operação e a estabilidade dos resistores. Nas etapas seguintes são estudadas as condições dinâmicas que envolvem transitórios de aquecimento e resfriamento ^[3.7 - 3.13 - 3.16].

Normalmente, os estudos do comportamento térmico de um para-raios utilizam um modelo baseado na analogia termo-elétrica como na Figura 3.15, ou seja, entre:

- Temperatura e tensão;
- Fluxo de calor e corrente;
- Capacidade térmica e capacitância;
- Resistência térmica e resistência elétrica.

A partir da analogia termo-elétrica mostrada na Figura 3.15 é construído um circuito elétrico equivalente ao modelo térmico do invólucro e, conseqüentemente, do para-

raios, para representar as operações em regime transitório e permanente [3.17]. Em regime permanente as temperaturas do invólucro e do para-raios são estáveis. Logo, o efeito do componente capacitivo das correntes não precisa ser representado, e o circuito pode ser reduzido à sua parte resistiva.

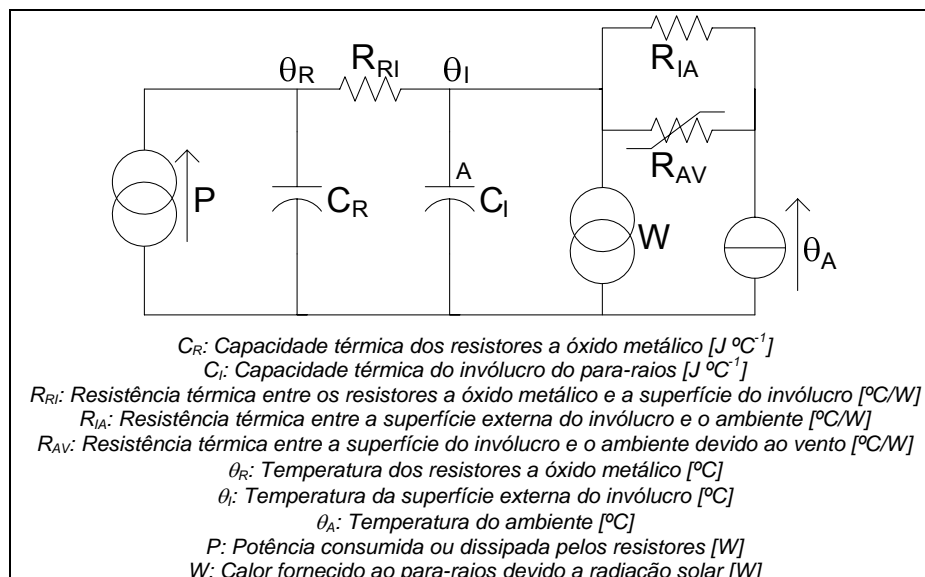


Figura 3.15 – Analogia termoeletrica do invólucro de um para-raios a óxido metálico

A Figura 3.16 [3.17] detalha os tipos dos para-raios cobertos por este estudo e comumente comercializados no mercado nacional.

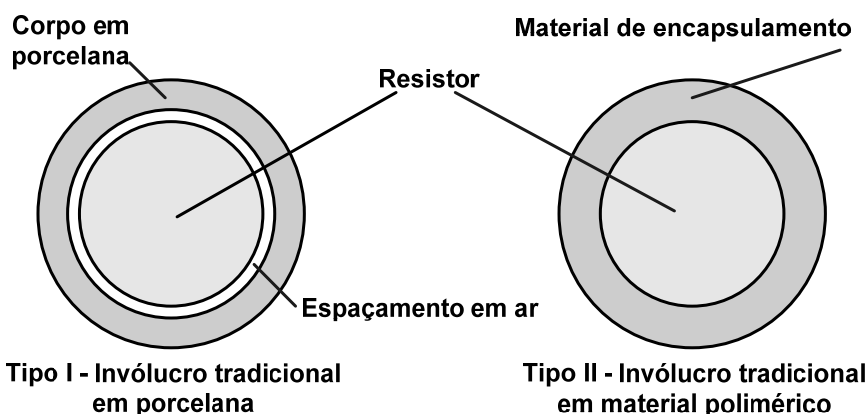


Figura 3.16 – Projetos de invólucros de para-raios a óxido metálico segundo a Ontario Hydro

As características do invólucro e dos varistores a serem consideradas são as seguintes [3.12]:

- H_R : Altura do resistor;
- ϕ_R : Diâmetro do resistor;
- ϕ_{II} : Diâmetro interno médio do invólucro;
- ϕ_{EI} : Diâmetro externo médio do invólucro;
- ϕ_{Max} : Diâmetro máximo do invólucro;

$$\varphi = \frac{\text{Comprimento do contorno da saia do invólucro}}{\text{Distância entre as saias do invólucro}}$$

Os parâmetros relativos ao circuito elétrico equivalente térmico do para-raios são determinados a partir da análise das transferências de calor que ocorrem por radiação, condução e por convecção natural e forçada, conforme Equações 3.4 a 3.11.

Transferência de Calor por Radiação

Este fenômeno ocorre em para-raios com invólucro tipo I, entre os resistores não lineares e o invólucro, e entre a superfície externa do invólucro e o meio. A transferência de calor por radiação é normalmente equacionada pela *Lei de Stefan-Boltzman* como nas Equações 3.4 e 3.5 [3.5]:

$$R_{RRi} = \frac{\theta_R - \theta_{ii}}{\varepsilon_{Ri} \cdot k \cdot (\theta_R - \theta_{ii}) \pi \cdot D_R \cdot H_R} \quad (3.4)$$

Onde:

R_{RRi} : Resistência térmica por radiação entre resistores e invólucro;

k : Constante de Boltzman ($5,72 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$);

θ_R : Temperatura do resistor [K];

θ_{ii} : Temperatura da superfície interna do invólucro [K];

D_R : Diâmetro do resistor [cm];

H_R : Altura do resistor [cm];

ε_{Ri} : Emissividade equivalente entre os resistores e invólucro segundo:

$$\varepsilon_{RI} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - \frac{1}{\varepsilon_R} - 1} \quad \begin{array}{l} \varepsilon_i: \text{Emissividade do material do invólucro} - 0,95 \\ \varepsilon_R: \text{Emissividade do material dos resistores} - 0,90 \end{array}$$

$$R_{RIA} = \frac{\theta_i - \theta_A}{\varepsilon_i \cdot (\theta_i^4 - \theta_A^4) \pi \cdot D_{\max} \cdot H_R} \quad (3.5)$$

Onde:

R_{RIA} : Resistência térmica por radiação entre o invólucro e o ambiente;

θ_A : Temperatura ambiente [°K];

θ_i : Temperatura da superfície externa do invólucro [°K];

D_{\max} : Diâmetro máximo do invólucro [cm].

Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução está relacionada à condutividade térmica dos materiais em questão. Este fenômeno, observado principalmente em para-raios com

invólucro do tipo II, ocorre entre a superfície lateral dos varistores e a superfície interna do invólucro. Pode ser expressa pela Equação 3.6 [3.5]:

$$R_{CRI} = \frac{\ln\left(\frac{D_{Ei}}{D_{ii}}\right)}{2\pi\lambda_i H} \quad (3.6)$$

Onde:

R_{CRI} : Resistência térmica de condução através do material do invólucro;

λ_i : Condutividade térmica do material do invólucro [W.cm/°K];

D_{Ei} : Diâmetro externo médio do invólucro [cm].

D_{ii} : Diâmetro interno médio do invólucro [cm].

Para facilitar cálculos, é usual assumir a condutividade térmica como um valor constante na faixa de temperatura de operação do para-raios, são raros casos em que é possível incluir nos cálculos a variação da condutividade térmica em função da temperatura.

A Tabela 3.1 [3.12] mostra a condutividade térmica do ar e de alguns materiais mais utilizados na manufatura de invólucros de para-raios de média e alta tensão.

Tabela 3.1 – Condutividade Térmica de Materiais utilizados nos invólucros de para-raios

Material / Símbolo	Condutividade térmica a 20 °C [Wcm/°K]
Ar / λ_A	0,00026
Porcelana / λ_P	0,01000
EPR / λ_{EPR}	0,00267
Borracha de silicone / λ_S	0,00250
Epoxy – sílica / λ_{ES}	0,00740
Epoxy – Alumina / λ_{EA}	0,01400

Transferência de Calor por Convecção Natural

Este fenômeno depende basicamente dos parâmetros do meio de transporte que, neste caso é o ar. Em para-raios ocorre entre os resistores e o invólucro, e entre o invólucro e o ambiente. É usual assumir certas simplificações que resultam na tradicional Equação de Fluxo de Calor por Convecção mostrada na Equação 3.7 [3.6].

$$Q_{CV} = 2,3 \times 10^{-4} (\Delta\theta)^{0,25} \quad (3.7)$$

Onde:

Q_{CV} : Fluxo de calor por convecção [W/°C.cm²];

$\Delta\theta$: Gradiente de temperatura.

A resistência térmica por convecção natural entre os resistores e a superfície interna do invólucro do tipo 1 é dada pela Equação 3.8 [3.7], e entre o ambiente e a superfície externa do invólucro por 3.9 [3.7]:

$$R_{RICN} = \frac{1}{2,3 \times 10^{-4} (\theta_R - \theta_{ii})^{0,25} \pi \cdot D_R \cdot H_R} \quad (3.8)$$

$$R_{RIACN} = \frac{1}{2,3 \times 10^{-4} (\theta_i - \theta_A)^{0,25} \pi \cdot D_{Ei} \cdot H_R \cdot \varphi} \quad (3.9)$$

Onde:

R_{RICN} : resistência por convecção natural entre os resistores e a superfície interna do invólucro;

R_{RIACN} : resistência por convecção natural entre o ambiente e a superfície externa do invólucro.

Transferência de Calor por Convecção Forçada

A transferência de calor por convecção forçada resulta da circulação de vento pela superfície do invólucro. O fluxo de calor, neste caso é função do *Número de Reynolds* – Re , que varia com a velocidade do vento, conforme Equação 3.10 [3.5]:

$$Re = 14,6 \cdot D_{Ei} \cdot V_V \quad (3.10)$$

Onde:

V_V : Velocidade do vento [Km/h];

D_{Ei} : Transferência de calor por convecção forçada.

Deve também ser considerada a diferença de temperatura entre a superfície externa do invólucro e o meio ambiente na determinação da referida resistência térmica, conforme a Equação 3.11 [3.5]:

$$RIACF = \frac{1}{\lambda_A \cdot C \cdot (R_e)^P \cdot \pi \cdot D_{Ei} \cdot H_R \cdot \varphi} \quad (3.11)$$

Onde:

$RIACF$: Resistência térmica devido à convecção forçada entre a superfície externa do invólucro e o meio ambiente;

C e P : Constantes empíricas para cilindros verticais de paredes lisas tais que:

* $100 < Re < 5000$: $C = 0,55$ e $P = 0,485$;

* $5000 < Re < 50.000$: $C = 0,13$ e $P = 0,65$.

Cálculo das Resistências Térmicas Totais

As resistências térmicas totais entre resistores e invólucro, e entre invólucro e ambiente podem ser obtidas pela resolução de circuitos resistivos. Estas variáveis definem o comportamento térmico do para-raios em regime permanente, e a resolução de tais Equações consideram a dependência da convecção e radiação em relação à temperatura.

Usualmente, resolvem-se as Equações 3.4 a 3.11 iterativamente para uma potência fixa consumida pelos resistores, o que resulta em resistências dependentes da temperatura. Este fato é contornado assumindo uma distribuição de temperatura interna do para-raios, o que tem apresentado resultados próximos aos verificados nos ensaios com modelos reduzidos.

Determinação Analítica das Capacidades Térmicas

O circuito elétrico equivalente ao modelo térmico de um para-raios trabalha com os valores das capacidades térmicas de seus componentes, ou seja, a capacidade de armazenamento de calor dos resistores e do invólucro. A capacidade térmica é uma propriedade física particular a cada material relacionada ao seu calor específico que pode ser determinado experimentalmente e expresso pela Equação 3.12 ^[3.5]:

$$C_T = V_C (C_0 + \alpha_C \cdot \theta) \quad (3.12)$$

Onde:

C_T : Capacidade térmica dos componentes do para-raios [$J/^\circ C$];

V_C : Volume do componente [cm^3];

θ : Temperatura do componente [$^\circ C$];

C_0 : Calor específico [$J/cm^3 \ ^\circ C$] a $20^\circ C$;

α_C : Coeficiente de temperatura [$J/cm^3 \ ^\circ C$].

A Tabela 3.2 ^[3.12] mostra o calor específico dos principais materiais utilizados em um para-raios a óxido metálico.

Tabela 3.2 – Capacidade térmica de materiais utilizados na construção de para-raios

Material	Calor específico C_0 [J/cm^3] a $20^\circ C$	Coeficiente de temperatura α_C [$J/cm^3 \ ^\circ C$]
Resistor – ZnO	2,59	0,0044
Porcelana	1,58	0,0027
Epoxy – Sílica	1,21	0,0049
EPR – cor cinza	1,32	0,0020
EPR – cor preta	1,55	0,0037

3.9.3 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO

A capacidade de absorção de energia de um varistor é determinada por um conjunto de parâmetros elétricos, térmicos e mecânicos. Desta forma, todo e qualquer fenômeno que resulte em concentração de campo elétrico ou de corrente de descarga resulta na redução desta capacidade em relação a um valor teórico ^[3.6].

Os fenômenos elétricos e os conseqüentes térmicos e mecânicos são geralmente relacionados com o posicionamento dos eletrodos metálicos dos resistores (principalmente nos projetos mais antigos). Este detalhe pode causar elevados campos elétricos durante a condução de correntes com grandes amplitudes e elevadas taxas de crescimento, que são típicas de descargas atmosféricas. Estes fenômenos são geralmente relacionados à concentração de corrente elétrica de intensidade compatível com surtos de manobra e sobretensões em freqüência industrial, fluindo em regiões de resistividade reduzida, os *Hot Spots*.

Em qualquer destes casos, o transitório elétrico é acompanhado por um transitório térmico-mecânico que pode resultar na falha dos resistores por:

- Fragmentação periférica devido a impulso atmosférico;
- Fragmentação interna causada por impulsos de manobra;
- Perfuração frente a solicitações em freqüência industrial.

A concentração de campo elétrico na periferia dos eletrodos tende a canalizar a corrente de descarga em regiões de pequena área (e conseqüentemente, pequeno volume) resultando em processos térmicos que provocam a destruição dos resistores, inicialmente, por pequenas perfurações e subseqüente fragmentação periférica.

A máxima capacidade de absorção de energia de um resistor a óxido metálico uniforme sem defeitos pontuais é determinada pelas suas características mecânicas conforme a Equação 3.13 onde são considerados os efeitos de concentração de campo elétrico devido à presença de eletrodos ^[3.5].

$$qR = \frac{\sigma F(1 - \nu)\rho c}{E\alpha l} \quad (3.13)$$

Onde:

qR : energia injetada no resistor por unidade de volume [J/m^3];

σF : tensão média mínima de ruptura frente a flexão [N/m^2];

ν : Coeficiente de Poisson;

ρ : densidade do resistor;

c : capacidade térmica [$J/kg^\circ C$];

E : módulo de elasticidade [N/m^2];

αl : coeficiente térmico de expansão linear [$^\circ C^{-1}$].

As solicitações térmicas devido a correntes impulsivas de descarga provocam solicitações mecânicas que se distribuem no interior dos resistores e podem causar trincas que são divididas em duas categorias:

I – Relativas a um possível choque térmico entre o anel periférico dos resistores e o meio ambiente. Este choque é referente à súbita elevação de temperatura devido à corrente de descarga que geralmente provoca fissuras superficiais.

II – Aquecimento diferencial no interior dos resistores devido a diferenças na micro-estrutura, o que geralmente resulta em fragmentação e perfuração dos resistores.

A Tabela 3.3 ^[3.18] apresenta um resumo das principais propriedades médias dos varistores utilizadas na análise das solicitações mecânicas devido aos esforços térmicos das correntes de descarga.

Tabela 3.3 – Principais características médias dos resistores a ZnO para análises térmicas

Densidade - ρ	5450 Kg/m ³
Calor específico - c	544,3 J/Kg°C
Condutividade térmica - k	20,47 W/m°C
Coeficiente de difusão térmica - D	6,90 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Coeficiente térmico de expansão linear - α_l	5,31 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Módulo de elasticidade - E	117,22 x 10 ⁹ N/m ²
Coeficiente de Poisson - ν	0,25

A Figura 3.17 ^[3.18] mostra um resistor em planta e em corte transversal detalhando a posição e tamanho dos eletrodos que são determinantes da capacidade de absorção de energia. A relação entre o diâmetro externo dos eletrodos e dos resistores define o gradiente de tensão e, conseqüentemente, a região chamada colar periférico, utilizada para controlar a corrente na periferia dos resistores. O colar periférico possui influência no desempenho térmico reduzindo a probabilidade de ocorrência de perfuração (puncture) e fragmentação (cracking), e limitando o desenvolvimento de fissuras microscópicas superficiais que podem estar associadas ao envelhecimento dos resistores.

De modo geral, os processos internos de aquecimento e resfriamento – por ocasião de um impulso de corrente – de um resistor a óxido metálico podem ser determinados por soluções clássicas, em coordenadas cilíndricas, da transmissão de calor por condução, para uma constituição física homogênea. Tal solução considera que a temperatura no colar periférico dos resistores é constante e igual à ambiente durante todo o período de aplicação do impulso de corrente. Devido ao baixo coeficiente de difusão térmica dos resistores, a elevação de temperatura da superfície externa ocorre somente após o aquecimento substancial das regiões internas do resistor.

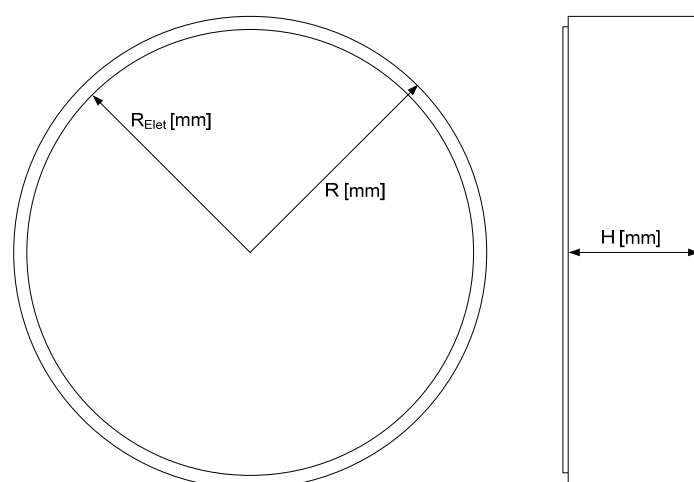


Figura 3.17 – Planta e corte de um resistor a óxido metálico genérico

A ausência do invólucro resulta na redução do aquecimento ao redor da coluna de resistores, mas não afeta o valor de sua elevação que acontece de dentro para fora enquanto que o resfriamento ocorre de fora para dentro.

As solicitações termo-mecânicas em um varistor resultam em diferenças de temperatura durante os transitórios de aquecimento e resfriamento, que alcançam o valor máximo na região periférica. Por conseqüência, é possível concluir que os esforços radiais são praticamente nulos, e que os esforços tangenciais também seriam nulos no interior dos resistores por não haver diferenças de temperatura, mas diferentes de zero na periferia.

Nos transitórios de aquecimento é usual considerar uma elevação de temperatura uniforme ao longo da superfície do resistor. Nos resistores mais recentes este problema pode ser contornando por um tratamento superficial que altera a rigidez dielétrica e as condições de condução periférica. Neste caso, o eletrodo ocupa toda a superfície plana condutora de corrente.

Os varistores reais não são uniformes devido à existência de pontos de concentração de corrente (*Hot spots*) nos quais a energia injetada pode assumir valores elevados. Nestes casos, dependendo do tempo de escoamento da corrente de surto, e da característica *Tensão X Corrente pontuais*, podem surgir elevados gradientes de temperatura e tensão mecânica no interior dos resistores que geralmente resultam em falhas por fragmentação, conhecidas como Thermal Crackings ^[3.19 a 3.22]. A energia absorvida por um resistor não uniforme é diretamente proporcional à área, e à redução da tensão limiar de condução do *Hot spot*.

Em um varistor não uniforme, a principal solicitação mecânica simples imposta por um *Hot spot* é de origem tangencial. Nestes casos, o ponto de máxima solicitação é na fronteira entre o *Hot spot* e a região uniforme do resistor. Isto é válido para qualquer posição relativa à superfície plana do resistor, a menos que as fronteiras do *Hot spot* estejam próximas das bordas dos resistores.

Para um varistor com descontinuidade elétrica central, a redução na capacidade de absorção de energia é praticamente proporcional à redução da tensão limiar na região do *Hot spot* e inversamente proporcional à sua área efetiva. Para um *Hot spot* com 1% de razão de área, ou seja, 1% em relação à área total da seção transversal, uma redução de 10% na tensão limiar implica na inutilização dos resistores, pois causa uma redução de 40% na capacidade de absorção de energia (valor teórico) ^[3.7].

A maior sollicitação térmica na direção tangencial se encontra na região adjacente ao *Hot spot* – independente de sua posição – devido ao elevado gradiente de temperatura. A não simetria radial, no entanto resulta, em alguns casos, em maior esforço mecânico na periferia dos resistores. Tal fato leva à possibilidade de um início de falha termo-mecânica não coincidente com a posição física do *Hot spot*.

As sollicitações termomecânicas nas adjacências da região não uniforme e na periferia do resistor são máximas devido ao elevado gradiente de temperatura, a menos que o *Hot spot* esteja próximo da sua periferia, condição na qual são excedidas em seu interior.

Para defeitos interiores distantes da superfície, as sollicitações tangenciais periféricas são levemente afetadas pela presença de *Hot spots* internos com baixos gradientes de temperatura. A principal implicação deste fato é a redução das margens teóricas de absorção de energia dos resistores a óxido metálico. Neste caso, os problemas são termomecânicos e, na maioria das vezes, estão relacionados à dilatação diferenciada de regiões internas dos resistores submetidos a elevados gradientes de temperatura. As falhas então se iniciam com o surgimento de micro-trincas na periferia da não uniformidade e se propagam até a fragmentação dos resistores.

Uma vez atingido o valor de energia específica crítica, as sollicitações resultam na fragmentação do resistor. Este valor, a princípio, não é afetado pela forma e amplitude de corrente. No entanto, como reconhecido por alguns fabricantes, os dados usualmente publicados para a capacidade de absorção de energia não devem ser entendidos como absolutos, principalmente quando as condições de corrente aplicada aos resistores e para-raios são muito distantes das condições padrão de ensaio.

3.9.4 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Tanto quanto um nível de proteção adequado e um dimensionamento estável para operação contínua e sobretensões temporárias, a capacidade de absorção de energia é um dos parâmetros mais importantes de um para-raios. Sua função – o escoamento de sobretensões para a terra – está associada a uma dissipação de energia e ao ato de impedir que o potencial da linha chegue à zero, o que constituiria uma situação de falta. A capacidade de absorção de energia de um para-raios é então definida por dois parâmetros

distintos: a capacidade de absorver a energia de um impulso, e a capacidade de absorção de energia térmica ^[3.5].

O primeiro deles é a máxima energia que pode ser injetada por uma descarga simples sem causar sobre-solicitações térmicas, mecânicas ou dielétricas a um resistor a óxido metálico. A energia injetada em uns poucos μs ou em ms causa uma elevação de temperatura extremamente rápida, associada a elevadas tensões radiais e tangenciais no varistor cerâmico, ou ao surgimento de *Hot spots* onde a corrente se concentra. Este fato pode provocar micro fissuras, descargas externas, perfurações ou até a fragmentação do resistor. Estes efeitos são provocados pelas menores não homogeneidades na cerâmica que são particularmente inevitáveis. A capacidade de absorção de energia é uma característica própria do varistor e independente do restante do para-raios ^[3.5].

O segundo parâmetro é definido como a máxima energia injetada a um para-raios frente a qual ele ainda é capaz de se resfriar até a sua temperatura normal de operação. Esta é uma característica própria de todos os projetos, afetada pelas características elétricas dos resistores não lineares, pelas solicitações elétricas específicas de sua aplicação real e suas condições de envelhecimento; e pela tecnologia do invólucro e suas dimensões geométricas. Isto é especificado de forma que o incremento de temperatura seja baixo o suficiente para que o para-raios volte à sua temperatura abaixo do limite de estabilidade ^[3.5].

O ensaio de impulso de corrente de longa duração pode fornecer informações valiosas sobre a vida útil dos para-raios a óxido metálico se aplicados com altos níveis de energia. Embora não mencionado em norma, a maioria dos fabricantes utiliza este ensaio baseado no ensaio de suportabilidade à corrente de longa duração com um tempo fixo de 2 ms sob a máxima amplitude de corrente permitida neste intervalo ^[3.5].

A capacidade teórica de absorção de energia dos varistores é definida pelas temperaturas de operação e limite de estabilidade e, conforme a Equação 3.14, é definida como a quantidade de calor necessária para elevar sua temperatura do ponto de operação estável para o ponto limite de operação. No entanto, este conceito deve ser aplicado para pequenas taxas de crescimento de energia absorvida, para que a elevação da temperatura seja uniforme, evitando gradientes térmicos internos aos resistores ^[3.13].

$$E_T = C_V \cdot V_R (\theta_L - \theta_{OP}) \quad (3.14)$$

Onde:

E_T : máxima energia absorvida pelos resistores – valor teórico [J];

C_V : calor específico médio dos resistores [$J/cm^3 \text{ } ^\circ C$];

V_R : volume dos resistores [cm^3];

θ_L : temperatura de operação [°C];

θ_{OP} : temperatura limite de operação [°C].

Uma simplificação de conceitos considerando a máxima temperatura do colar isolante na superfície lateral dos resistores – muitas vezes em epóxi – com o auxílio da Equação 3.14 permite dispensar o cálculo das resistências e capacidades térmicas dos invólucros. Deste modo, ao considerar um resistor de volume unitário, a Equação 3.15 ^[3.12] fornece uma linearização útil do *Calor Específico x Temperatura* até o limite de 200°C, que resulta na Equação 3.16 ^[3.12].

$$C_V = C_0 \cdot \delta C(\theta_L - \theta_{OP}) \quad (3.15)$$

$$E_T = V_R \cdot [C_0 + \delta C(\theta_L - \theta_{OP})] \cdot (\theta_L - \theta_{OP}) \quad (3.16)$$

Onde:

C_0 : calor específico dos resistores a 20°C [J/cm³];

δC : variação do calor específico em função da temperatura [J/cm³].

A Equação 3.16 aplicada ao volume de um resistor não linear a óxido metálico para média tensão fornece a característica mostrada na Figura 3.18 ^[3.12], onde se observa a relação entre a capacidade de absorção de energia, temperatura limite de operação, a temperatura ambiente e a tensão aplicada ao para-raios.

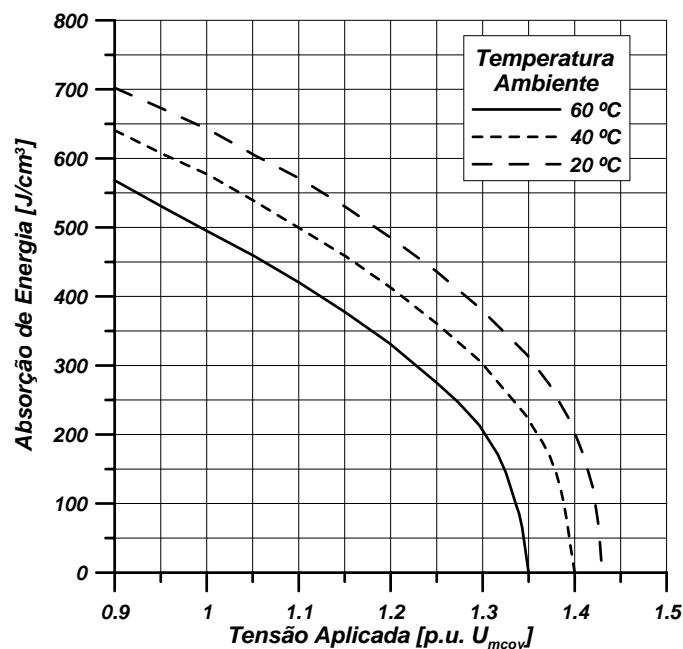


Figura 3.18 – Relação entre capacidade de absorção de energia, a temperatura ambiente e a tensão aplicada ao para-raios

Nos projetos de para-raios a óxido metálico os resistores são conectados em série formando colunas dentro do invólucro, que podem ser conectadas em paralelo quando

é necessária uma elevada capacidade de absorção de energia que, dentro deste contexto, pode ser determinada através da Equação 3.17 [3.7]:

A Tabela 3.4 [3.13] mostra valores típicos de capacidade de absorção de energia (devido à existência de um limite térmico de operação) sob tensão de operação contínua para 3 classes de para-raios.

Tabela 3.4 – Energia máxima absorvida (limite de estabilidade térmica) para classes de para-raios

Classe do para-raios – ANSI [3.13]	E_T [J/cm ³]
Distribuição	600 – 700
Intermediária	500 – 600
Estação	400 – 500

$$E_{T-PR} = E_T \cdot N_{RS} \cdot N_{CP} \cdot F_{RC} \quad (3.17)$$

Onde:

E_{T-PR} : capacidade de absorção de energia de um para-raios [J];

N_{RS} : número de resistores série compondo uma coluna;

N_{CP} : número de colunas em paralelo;

F_{RC} : fator de redução da capacidade de absorção de energia devido a conexão de N_{CP} colunas em paralelo ($0,80 < F_{RC} < 0,90$).

Conforme Tabela 3.5 [3.13], os fabricantes costumam indicar a E_{T-PR} através de um parâmetro chamado *Energia Específica* que a relaciona com a tensão nominal, ou seja, kJ/kV [3.13]. Neste caso a Equação 3.17 pode ser transformada na Equação 3.18 [3.7].

Tabela 3.5 – Energia específica das diversas classes de para-raios

Classe do para-raios - ANSI	Energia Específica [kJ/kV]
Distribuição	1.0 – 1.9
Intermediária	2.7 – 3.4
Estação	5.0 – 15.0

$$E_{T-PR} = E_{E-un} \cdot U_n \cdot N_{CP} \cdot F_{RC} \quad (3.18)$$

Onde:

E_{E-un} : energia específica do para-raios – base tensão nominal [kJ/kV];

U_n : tensão nominal do para-raios [kV].

A temperatura correspondente ao valor térmico da tensão nominal é normalmente utilizada como base para determinar a energia total absorvida pelos resistores, e sua relação com a máxima tensão de operação contínua é verificada com base na norma técnica que orienta a elaboração do projeto sob análise. Nestes casos deve ser considerada

a relação entre os níveis de proteção frente a impulsos atmosféricos e de manobra e a máxima tensão de operação contínua fase-terra do projeto. Dentro deste contexto, a determinação da máxima tensão de operação contínua pode ser um processo iterativo.

O próximo passo é verificar a distribuição da tensão ao longo da coluna de resistores que, para um projeto adequado, deve ser linear ^[3.5]. Esta distribuição de tensão, para uma excitação com forma senoidal é influenciada pelas razões entre as capacitâncias de fuga para eletrodo, para a terra e a capacitância própria dos resistores. Em uma configuração simplificada, o fator de sobretensão dos resistores é máximo para o primeiro resistor. Fatores de sobretensão máximos da ordem de 5%, geralmente, são tolerados porque os flanges dos para-raios possuem massas metálicas de porte significativo que atuam como dissipadores de calor.

No empilhamento de varistores para a composição de um para-raios completo, há uma distorção de campo elétrico em relação ao corpo completo, que se concentra no primeiro varistor. Fator de sobretensão é um fator de multiplicação aplicado aos projetos de para-raios devido a esta concentração de campo elétrico.

A distribuição não uniforme de tensão em para-raios com $U_m > 60$ kV, ou para sistemas blindados em SF₆ pode ser contornada com a instalação de capacitores de equalização, ou de anéis de equalização de potencial.

3.10 – ENSAIOS

O objetivo dos ensaios é simular em laboratório os fenômenos que podem ocorrer nos sistemas, e verificar se o projeto satisfaz as condições mínimas exigidas de modo a garantir uma proteção adequada aos equipamentos e sistemas dentro dos limites da classe de cada para-raios.

Os para-raios devem ser ensaiados conforme acordo entre fabricante e comprador, nas próprias instalações da fábrica, ou em um laboratório neutro com a presença, ou não, do inspetor do comprador. A IEC 60099-4 de 2004 ^[3.23] especifica os ensaios em três classes: ensaios de tipo, ensaios de rotina e ensaios de recebimento. No Brasil ainda são consideradas as normas IEEE Std. C62. 11/2005 ^[3.24] e o projeto de norma em fase final de revisão pela CE-37:7 ^[3.25].

Os ensaios de tipo, rotina e recebimento são prescritos em normas técnicas, projetos de normas e especificações técnicas das empresas concessionárias, que tendem a incluir ensaios e características representativas do comportamento no campo inerente ao sistema considerado.

3.10.1 – ENSAIOS DE TIPO

É um conjunto de ensaios realizados em corpos-de-prova, específicos para cada ensaio, montados com componentes normais de fabricação, que tem por objetivo verificar as características de projeto do para-raios e sua conformidade com as normas técnicas. Salvo acordo entre o fabricante e o comprador, estes ensaios não precisam ser repetidos enquanto não houver alteração no projeto, nos materiais ou no processo de fabricação. Os ensaios de tipo aplicados a para-raios sem centelhadores são ^[3.25]:

- 1 – Tensão suportável no invólucro sem a parte ativa;
- 2 – Tensão residual:
 - a) para impulso de corrente íngreme;
 - b) para impulso atmosférico;
 - c) para impulso de manobra;
- 3 – Corrente suportável de impulso:
 - a) retangular de longa duração em para-raios 2,5 kA⁽¹⁾ e 5 kA;
 - b) descarga de linha de transmissão em para-raios 10 kA classes 1 a 3 e 20 kA classes 4 e 5;
- 4 – Ciclo de operação:
 - a) para impulso de corrente elevada;
 - b) sob impulso de manobra;
- 5 – Levantamento da característica “*Tensão em frequência industrial X Tempo*”;
- 6 – Curto-circuito;
- 7 – Tensão de radio-interferência e de ionização interna⁽²⁾;
- 8 – Ensaio do desligador automático quando aplicável;
- 9 – Poluição artificial;
- 10 – Estanqueidade;
- 11 – Medição de descargas parciais;
- 12 – Mecânicos – momento fletor;
- 13 – Envelhecimento sob tensão simulando as condições ambientais;
- 14 – Suportabilidade às agressões do ambiente;
- 15 – Medição da taxa de vazamento em para-raios poliméricos;
- 16 – Leitura da tensão de referência⁽³⁾;
- 17 – Distribuição de corrente em para-raios com mais de uma coluna.

3.10.2 – ENSAIOS DE ROTINA

Consiste em um conjunto de ensaios realizados em cada elemento de para-raios ou para-raios completo, com o objetivo de verificar as características mínimas de qualidade

e uniformidade de produção em conformidade com o projeto. Os ensaios de rotina são ^[3.25]:

- 1 – Medição de radio-interferência;
- 2 – Tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
- 3 – Descargas parciais⁽⁴⁾
- 4 – Leitura do componente resistivo da corrente de fuga a MCOV⁽³⁾
- 5 – Leitura da corrente de fuga total a MCOV⁽³⁾
- 6 – Estanqueidade;
- 7 – Distribuição de corrente em para-raios de colunas múltiplas;

3.10.3 – ENSAIOS DE RECEBIMENTO

É o conjunto de ensaios realizados em elementos de para-raios ou para-raios completo, na presença do comprador ou seu representante, com o objetivo de verificar a conformidade dos resultados obtidos com os garantidos pelo fabricante. Este conjunto é composto por ^[3.25]:

- 1 – Tensão de referência
- 2 – Tensão residual para impulso atmosférico à corrente de descarga nominal;
- 3 – Descargas parciais⁽⁴⁾;
- 4 – Medição da corrente de fuga total na tensão de operação contínua se aplicável⁽³⁾;
- 5 – Medição do componente resistivo da corrente de fuga à MCOV, se aplicável⁽³⁾;
- 6 – Estanqueidade quando aplicável;
- 7 – Verificação visual e dimensional;
- 8 – Torque de instalação nos terminais dos para-raios;
- 9 – Espessura da camada de zinco;
- 10 – Espessura da camada de estanho;

3.10.4 – ENSAIOS ESPECIAIS

- 1 – Ensaio especial de verificação da estabilidade térmica.
- 2 – Ensaios de descargas múltiplas

NOTA:

- (1) Valor considerado apenas na Norma IEC;
- (2) Ensaios de ionização interna somente pela ANSI e Projeto NBR;
- (3) Ensaio previsto apenas no Projeto NBR
- (4) Ensaio prescrito somente pela IEC e Projeto NBR

A seguir são apresentados de forma sumarizada os ensaios classificados como tipo, rotina e/ou recebimento.

LEITURA DA TENSÃO DE REFERÊNCIA

A tensão de referência, quando necessária, deve ser verificada para a correta seleção dos corpos de prova a serem submetidos a ensaios específicos, além de servir de parâmetro comparativo na avaliação de alguns ensaios.

TENSÃO SUPORTÁVEL NO INVÓLUCRO

Estes ensaios demonstram a capacidade dos invólucros de suportarem as solicitações dielétricas em ar. Os para-raios para uso externo são ensaiados sob chuva e os para uso interno são ensaiados a seco. As amostras são submetidas aos ensaios de tensão suportável a: impulso atmosférico, impulso de manobra e à frequência industrial [3.25].

TENSÃO RESIDUAL

O objetivo dos ensaios de tensão residual é obter os máximos valores de tensão residual para um dado projeto e para todas as correntes e forma de ondas especificadas, determinando-se, então, os níveis de proteção dos para-raios do projeto ensaiado. Este ensaio pode ser realizado em para-raios completos ou seções representativas. São três os ensaios de tensão residual: a impulso de corrente íngreme, a impulso atmosférico, e impulso de corrente de manobra [3.25].

Como ensaio de tipo é realizado em três corpos-de-prova de para-raios completos ou em suas seções com tensão nominal entre 3 kV e 12 kV. Quando realizado em uma seção, a tensão residual do para-raios completo é geralmente definida como o resultado do produto do valor medido sobre as amostras ensaiadas pela relação entre a tensão nominal do para-raios completo e a tensão nominal da seção.

O ensaio para impulso de frente íngreme verifica o comportamento da amostra frente a ocorrência de uma descarga atmosférica próxima ao para-raios. Cada uma das três amostras é então submetida a um impulso de corrente com tempo de frente de 1 μ s e de cauda inferior a 20 μ s, com valor de crista igual a corrente de descarga nominal da amostra. O maior valor obtido é definido como tensão residual para impulso íngreme.

Frente a impulso atmosférico, cada uma das três amostras é submetida a aplicação de corrente na forma 8/20 μ s e amplitudes correspondentes a 50%, 100% e 200% da corrente de descarga nominal do para-raios completo ou de sua seção. Os valores máximos de tensão residual são utilizados no levantamento da curva “*Tensão residual X Corrente de descarga*”. O maior valor obtido é definido como o de tensão residual frente a impulso atmosférico.

O maior valor de crista entre os valores de tensão residual para impulso de corrente íngreme dividido por 1,15; e a tensão residual para impulso atmosférico obtidos destes ensaios definem o nível de proteção do para-raios para impulso atmosférico. Como

ensaio de recebimento, é verificada a tensão residual no ponto correspondente à corrente de descarga nominal. Seu valor final deve ser inferior ao máximo estabelecido em norma para a classe de tensão e tipo de para-raios considerado.

Para impulso de manobra é aplicado a para-raios com correntes de descarga nominal de 10 kA e 20 kA ^[3,23]. Neste ensaio, cada uma das três amostras deve ser submetida a impulsos de corrente com um tempo de frente de 30 µs a 100 µs e amplitudes definidas em norma, de acordo com a classe de descarga de linhas de transmissão do para-raios. O maior valor de crista de tensão, para os valores de corrente definidos em norma, é definido como nível de proteção para impulso de manobra do para-raios.

CORRENTE SUPORTÁVEL DE IMPULSO DE LONGA DURAÇÃO

Verifica a capacidade do para-raios de escoar as correntes de descarga de longa duração. Divide-se em ensaio de descarga de linhas de transmissão em para-raios de 10 kA e 20 kA, e em ensaio de impulso de corrente de longa duração em para-raios de 5 kA.

Este ensaio é definido por uma corrente de impulso retangular para para-raios de 2,5 kA e 5 kA e descarga de linhas de transmissão em para-raios 10 kA, classes 1 a 3 e 20 kA classes 4 e 5. O objetivo é verificar a capacidade das amostras de absorver energia proveniente de manobras na linha.

CICLO DE OPERAÇÃO

Tem por objetivo simular as condições de serviço do para-raios, pela aplicação de um número específico de impulsos em combinação com a energização através de uma fonte com tensão e frequência especificadas. Em para-raios sem centelhadores é utilizado para verificar a capacidade das amostras de manter a estabilidade térmica após a aplicação de um determinado tipo de impulso, seguido da aplicação de tensão alternada em frequência industrial. É realizado em três amostras de para-raios completos ou seções representativas, com tensões nominais entre 3 kV e 12 kV. A seção é considerada representativa se apresentar as mesmas características elétricas e térmicas do para-raios completo. Pode ser dividido em três etapas ^[3,25]:

- Ensaio de envelhecimento acelerado dos elementos de ZnO;
- Verificação da equivalência térmica entre elemento completo e seção (para ensaio na seção);
- Ciclo de operação propriamente dito.

Ensaio de envelhecimento acelerado:

É aplicado aos elementos de ZnO utilizados na montagem do para-raios. Sua finalidade é determinar os valores corrigidos de tensão nominal e da MCOV a serem aplicados aos elementos completos ou às suas seções durante o ensaio de ciclo de

operação. Consiste em verificar as características de envelhecimento dos elementos de ZnO por um período de 1000 horas, a uma temperatura de 115°C [3.25].

Durante este ensaio os elementos de ZnO ou para-raios completos são submetidos a sua MCOV corrigida em função do comprimento do para-raios a ser ensaiado ou do maior para-raios que atenda ao projeto considerado. Para um comprimento menor que 1 metro, a tensão de ensaio é corrigida pela Equação 3.19 [3.25]:

$$U_{ens} = U_{MCOV} \cdot (1 + 0,15L) \quad (3.19)$$

Onde:

U_{ens} : valor eficaz da tensão de ensaio aplicada por 1000 horas;

U_{MCOV} : máxima tensão contínua de operação da amostra;

L : comprimento do para-raios em metros – para L menor que 1 m.

O objetivo desta correção é representar os efeitos de uma distribuição não uniforme de tensão ao longo do para-raios, que provoca maior solicitação elétrica sobre os elementos posicionados mais próximos ao terminal de linha do para-raios. De acordo com a Equação 3.19, e, para-raios de 1 metro a tensão de ensaio deve ser aumentada em 15%.

Em para-raios com mais de 1 metro os corpos de prova devem ser submetidos a uma tensão de ensaio correspondente à sua MCOV multiplicada por um fator KT , que deve considerar os efeitos de uma distribuição não uniforme de tensão ao longo do para-raios. Este fator deve ser determinado a partir de medições de distribuição de tensão ou por simulação computacional.

Com base na Teoria de Arrhenius, existe um processo de envelhecimento acelerado dos varistores a óxido metálico com a temperatura, podendo ser estimado um fator de aceleração AF_T definido pela Equação 3.20 [3.23]:

$$AF_T = 2,5^{(\Delta T/10)} \quad (3.20)$$

ΔT : diferença entre a temperatura de ensaio o limite superior da temperatura ambiente associada ao produto [°C].

De acordo com a Equação 3.20 este ensaio de envelhecimento representa a operação do para-raios submetido a uma temperatura média de operação de 40° C por 110 anos. A Tabela 3.6 [3.23] indica o tempo de vida prospectivo em função da temperatura ambiente de trabalho, dado por um ensaio de envelhecimento com duração de 1000 horas sob a temperatura de 115 °C.

As perdas nos corpos-de-prova são monitoradas em intervalos de uma a duas horas no início, após a aplicação da tensão – P_{1ct} . E posteriormente, as leituras são

realizadas a cada 100 horas após a primeira leitura até o final do ensaio, quando a última leitura será o valor P_{2ct} .

Tabela 3.6 – Tempo prospectivo máximo de vida

Faixa de temperatura ambiente [°C]	Tempo mínimo de vida demonstrado [anos]
40	110
65	11
95	0,7

O menor valor das perdas entre os lidos a cada 100 horas após a primeira leitura será considerado o P_{3ct} . A Tabela 3.7 ^[3.23] resume os procedimentos de ensaio em função dos resultados obtidos:

Tabela 3.7 – Procedimento para o ensaio em função dos resultados obtidos

Leitura de perdas	Amostras e tensões para o ensaio de ciclo
$P_{2ct} \leq 1,1.P_{3ct}$ e $P_{2ct} \leq P_{1ct}$	Novas amostras a U_n e U_{MCOV}
$P_{2ct} \leq 1,1.P_{3ct}$ e $P_{2ct} > P_{1ct}$	Novas amostras a U_n e U_{MCOV} corrigidos
$P_{2ct} > 1,1.P_{3ct}$ e $P_{2ct} < P_{1ct}$	Amostras envelhecidas a U_n e U_{MCOV}
$P_{2ct} > 1,1.P_{3ct}$ e $P_{2ct} \geq P_{1ct}$	Amostras envelhecidas a U_n e U_{MCOV} ou novas amostras a U_n e U_{MCOV} corrigidos conforme acordo entre fabricante e comprador

Verificação da equivalência térmica entre elemento completo e seção

Este ensaio deve ser realizado antes do ensaio de ciclo de operação para verificar a equivalência térmica entre a seção e o para-raios completo, através do levantamento das curvas “*Temperatura de resfriamento X Tempo*”.

No caso da disponibilidade dos resultados dos ensaios de ciclo de operação para um para-raios de tensão nominal U_n , este tipo de para-raios poderá ser uma seção equivalente de outros para-raios de mesmo projeto, porém com diferentes tensões nominais, desde que suas curvas “*Temperatura de resfriamento X Tempo*” estejam abaixo da do para-raios já ensaiado. Neste caso é necessário fazer o levantamento da curva do para-raios a ser ensaiado.

O procedimento de ensaio consiste na energização das amostras com tensão em frequência industrial e amplitude superior à tensão de referência, até que a temperatura interna do conjunto ensaiado atinja 120 °C (lida por termopares). Após a estabilização da temperatura neste valor, as amostras são desenergizadas, quando então é levantada a curva “*Temperatura de resfriamento X Tempo*”. A seção ensaiada é considerada representativa do para-raios completo se, durante todo o período de resfriamento sua curva for igual ou superior a curva obtida para o para-raios completo.

Ciclo de Operação com Estabilidade Térmica

A IEC 60099-4 ^[3.23] estabelece dois ensaios de ciclo de operação diferentes de acordo com a classificação do para-raios:

- Ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada;
- Ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra.

O primeiro é aplicado a para-raios com correntes de descarga de 1,5 kA; 2,5 kA; 5,0 kA e 10 kA classe 1 de descarga de linha. Seu objetivo é verificar o comportamento das amostras frente a impulsos de alta corrente de curta duração. Inicialmente, as amostras são submetidas ao condicionamento que consiste na aplicação de vinte impulsos de corrente com forma de impulso 8/20 μ s e amplitude equivalente a corrente de descarga nominal da seção ensaiada. Os vinte impulsos são divididos em quatro grupos de cinco aplicações. O intervalo entre os impulsos de um mesmo grupo deve ser de 50 a 60 segundos. E o intervalo entre grupos, de 25 a 30 minutos.

Após o condicionamento os para-raios ou seções representativas são aquecidos em estufa à temperatura de $60 \pm 3^\circ$ C e então submetidas a uma aplicação de dois impulsos de corrente elevada, na forma 4/10 μ s e amplitude definida em norma, de acordo com a corrente de descarga nominal da seção. Após o segundo impulso, em um intervalo não superior a 100 ms, é aplicada à amostra a sua tensão nominal corrigida da seção por 10 segundos (simulando uma sobretensão temporária), e então sua MCOV por 30 minutos. Durante este período, a tensão aplicada, a corrente de fuga, a temperatura das amostras e/ou as perdas Watts são registradas continuamente. Este procedimento visa comprovar a estabilidade térmica da amostra.'

A Figura 3.19 ^[3.26] mostra a verificação da estabilidade térmica de uma amostra submetida ao ensaio de ciclo de operação para impulso de corrente elevada. Neste caso, o parâmetro registrado foi a temperatura. A redução da temperatura ao longo do tempo evidencia a estabilidade térmica da amostra.

Posteriormente ao ensaio de ciclo de operação, deve ser realizada a leitura da tensão residual a corrente de descarga nominal. O valor obtido deve ser comparado com o valor medido antes do início do ensaio, não devendo haver uma variação superior a 5% entre os valores medidos. Por último, faz-se a inspeção visual, não devendo ser observados sinais de perfuração ou trincas nos elementos de ZnO, bem como evidências de descargas externas pela superfície lateral dos elementos.

O ensaio de ciclo de operação para impulso de manobra é aplicado a para-raios com corrente de descarga nominal 10 kA, classes 2 e 3, e 20 kA para as classes 4 e 5. Neste caso a amostra deve ser submetida a dois ensaios de condicionamento: o primeiro consiste de 20 aplicações de impulsos com forma 8/20 μ s, similar ao ensaio descrito no item

anterior. O segundo consta da aplicação de dois impulsos de corrente elevada, com forma de onda 4/10 μ s e amplitude 100 kA.

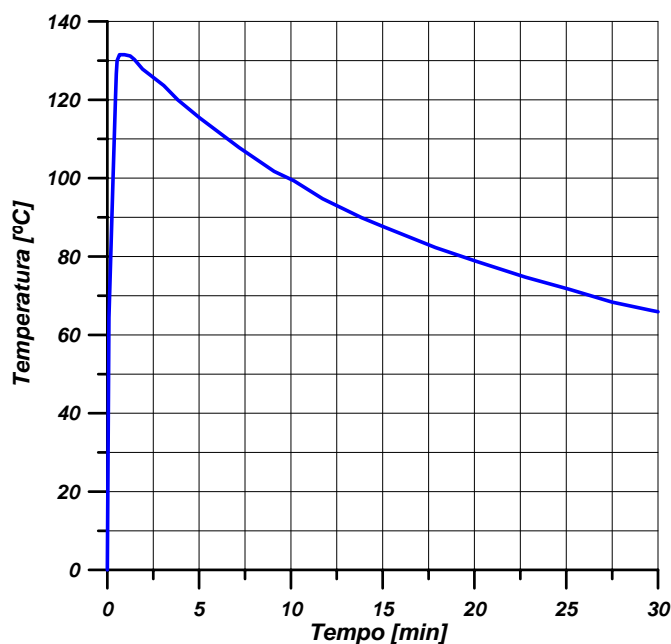


Figura 3.19 – Verificação da estabilidade térmica da amostra

Após os ensaios de condicionamento, as amostras são aquecidas em estufa à temperatura de $60 \pm 3^\circ$ C e submetidas a dois impulsos de descarga de linha de transmissão, sob condições especificadas em norma. O intervalo entre as aplicações de impulso devem ser de 50 a 60 segundos. Imediatamente após a segunda aplicação a amostra é submetida à sua tensão nominal por 10 segundos e em seguida, à sua MCOV por 30 minutos. Tal como no ensaio anterior, a tensão aplicada, a corrente de fuga, a temperatura e/ou as perdas são registradas continuamente.

Após o ensaio de ciclo de operação segue a leitura da tensão residual a corrente de descarga nominal. O valor obtido deve ser comparado ao valor lido antes do início do ensaio, não devendo haver uma variação superior a 5% entre os valores lidos. Por último é feita a inspeção visual, não devendo ser observados sinais de perfuração, trincas dos elementos do ZnO, ou evidências descargas externas na superfície lateral dos elementos.

CARACTERÍSTICA DA TENSÃO SUPORTÁVEL DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO

Em complemento ao ensaio de Ciclo de Operação, o fabricante deve fornecer os dados do tempo de aplicação e do valor correspondente da tensão de frequência industrial que o para-raios pode ser submetido com e sem a aplicação de uma energia prévia. Isto é devido a solicitações de correntes de impulso correspondentes a sua classe, sem a ocorrência de danos ou perda de estabilidade térmica.

ENSAIO DO DESLIGADOR AUTOMÁTICO

Verifica se o desligador automático provoca a separação do condutor de terra do para-raios quando este entra em curto.

DESCARGAS PARCIAIS

Os níveis lidos para descargas parciais internas devem ser menores que 10 pC.

CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Quando a corrente de curto-circuito é declarada pelo fabricante, o ensaio deve ser executado para demonstrar que a falha de um para-raios não resulta em fragmentação violenta do invólucro e que a auto-extinção das chamas ocorre em um período definido.

ESTANQUEIDADE

Nos invólucros de porcelana ou poliméricos com atmosfera interna, demonstra a impermeabilidade a gás e água do sistema de vedação completo. Nos invólucros poliméricos sem atmosfera interna, verifica a capacidade dos para-raios em resistir a penetração de umidade após ter sido submetido a um pré-condicionamento termo-mecânico especificado.

ENVELHECIMENTO SOB TENSÃO DE OPERAÇÃO SIMULANDO CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Tem a finalidade de verificar a capacidade dos para-raios poliméricos de suportar condições ambientais simuladas. É realizado sob névoa salina durante 1000 horas. No caso de condições severas como radiação solar intensa, inversões freqüentes de temperatura com condensação de umidade, poluição pesada, ou conforme acordo entre fabricante e comprador, pode ser realizado um ensaio substituto de 5000 horas.

TENSÃO DE RÁDIO-INTERFERÊNCIA

O para-raios é considerado aprovado se o nível de radio-interferência lido a 1,05 vezes a tensão de operação contínua e em todos os degraus for menor 2500 μ V.

MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA TOTAL NA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA QUANDO APLICÁVEL

Este ensaio é realizado em cada unidade de para-raios completo. A tensão de referência do para-raios ou de seus módulos individuais deve ser aplicada sobre o corpo de prova para a leitura do valor de crista da corrente de fuga total.

MEDIÇÃO DO COMPONENTE RESISTIVO DA CORRENTE DE FUGA NA TENSÃO DE OPERAÇÃO CONTÍNUA QUANDO APLICÁVEL

O procedimento é o mesmo da corrente de fuga total utilizando qualquer método capaz de identificar a parcela resistiva da corrente de fuga através do para-raios completo ou pelos seus módulos individuais.

3.9 – COMENTÁRIOS

A função do para-raios no sistema elétrico é a proteção contra sobretensões em suas modalidades conforme comentado. A apresentação dos componentes do para-raios faz automaticamente uma breve explicação do seu princípio de funcionamento definido pela parte ativa. O invólucro pode ser função do projeto e/ou aplicação. E a especificação de para-raios é avaliada por meio dos ensaios recomendados em normas.

O resistor não linear a óxido metálico – ou óxido de zinco – constitui a parte ativa de um para-raios, conferindo-lhe suas características de proteção e de absorção de energia. O envelhecimento de um para-raios a óxido metálico pode então ser entendido como o envelhecimento de seu resistor. Neste processo, suas características sofrem alterações diversas tais como aumento da corrente de fuga e/ou potência consumida.

3.10. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3

- [3.1] Electric Power Research Institute; “Development of a New Type of Nonlinear Resistance Valve Block for Surge Arresters”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL – 11647, 1980.
- [3.2] Electric Power Research Institute; “Gapless Surge Arresters for Power Systems Applications – Volume I, II, and III”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL – 3166, 1983.
- [3.3] Ragaller, K., et al.; “Surges in High Voltage Networks”; BBC – Brown Boveri Company Limited; Plenum Press; First Edition, New York – 1980.
- [3.4] Martinez, M.L.B.; “Para-raios a Óxido Metálico para Sistemas de Potência”; Apostila do Curso Sobretensões – FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria – 1ª Edição; Itajubá – 1984.
- [3.5] M.L.B. Martinez, “Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação”, Tese de Doutorado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 1998.
- [3.6] MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos* – 3ª edição – Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A, 2005. 792 p.
- [3.7] LAT, MV, “Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE – PAS 102 – pp. 2914-2202 – 1983.
- [3.8] Bernhard Ritcher – ABB Switzerland Ltd “Metal Oxide Surge Arresters for Distribution Systems” Tutorial Cigré.

- [3.9] Hinrichsen V. “Metal-Oxide Surge Arresters – Fundamentals Siemens AG, 1st edition, 114 pages. Download: www.siemens.com/arresters.
- [3.10] Kai Steinfeld, Siemens AG, Berlin Germany, “Design of Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housings”. www.siemens.com/arresters
- [3.11] Volker Hinrichsen, Darmstadt university of Technology “Designs of Station-Class polymer Housed Surge Arresters”. Cigré-Brasil. www.abb.com.br
- [3.12] Carrol, D.P., et al.; “A Dynamic Surge Arrester Model for Use in Power System Transient Studies”, Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 91 pp.1057-1067, 1972.
- [3.13] LAT, M.V. et al.; “Application Guide for Surge Arresters on Distribution Systems”; Ontario Hydro Research Division; First Edition; Toronto, 1998.
- [3.14] Pereira, P.S., Martinez, M.L.B.; “Simulação do Comportamento Transitório de TC’s”; VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 1984.
- [3.15] Martinez, M.L.B.; Cogo, J.R.; “The Influence of the Surge Arrester Model on the Results of Electromagnetic Transient Studies”, III Seminário Nacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 1994.
- [3.16] Martinez, M.L.B; Zanetta Jr, L.C.; “Considerações Sobre o Projeto Térmico de um Para-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores”; V Seminário de Materiais do Setor Elétrico, 1996.
- [3.17] LAT, M.V.; “A Method for Performance Prediction of Metal Oxide Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 104 – pp. 2665-2673, 1985.
- [3.18] Electric Power Research Institute; “Fundamental Research on Metal Oxide Varistors Technology”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL-2667, 1990.
- [3.19] LAU, M., et al.; “Surge Discharge Capability and Thermal Stability of Metal Oxide Surge Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 103 – pp. 282 – 289, 1984.
- [3.20] Mizukoshi, A.; et al.; “Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 102 – pp. 1384 – 1390, 1983.
- [3.21] EDA, K.; “Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Current”; American Institute of Physics; Journal of Applied Physics – pp. 2948 – 2955, 1984.

- [3.22] Zander, W.; “Influence of Material Heterogeneity on the Ageing of ZnO Arrester Material”, V International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, 1987.
- [3.23] IEC 60099-4:2004 Part. 4: “Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”.
- [3.24] IEEE Std. C62.11/2005: “IEEE Standard for Metal-Oxide surge arrester for AC power circuits”.
- [3.25] Projeto 03:037.07-002 – Outubro/2007 “Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaio” “
- [3.26] Volker Hinrichsen, Max Reinhard and Bernhard Richter “Energy handling Capability of High Voltage Metal-Oxide Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards”, Cigré International Colloquium –September 12th and 13th, 2007, Rio de Janeiro – Brazil.
- [3.27] “Curso sobre para-raios – Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão” – Franco Engenharia /Cemig – Agosto de 2008.

CAPÍTULO 04

PROCESSO DE ENVELHECIMENTO

O envelhecimento de uma série de materiais é o resultado de modificações químicas resultantes da exposição a elevadas temperaturas, à composição do ambiente envolvente do material, seu grau de oxigênio, presença ou não de ozônio, grau e tipo de impureza presente. É ainda influenciado pela exposição do material a radiações capazes de provocar alterações estruturais como a radiação ultravioleta, a presença de um campo elétrico excessivo, ou um esforço mecânico acima do admissível.

No caso dos para-raios, além do sobreaquecimento, poluição e umidade, o envelhecimento é função essencialmente do número e amplitude dos esforços quando em operação. Sua vida útil depende, então, de fatores aleatórios como o número de surtos, e máxima amplitude e duração das correntes que devem tolerar. Frente a surtos atmosféricos, a vida útil depende quantitativamente do circuito que protegem e do local onde este circuito está instalado.

O sobreaquecimento localizado nos elementos de óxido de zinco, devido à corrente de fuga externa, e descargas parciais em sua superfície externa tem se mostrado a principal causa de falha prematura por ruptura externa. Os efeitos das descargas parciais provocam modificações na região da barreira inter cristalina resultando em uma alteração irreversível na característica $U X I$, aumento da corrente de fuga e aquecimento localizado. Esta solicitação térmica também modifica a altura da barreira de potencial e aumento da corrente de fuga. Estes efeitos combinados aceleram o processo de envelhecimento e reduzem a eficiência dos varistores como dispositivos de proteção ^[4.1].

A característica altamente não linear dos varistores ZnO , e a corrente de fuga normal (quando os para-raios não está conduzindo a corrente de descarga) são geradas pelo comportamento das junções P-N nas regiões de fronteira dos grãos de óxido metálico. Devido à natureza da composição do material cerâmico, o fluxo de corrente não é uniforme em toda a estrutura micro cristalina. As constantes de tempo térmicas não são suficientes para dissipar o rápido transitório de energia de modo praticamente estático, especialmente para pulsos múltiplos.

As várias conseqüências destes fatos constituem a base para os diversos modos de falha dos varistores a óxido metálico. Em relação ao aumento da absorção de energia, o sobreaquecimento pode causar a avalanche térmica (ou esforços mecânicos devido a diferenças de temperatura), rachaduras do material ou perfuração devido à corrente não uniforme.

Altas correntes, pulsos múltiplos, ou envelhecimento devido a várias causas degradam a característica “*Tensão X Corrente*”, facilitando a ocorrência de falhas. As variações nesta característica devido a altas correntes e/ou pulsos múltiplos acontecem pela fusão parcial do material cerâmico com alteração na dimensão e espessura dos grãos de óxido metálico, e na composição de suas fronteiras.

A degradação pode ser resumida em 3 categorias:

1) Menores mudanças na região de pré-avalanche da curva “*Tensão X Corrente*”, com pequena redução nas correntes de fuga a baixas tensões e nenhuma alteração na região de ruptura devido a altas correntes;

2) Reduções significativas (até 10%) na queda de tensão alcançada com a corrente de referência – tensão de referência – com maiores correntes de fuga sob tensões menores;

3) As variações na característica “*Tensão X Corrente*” devido ao envelhecimento por poluição, umidade e/ou corrente de fuga através do para-raios, ou seja, aumento da corrente de fuga normal à temperatura ambiente.

Muita ênfase é colocada no 2º e 3º tipo de degradação (negligência ao 1º), que são mais interessantes do ponto de vista da engenharia, porque seus efeitos influenciam imediatamente a absorção de energia do equipamento.

Qualquer aumento na absorção de energia não compensado por um correspondente acréscimo na dissipação causa desde a avalanche térmica até a fragmentação e a fusão do material. As normas nacionais e internacionais, no entanto, não fornecem indicações definitivas sobre o processo de envelhecimento dos resistores a óxido metálico.

4.1 – ENVELHECIMENTO FRENTE A TENSÕES EM FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

Os resistores não lineares a óxido metálico, como qualquer outro dielétrico, quando submetidos a sua tensão normal de operação em frequência industrial consomem potência relacionada ao componente ativo da corrente de fuga, cujo crescimento ao longo do tempo, é característico de um processo de envelhecimento [4.2 a 4.3].

A Figura 4.1 indica a divisão da vida operacional de um para-raios dividida em três regiões distintas [4.2]:

- Região I: estável, onde se processa o envelhecimento;
- Região II: Apresenta os primeiros traços de instabilidade, marcada por um ligeiro incremento na corrente de fuga e equilíbrio térmico precário;
- Região III: Instável, com elevado incremento na corrente de fuga, perda do equilíbrio térmico e ocorrência de avalanche térmica.

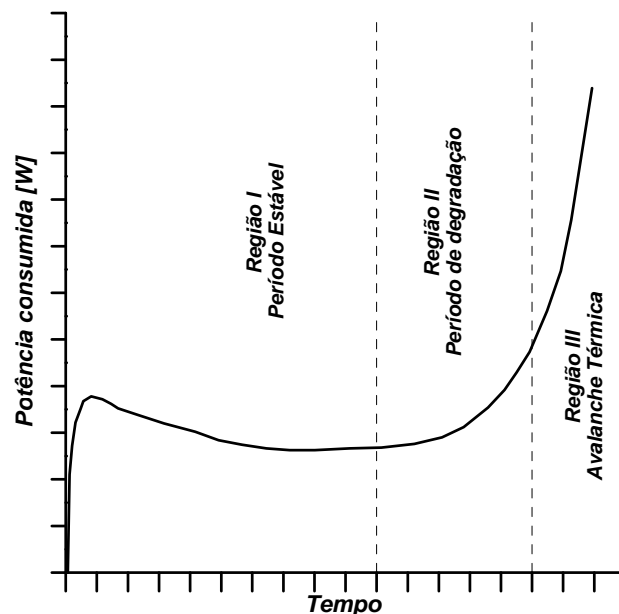


Figura 4.1 – Características potência consumida versus tempo

A teoria de envelhecimento dos resistores a óxido metálico é baseada na idéia de vida útil (dos resistores de primeira geração), que é idealmente determinada pelo tempo necessário para que a potência consumida seja duas vezes o seu valor inicial. Entretanto, o parâmetro que, na prática, determina o fim da vida útil dos resistores é intrínseco ao processo de manufatura e ao método de construção do para-raios. E conseqüentemente, intrínseco aos fabricantes. O conceito de dobrar o consumo de potência é, então, apenas orientativo [4.4].

As normas nacionais e internacionais propõem uma verificação do envelhecimento dos resistores através de um envelhecimento artificial no qual a amostra é

submetida à sua tensão de operação por 1000 horas a 115 °C. Este procedimento procura reproduzir a operação contínua por 40 anos a uma temperatura média de 40° C.

Deste modo, nos casos onde a potência consumida aumenta com o tempo, a relação entre as potências consumidas no início e no fim de 1000 horas define um fator de correção para as tensões em frequência industrial – declaradas pelo fabricante – aplicadas aos resistores novos, utilizados na caracterização dos para-raios por eles constituídos. Nos casos onde a potência consumida diminui com o tempo, não se utiliza fator de correção para as tensões em frequência industrial.

4.2 – ENVELHECIMENTO FRENTE A SURTOS

Além das solicitações da aplicação contínua da tensão em 60 Hz, os para-raios são submetidos a esforços e, conseqüentemente, ao envelhecimento devido a descargas de corrente aleatórias de surtos de manobra e atmosféricos. O envelhecimento dos resistores a óxido metálico frente a descargas de surtos de corrente depende dos seguintes fatores:

- Forma do impulso;
- Densidade de corrente através do resistor;
- Temperatura do resistor;
- Polaridade dos surtos;
- Número de descargas.

Pelos processos de condução dos materiais semicondutores, quanto maior a densidade de corrente imposta ao resistor não linear, maior é o incremento na corrente de fuga. Este fato é compatível com os impulsos atmosféricos que, se de grande amplitude, podem provocar mudanças físicas nas barreiras de potencial ao ponto de os resistores começarem a apresentar uma direção preferencial de condução (polarização). Nestes casos é usual calcular a corrente de fuga efetiva nos resistores como a média aritmética entre os picos de corrente de polaridade positiva e negativa.

A polarização é o deslocamento das barreiras de potencial no interior dos resistores. Os que apresentam alta polarização possuem elevada tendência ao envelhecimento precoce. O levantamento destes dados, portanto, é conveniente nas etapas que antecedem o projeto do resistor protótipo.

Se houver alteração das características dos resistores devido ao envelhecimento ou degradação pelas descargas de impulso, ocorre um incremento da corrente de fuga - I_{fuga} e do consumo de potência. De modo geral, o envelhecimento de um varistor pode ser dividido na evolução de dois componentes da corrente de fuga:

- Devido à aplicação contínua de tensão em frequência industrial;
- Devido à descargas de surtos atmosféricos e de manobra.

A evolução da I_{fuga} de um varistor pode ser expressa pela Equação 4.1 [4.5]:

$$I_F(t) = I_{F0} (1 + H\sqrt{t}) + I_a(t) + MI_{F0} \quad (4.1)$$

Onde:

$I_F(t)$: corrente de fuga para o instante t [ms];

I_{F0} : corrente de fuga inicial [mA];

H : constante de proporcionalidade;

$I_a(t)$: decréscimo de corrente nos resistores de terceira geração [mA];

M : acréscimo de corrente devido ao envelhecimento frente a surtos.

Os varistores de primeira possuíam uma característica de elevação contínua da corrente de fuga o que permite a aplicação geral dos Modelos de Arrhenius, onde a propriedade monitorada que define a idéia e conceito de envelhecimento varia com o inverso da temperatura ambiente. O uso de aditivos e modificações nos modos de sinterização deu origem aos varistores de segunda geração, cuja característica era de uma elevação inicial da corrente de fuga, seguida por uma estabilização. Após o período de estabilização, o valor da corrente de fuga voltaria a se elevar resultando em um novo processo de envelhecimento. Nos varistores de terceira geração a adição de outros aditivos resultou em uma redução no período para a estabilização da corrente de fuga e um maior período de tempo de estabilidade que nos de segunda geração, inclusive com valores de corrente de fuga inferiores após a estabilização.

O problema neste caso é relacionado ao valor do coeficiente ou modelo que descreve o acréscimo de corrente devido a descargas de surtos atmosféricos ou de manobra. A solução para tal necessita de certo número de ensaios e do conhecimento da suportabilidade dos resistores frente a um único impulso. Este parâmetro deve ser a princípio obtido do resistor protótipo.

Deste modo, durante as etapas iniciais do projeto de um resistor não linear, é usual afirmar que o bom desempenho em tensões em frequência industrial representa a possibilidade de um comportamento semelhante frente a impulsos atmosférico e de manobra.

4.3 – MECANISMOS DE FALHA DOS PARA-RAIOS

Para-raios a óxido metálico podem entrar em modo de falha como o resultado final de um processo de envelhecimento ou devido à absorção de energia, ou seja, pode acontecer tanto por falha direta do bloco quanto por exceder o limite de estabilidade térmica.

4.3.1 – AVALANCHE TÉRMICA (THERMAL RUNAWAY) ^[4.6]

Em condições normais de operação quando o para-raios é energizado à sua MCOV e na ausência de sobretensões, há um balanço entre o calor gerado pelos blocos de ZnO e o calor dissipado pelo para-raios através da condução, convecção e radiação, tal que uma condição estável é mantida. Sobretensões causam distúrbios nesta condição estável quando o para-raios absorve níveis maiores de energia para um limite de tempo, resultando na elevação da temperatura dos blocos de ZnO.

Para-raios a ZnO absorvem energia apenas para tensões acima da tensão de referência. Quando a sobretensão cai a níveis inferiores, a dependência negativa com a temperatura se torna significativa, isto é, quanto maior a temperatura, maiores as perdas geradas nos blocos de ZnO devido à corrente de fuga. Após a absorção do surto o para-raios volta ao estado onde é energizado à sua MCOV, mas os blocos estão significativamente mais quentes. O para-raios então se resfria até a temperatura inicial antes da sobretensão. Esta habilidade de resfriamento, que depende do calor dissipado pelo projeto de para-raios, é maior que o calor gerado pelo MCOV. Ou seja, ele é termicamente estável.

Por outro lado, se a elevação de temperatura dos blocos de ZnO crescer muito com a absorção de energia, o para-raios pode entrar em avalanche térmica, condição na qual o calor gerado excede o calor dissipado, elevando a temperatura do varistor, resultando na geração de perdas ainda maiores e assim por diante. Este tipo de efeito avalanche pode terminar de duas formas: ou por ruptura elétrica e falha do para-raios, ou por desligamento do sistema antes que isto aconteça.

As condições críticas para a ocorrência ou não da avalanche térmica dependem dos seguintes parâmetros:

1) A tensão de operação real após a sobretensão. Em caso de faltas, a queda de tensão por um tempo significativo ($\approx 1/2$ hora), o que dificilmente é a questão. Este fato é verdade para projetos razoáveis de para-raios e características dos resistores não lineares a óxido metálico, em aplicações onde a tensão de operação real é bem menor que sua MCOV, em torno de 0,5 p.u. da tensão do para-raios ao invés do típico 0,8 p.u.

2) As perdas reais dos resistores à temperaturas elevadas e MCOV. Tais características de baixas correntes podem variar muito entre fabricantes.

3) A dissipação de calor característica do para-raios real. A maior parte da dissipação acontece por condução via flanges terminais.

4) Temperatura inicial dos resistores. Todos os ensaios de tipo da IEC e IEEE/ANSI começam com a temperatura de 60 °C, que poderia ser maior para aplicações ao ar livre e também sob poluição.

As características térmicas podem ser facilmente calculadas para a maioria dos casos em que importam apenas a absorção de energia total, as perdas de potência sob MCOV real para diferentes temperaturas e as características de resfriamento do para-raios real. Não importa quais tipos de sobretensão que geram a absorção de energia. A única exceção é a absorção de energia de longa duração das tensões em frequência industrial, onde uma dissipação de calor significativa pode ocorrer durante a sobretensão real.

A poluição também pode provocar a avalanche térmica, mas um para-raios de multi unidades não pode apresentar uma avalanche térmica em uma unidade apenas. As temperaturas entre as unidades são balanceadas entre si, embora isto possa iniciar outro fenômeno como a ruptura durante eventos sob poluição.

A temperatura limite de estabilidade térmica, para um para-raios típico, sob a MCOV de 0,8 vezes a tensão de referência está tipicamente entre 150 °C e 250 °C.

4.3.2 – FALHA DIRETA DOS RESISTORES NÃO LINEARES DE ÓXIDO METÁLICO

Os resistores a óxido metálico podem falhar de várias maneiras, mas tudo começa com o sobreaquecimento das regiões de contorno dos grãos de ZnO até a ocorrência de danos térmicos-mecânicos na forma de fragmentação (cracking), perfuração (puncture) ou descarga de contorno no bloco. Isto ocorre se a densidade de energia for alta o suficiente ou distribuída não uniformemente. Este fato é possível mesmo que a elevação de temperatura total dos elementos não seja alta o suficiente para levar o para-raios à avalanche térmica. A alta não linearidade dos resistores e a ausência de redundância nos para-raios implica que, em caso de falha em um bloco, todo o para-raios falha. Portanto, é sempre o resistor não linear mais frágil que determina a capacidade de absorção de energia de um para-raios ^[4.6].

A capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico para os diferentes mecanismos de condução ainda são discutíveis, mas em geral varia com a duração e amplitude de corrente de surto seguindo uma curva tipo banheira. Nestes resistores a amplitude da corrente muda de acordo com os caminhos nas regiões de contorno locais devido aos diferentes mecanismos de condução entre os grãos de ZnO.

O número de surtos de corrente também deve ser levado em conta. Um único impulso é sempre pior que impulsos múltiplos com a mesma energia total e amplitude de corrente, pois a alta condutividade térmica do ZnO permite que, no próximo surto, a temperatura na região de contorno dos grãos esteja menor. Isto quer dizer que para solicitações em frequência industrial a capacidade de absorção de energia aumenta comparada com os surtos atmosféricos e de manobra.

4.4 – COMENTÁRIOS

Os processos de envelhecimento e os mecanismos de falha dos para-raios podem ser, ou não, dois fenômenos interligados. Por um lado, a degradação resultante do envelhecimento favorece a ocorrência de falha, seja por avalanche térmica ou por falha direta do resistor. Por outro lado, a falha prematura de um para-raios pode acontecer mesmo antes que a degradação inerente ao processo de envelhecimento se faça presente. Bastando para tal que a energia injetada por um surto seja superior à sua capacidade de absorção de energia.

Para o envelhecimento frente a surtos a principal referência ultrapassa os 25 anos, período no qual a tecnologia dos para-raios a óxido metálico sofreu inúmeras alterações, tanto quanto a disponibilidade de equipamentos para ensaio. As possibilidades oferecidas por instrumentos de leitura disponíveis atualmente permitem a avaliação mais rápida de outras variáveis como a alteração na potência dissipada pelo varistor em função do número de surtos aplicados.

Quanto à leitura da corrente de fuga, há recomendações de normas internacionais para a utilização de corrente alternada, e outras para a utilização de corrente contínua, o que precisaria de um trabalho dobrado para verificar o fenômeno de polarização causado pela aplicação de surtos. Este trabalho, no entanto, considera a leitura dos picos de tensão alternada.

De forma semelhante a [4.3], esta tese avalia o envelhecimento frente a surto dos resistores não lineares com base na variação do componente ativo de sua corrente de fuga quando submetido à sua tensão de referência. No entanto, a aplicação dos impulsos de corrente se difere no fato de que, no instante da aplicação, o varistor está desenergizado. Durante a leitura de corrente de fuga, os recursos dos instrumentos digitais permitiram a leitura da potência dissipada. Ou seja, um parâmetro complementar a ser avaliado, conforme procedimentos orientativos adotados por fabricantes.

Quanto aos níveis de corrente aplicada, a menor amplitude considerada foi a nominal. Foram aplicados impulsos com ordem crescente e amplitude máxima de 3,0 p.u.

A considerar o comportamento dos impulsos de amplitude elevada recomendados pelas normas nacionais e internacionais, os resultados de um ensaio de alta corrente têm por objetivo verificar se a capacidade de absorção de energia da amostra é suficiente para manter sua integridade, normalmente na forma física. No entanto, não existem recomendações a respeito do quanto esta amostra pode ser envelhecida com este procedimento, ou se ainda existem condições para a operação segura das unidades.

Outro detalhe a ser observado é a tensão residual apresentada por uma amostra que conduz uma corrente de descarga em torno de 10 vezes o seu valor nominal.

Considerando uma ocorrência desta amplitude em campo, a tensão residual ainda seria inferior à tensão suportável pelo equipamento protegido?

4.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 4

- [4.1] N.M. Vong, D.M. Ryder, R. Miller – “Mult-factor Ageing of Metal Oxide Varistors”, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1994. IEEE 1994 annual Report, Conference on. Volume, issue, 26-26 oct 1994 Pages 406-411.
- [4.2] Tominaga, S.; et al; “Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters”; IEEE – F79-637-07 –Summer Meeting, 1979.
- [4.3] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [4.4] Nishiwaki, S., et al.; “Study of Thermal Runaway Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester”, IEEE – PAS 104 – pp. 2665 – 2673, 1985.
- [4.5] M.L.B. Martinez, “Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação”, Tese de Doutorado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 1998.
- [4.6] Bengt Johnnerfelt, “Energy handling Capability of ZnO Arresters for Lightning, Switching, Power Frequency Voltages, and Capacitor Banks” MSA/ABB (Japan).

CAPÍTULO 05

MÉTODO DE ANÁLISE E INVESTIGAÇÃO

A maioria das informações disponíveis sobre a degradação de varistores e para-raios a ZnO é baseada em estudos e ensaios e envelhecimento acelerado, nos quais, esforços elétricos são aplicados em laboratórios sob diferentes condições.

P.M. Vipin et. al. ^[5.1] simularam em laboratório as condições operativas de um para-raios em campo para avaliar sua degradação frente à tensão de operação, somada à degradação devido a surtos. O procedimento visou simular um típico ciclo de solicitações transitórias considerando descargas diretas de 50 kA – 4/10 μ s – uma ocorrência por ano; descargas indiretas de 5, 10 e 20 kA – 8/20 μ s – com 18, 5 e 2 ocorrências por ano, respectivamente; e surtos de manobra de 1 kA – 2,4 ms – uma ocorrência por ano. Enquanto os surtos eram aplicados, o para-raios era mantido à máxima tensão de operação contínua, tanto a.c. quanto d.c. à temperatura de 60°C para simular os prováveis efeitos do campo como a temperatura ambiente, radiação solar e influência da poluição no invólucro.

Como critérios de avaliação os autores utilizaram a variação da corrente de fuga, barreira de potencial, capacitância e $\tan \delta$ para 10 ciclos de operação. Apesar dos resultados dispersos a corrente de fuga apresentou um incremento significativo após sucessivos ciclos de envelhecimento. A barreira de potencial apresentou uma queda significativa após 6 a 8 ciclos de envelhecimento. A capacitância apresentou uma tendência ao decréscimo, e a $\tan \delta$, a cada ciclo de envelhecimento apresentou valores completamente aleatórios.

Os autores concluem que a corrente de fuga é o melhor índice de degradação, apresentando uma variação previsível com sucessivos ciclos de envelhecimento. No entanto, não mencionaram se este parâmetro foi considerado em corrente contínua, ou, se em corrente alternada, o pico positivo, negativo, o valor médio entre eles, ou o valor eficaz.

A. M. Plata, et. al. ^[5.2], através de análises com raio X sugerem que a degradação induz mudanças nas regiões de fronteira entre os grãos de Bi_2O_3 e ZnO , produzindo um “inchaço” na treliça da estrutura molecular devido à dissolução de íons relativamente grandes de Bi^{3+} causados pela transferência de energia para o material durante o processo de degradação.

O ensaio de impulso de corrente de longa duração pode fornecer informações valiosas sobre a vida útil dos para-raios a óxido metálico se aplicados com altos níveis de energia ^[5.3]. Embora não mencionado em norma, a maioria dos fabricantes adota este procedimento (8 vezes em dado ensaio) com base no ensaio de suportabilidade à corrente de longa duração com um tempo fixo de 2 ms sob a máxima amplitude de corrente permitida neste intervalo.

A deterioração dos varistores tem como efeito a elevação da corrente de fuga resistiva e o conseqüente aumento do componente de terceiro harmônico. O monitoramento do estado do para-raios pode então ser realizado através da análise do componente resistivo da corrente de fuga ^[5.4].

A presente tese avalia o envelhecimento frente a surtos dos resistores não lineares a óxido metálico com base nas alterações de sua corrente de fuga após sucessivos ensaios normalizados de impulso de corrente, representativos dos surtos em campo. No entanto, as amostras não foram submetidas à tensão em frequência nominal no momento de cada impulso, como no ensaio de ciclo de operação.

Este procedimento seria interessante para a verificação da estabilidade térmica do para-raios, o que não é o foco desta pesquisa. No mais, a adoção deste procedimento requer equipamentos com os quais a atual estrutura não conta.

5.1 – DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS

Fujiwara et. al. ^[5.5] afirmam que o envelhecimento de um resistor a óxido metálico é função da forma de onda, da densidade de corrente que o atravessa e da temperatura a que é submetido.

Este trabalho então propõe o levantamento de parâmetros a partir de resultados de ensaios sistematicamente executados em varistores classe 2. Os parâmetros iniciais foram levantados com o ensaio de corrente de fuga nas amostras virgens, e a alteração de seus valores foi observada a cada ensaio de impulso de corrente aplicado, novamente com

o ensaio de corrente de fuga. Em adição aos picos positivos e negativos do componente resistivo da corrente de fuga foram também registrados os valores da potência consumida.

5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio é composto por dois ensaios consecutivos em forma cíclica. Ou seja, corrente de fuga seguido de impulso, até que não seja fisicamente e/ou estatisticamente possível realizar um dos dois. Não existem recomendações em norma sobre a execução deste procedimento. O procedimento de ensaio de corrente de fuga e impulso de corrente pode ser resumido conforme o diagrama da Figura 5.1. Este ciclo foi mantido até que o número de amostras excluídas fosse maior ou igual a um terço do número inicial. O critério para a exclusão de amostras foi a sua destruição física ou valores de corrente de fuga ou potência dissipada maior que a escala máxima do equipamento.

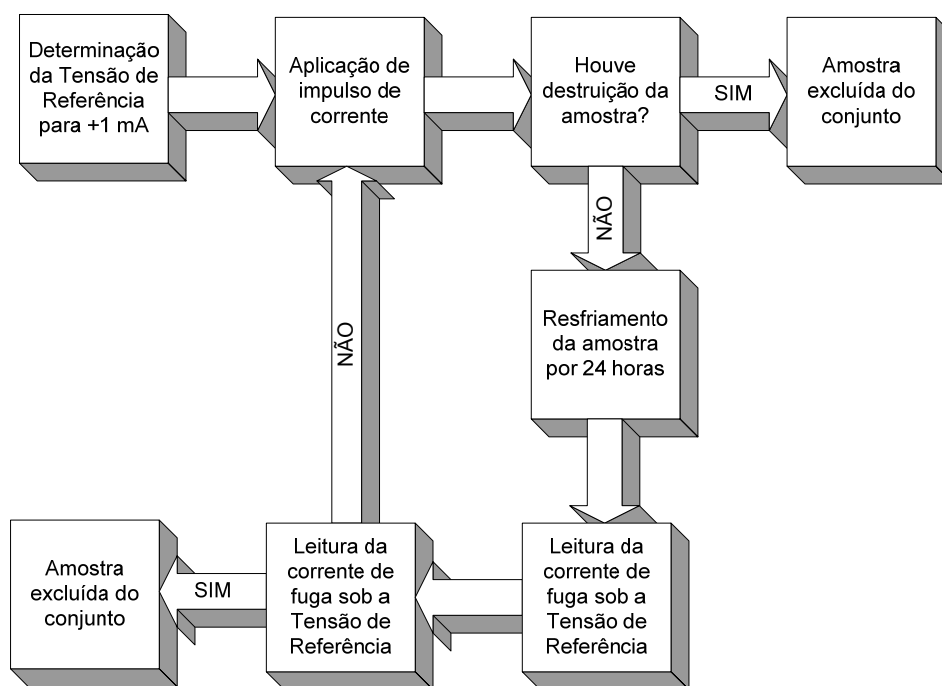


Figura 5.1 – Seqüência de ensaios de corrente de fuga e impulso de corrente

5.3.1 – CORRENTE DE FUGA

Este ensaio foi executado aplicando-se à amostra virgem um valor de tensão em 60 Hz necessário para que o pico positivo do componente resistivo das correntes de fuga, I_f , apresentasse o valor de 1 mA. Este valor foi denominado U_f . Sob este valor de corrente de fuga também foram registrados os valores da potência dissipada W_f e do pico de corrente negativo I_{-f} correspondentes.

Após cada aplicação de impulso de corrente, as amostras eram submetidas a um resfriamento natural durante 24 horas antes da próxima leitura de corrente de fuga e potência dissipada – à temperatura ambiente – sob a aplicação da tensão de referência U_f .

A aplicação de tensão e a leitura destes valores foram realizadas com um módulo de ensaio projetado especificamente para este fim. Este módulo é composto por um amplificador de potência utilizado para elevar o sinal em 60 Hz produzido por um gerador de funções. O sinal amplificado alimenta os terminais de baixa tensão de um transformador de potencial que fornece a tensão aplicada à amostra.

A leitura da tensão aplicada é lida pelo osciloscópio através do divisor de tensão. O valor da corrente de fuga é lido através de um resistor shunt ligado em série com o terminal aterrado do para-raios também com um osciloscópio digital. O valor da potência dissipada foi obtido através do produto dos valores instantâneos de tensão e corrente fornecidos através da função matemática do próprio osciloscópio.

A Figura 5.2 mostra o esquema de funcionamento do módulo de ensaio de corrente de fuga, onde:

1. Fonte de tensão em c.a.;
2. Gerador de funções;
3. Amplificador de potência;
4. Transformador de potencial;
5. Amostra sob ensaio;
6. Resistor shunt para leitura da corrente de fuga;
7. Divisor de tensão;
8. Osciloscópio.

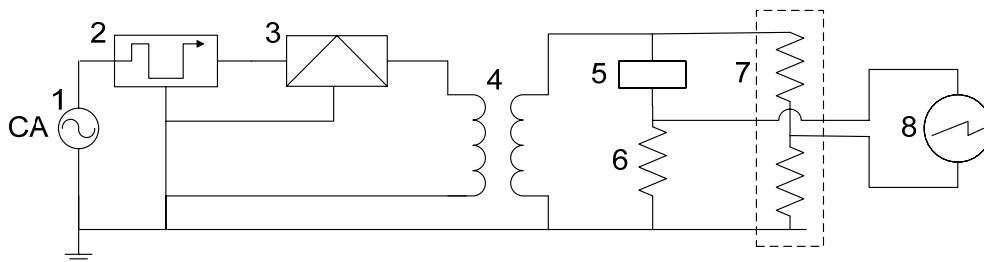


Figura 5.2 – Módulo de ensaios de corrente de fuga

Para a conexão ao circuito da Figura 5.2 as amostras foram inseridas em um suporte de nylon contendo eletrodos metálicos nas partes superior e inferior. Suportes semelhantes foram utilizados para a aplicação dos impulsos de corrente. Neste caso as amostras em número de cinco eram inseridas nestes suportes e levadas ao forno elétrico para aquecimento. A temperatura era monitorada através de termopares inseridos por furos nos suportes de nylon e do registrador gráfico para melhor visualizar a estabilização da temperatura. No caso dos impulsos de corrente com as amostras a 60 °C e a 80 °C a perda de calor era insignificante considerando a isolamento térmica do nylon em relação ao tempo necessário para a aplicação do impulso.

5.3.2 – IMPULSO ATMOSFÉRICO DE CORRENTE

As amostras possuem área de seção de 2000 mm^2 , e foram ensaiadas com valores de corrente de 10, 15, 20 e 30 kA. Este procedimento foi tomado em três temperaturas distintas: ambiente, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Estas combinações resultaram em doze combinações e, em cada uma, foram utilizadas 15 amostras de varistor a óxido metálico, conforme resumido pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Ensaio de Impulso de corrente

Ensaio de Impulso de corrente 8 x 20 μs			
Densidade de corrente [A/mm^2]	Corrente [kA]	Nº máximo de aplicações por amostra	Nº de amostras
5,0	10	100 ou até destruição de 1/3 das amostras	15
7,5	15		
10,0	20		
15,0	30		
Cada aplicação intercalada por um ensaio de corrente de fuga			
Procedimento tomado para temperaturas ambiente, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$ em amostras distintas			

Os impulsos de curta duração foram aplicados na forma 8/20 μs . Ou seja, tempo de frente de 8 μs e tempo de cauda de 20 μs . A Figura 5.3 mostra a forma genérica de um impulso de corrente, onde I é a amplitude da crista da corrente de impulso. Devido às oscilações que podem ocorrer no início da forma de onda, considera-se o tempo de frente como sendo $1,25 \times T_1$, ou seja, o intervalo de tempo entre os pontos de 10 % e 90 % do valor de pico (80 % do tempo total). O tempo de cauda, T_2 , é o intervalo decorrido entre o zero virtual e o instante em que o valor da corrente decresce até 50 % do valor de crista. O zero virtual é o ponto onde a reta determinada pelos pontos $0,9.I$ e $0,1.I$ corta o eixo X.

As tolerâncias para os tempos de frente e de cauda para os impulsos de corrente na forma 8/20 μs são de $\pm 10\%$.

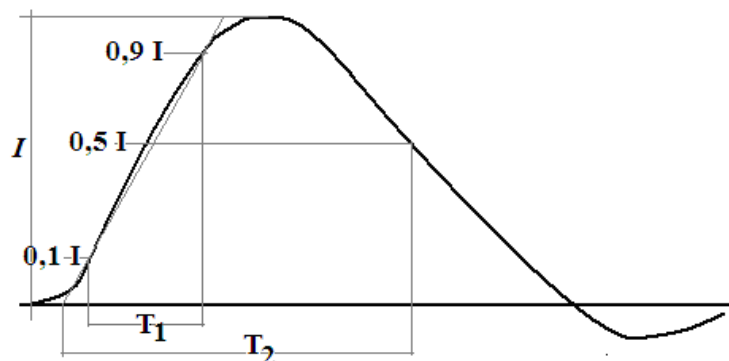


Figura 5.3 – Forma de onda de impulso de corrente de curta duração

Para os ensaios de impulso de corrente foi utilizado o gerador de corrente de curta duração impulsos 80 kA–50 kV–50 kJ do Laboratório de Alta Tensão da Universidade

Federal de Itajubá – LAT-EFEI. A Figura 5.4 mostra simplificada o princípio de funcionamento de um gerador de impulsos de corrente, onde:

- 1: Fonte de tensão em corrente alternada;
- 2: Resistor;
- 3: Diodo;
- 4: Capacitor de carga;
- 5: Centelhador;
- 6: Indutor;
- 7: Amostra

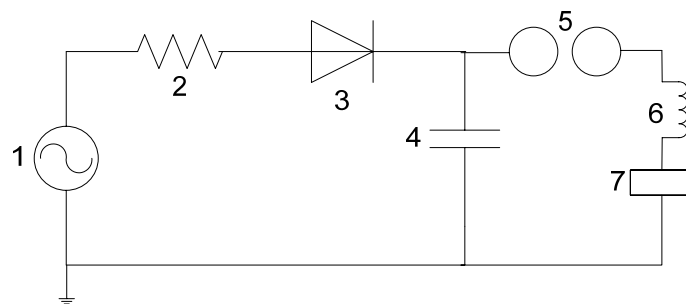


Figura 5.4 – Gerador de impulso de corrente de curta duração

Na Figura 5.4, a fonte 1 carrega o capacitor através do diodo 3. O resistor 2 tem a função de limitar a corrente de carregamento. Quando a tensão no capacitor atinge o valor necessário para fornecer a corrente determinada, o diodo é desligado do circuito, e o centelhador 5 fecha o circuito, e toda a carga do capacitor se descarrega na amostra 7 que se encontra em série com o indutor de amortecimento.

5.4 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram executados com a aplicação de uma amplitude de corrente em todas as temperaturas contempladas. Esta opção visou o melhor aproveitamento do ajuste do gerador de impulsos de corrente. A primeira amplitude a ser contemplada em todas as temperaturas possíveis, em ordem crescente foi de 10 kA. Os impulsos foram aplicados até o número máximo de 100, como no caso para as amostras de 10 kA ambiente, ou até a destruição de um terço das amostras, o que, para as amplitudes de 15 kA e 20 kA, aconteceu por volta da vigésima aplicação. Para a amplitude de 30 kA, o número máximo de aplicações foi 7.

5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A análise estatística dos resultados considera as 15 amostras de cada grupo. Os valores de cada ensaio de corrente de fuga são normalizados em relação ao valor apresentado no primeiro ensaio, ou seja, antes da aplicação do primeiro impulso de

corrente. Esta representação dos valores por unidade (p.u.) elimina a sobreposição de valores entre as amostras e as diferenças entre seus parâmetros iniciais.

A Tabela 5.2 mostra a evolução dos parâmetros lidos nos ensaios de corrente de fuga – zero a dez – de um varistor a ZnO submetido a impulsos de 10 kA a 60 °C. Na coluna “Valores absolutos” estão, respectivamente, a leitura dos valores dos picos positivo e negativo da corrente de fuga, e da potência dissipada. Na coluna “Valores normalizados” estão os mesmos valores em p.u.

Tabela 5.2 – Dez primeiros impulsos de 10 kA a 60 °C de uma amostra

IMPULSO	VALORES ABSOLUTOS			VALORES NORMALIZADOS		
	[mA]		[mW]	p.u.		
	I FUGA 1+	I FUGA 1-	POTÊNCIA	I FUGA 1+	I FUGA 1-	POTÊNCIA
0	1,00	-1,04	592	1,00	1,00	1,00
1	1,17	-1,76	850	1,17	1,69	1,44
2	1,16	-1,86	881	1,16	1,79	1,49
3	1,20	-1,95	908	1,20	1,88	1,53
4	1,15	-1,88	860	1,15	1,81	1,45
5	1,04	-1,66	798	1,04	1,60	1,35
6	1,06	-1,78	826	1,06	1,71	1,40
7	1,00	-2,22	946	1,00	2,13	1,60
8	1,13	-2,20	959	1,13	2,12	1,62
9	1,03	-2,22	958	1,03	2,13	1,62
10	1,27	-2,26	1024	1,27	2,17	1,73

Os valores em p.u de todas as 15 amostras, em cada ensaio, foram submetidos a duas análises estatísticas. A primeira considerou os valores apresentados por todas as amostras após a aplicação de um impulso segundo os critérios do Boxplot, através do software Minitab®. O recurso Boxplot é utilizado para comparar a distribuição das amostras conforme ilustrado na Figura 5.5 onde ^[5,6]:

- A: Outlier – Observação de valor grande de maneira fora do usual. Valores além dos traços de extensão são outliers.
- B: De acordo com o padrão, o traço de extensão superior avança até o valor adjacente – o dado de maior valor dentro do limite superior expresso por: $Q3 + 1,5(Q3 - Q1)$
- C: De acordo com o padrão, o topo da caixa é o terceiro quartil (Q3), onde 75 % dos dados são menores ou iguais a ele.
- D: Media – O valor central dos dados. Metade dos dados são menores ou iguais a este valor.
- E: Pelo padrão, o fundo da caixa é o primeiro quartil (Q1) onde 25% dos dados são menores ou iguais a este valor.

- F: Conforme o padrão, o traço de extensão inferior avança até o valor adjacente – o menor valor dentro do limite inferior dado por $Q1 - 1,5(Q3 - Q1)$.
- G: Outlier – Observação de valor pequeno de maneira fora do usual. Valores além dos traços de extensão são outliers.

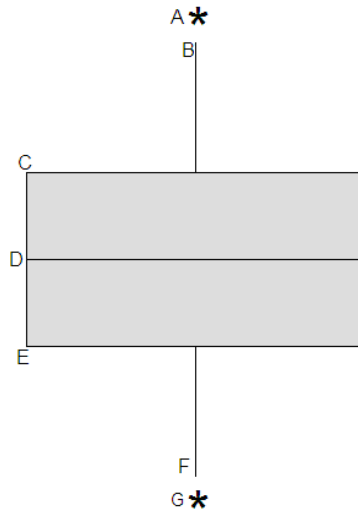


Figura 5.5 – Ilustração da análise do Boxplot

Realizado o controle estatístico através do Boxplot, a segunda análise é a identificação da distribuição individual considerando a distribuição logística. São verificados os limites de confiança – de 95% – para os dados levantados. São então tomados os valores mínimo, médio e máximo relativos à probabilidade de 50% de ocorrência.

A Figura 5.6 mostra o exemplo de uma identificação de distribuição individual utilizando a aproximação levantada com o software Minitab®, e a Figura 5.7 mostra a tabela de valores referentes ao gráfico da Figura 5.4. O exemplo refere-se ao pico positivo após a terceira aplicação do impulso de 20 kA a 60 °C nas 15 amostras.

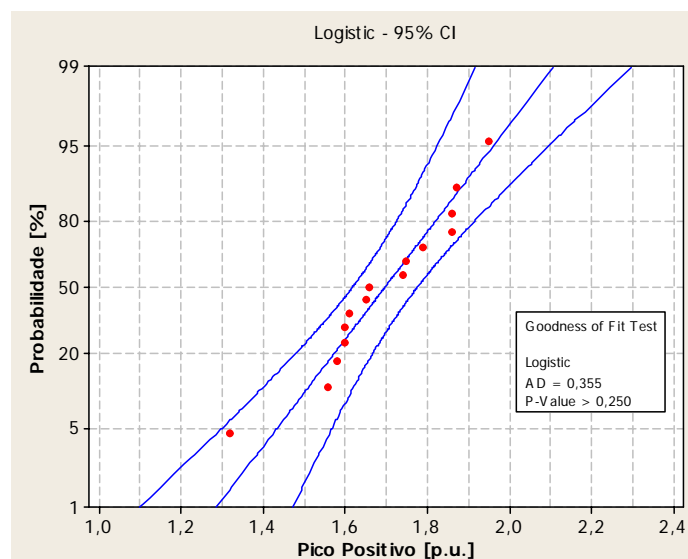


Figura 5.6 – Análise da distribuição individual – gráfico com intervalos de confiança 95%

Percent	C1	Lower Bound	Upper Bound
1	1,28707	1,10021	1,47392
2	1,34978	1,18617	1,51338
3	1,38684	1,23655	1,53714
4	1,41342	1,27240	1,55444
5	1,43425	1,30031	1,56819
6	1,45145	1,32321	1,57969
7	1,46615	1,34266	1,58964
8	1,47902	1,35959	1,59845
9	1,49050	1,37460	1,60640
10	1,50088	1,38809	1,61366
20	1,57318	1,47940	1,66697
30	1,62125	1,53647	1,70602
40	1,66064	1,58024	1,74104
50	1,69680	1,61759	1,77601
60	1,73295	1,65210	1,81380
70	1,77235	1,68669	1,85800
80	1,82041	1,72532	1,91549
90	1,89271	1,77821	2,00722
91	1,90309	1,78543	2,02076
92	1,91457	1,79333	2,03581
93	1,92744	1,80210	2,05278
94	1,94214	1,81200	2,07228
95	1,95934	1,82346	2,09522
96	1,98017	1,83716	2,12319
97	2,00675	1,85441	2,15909
98	2,04382	1,87811	2,20952
99	2,10653	1,91749	2,29556

Figura 5.7 – Análise da distribuição individual – tabela com intervalos de confiança 95%

Após a análise, os valores representam estatisticamente o desenvolvimento da degradação dos resistores não lineares a óxido metálico frente a surto através da leitura da corrente de fuga com a tensão de referência. Como exemplo, a Tabela 5.3 mostra, os valores mínimo, médio e máximo de corrente de fuga sob a tensão de referência de 1 mA para as 15 amostras ensaiadas com 20 kA de impulso sob uma temperatura de 60 °C, obtidos pela distribuição de probabilidade logística como exemplificado na Figura 5.4.

Tabela 5.3 – Dez impulsos de 20 kA a 60 °C para as 15 amostras

IMPULSO	1 mA POSITIVO [mA]			1 mA NEGATIVO [mA]		
	MIN	MED	MAX	MIN	MED	MAX
0	1	1	1	-1	-1	-1
1	1,64508	1,67762	1,71017	-1,89537	-1,84169	-1,78800
2	1,62831	1,67698	1,72565	-2,02247	-1,95280	-1,88312
3	1,61759	1,69680	1,77601	-2,06795	-1,98624	-1,90453
4	1,67293	1,76019	1,84746	-2,09967	-2,00894	-1,91821
5	1,61561	1,71059	1,80557	-2,22650	-2,07207	-1,91764
6	2,16444	2,28090	2,39737	-2,68816	-2,55206	-2,41597
7	2,14104	2,26792	2,39480	-2,69784	-2,56385	-2,42987
8	2,82916	3,00701	3,18486	-3,87069	-3,69934	-3,52799
9	3,05845	3,28107	3,50369	-4,17482	-3,98303	-3,79124
10	2,92565	3,18316	3,44068	-4,13774	-3,91037	-3,68300

5.6. COMENTÁRIOS

O elevado número de aplicações necessário para que as amostras apresentassem algum sinal de degradação confirma o valor de 10 kA, como a corrente nominal de descarga das amostras ensaiadas. Por outro lado, as aplicações de 15 kA mostram que o varistor pode operar em solicitações ocasionalmente mais elevadas sem apresentar, aparentemente, maiores problemas.

A alteração nos parâmetros para as amplitudes de 20 kA e 30 kA, em combinação com temperaturas mais elevadas, como 60 °C considerada normal de operação pelas normas internacionais, mostra que mais do que degradação, causam a destruição física dos resistores não lineares.

5.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5

- [5.1] P.M. Vipin, N.K. Kishore, G.R. Nagabhushana and B.N. Jayaram “Degradation of metal Oxide Surge Arresters Under Simulated Natural Conditions” Proceedings of XVI Annual Convention and Exhibition of the IEEE In India - 1990 Page(s): 165 – 169.
- [5.2] Plata, A.M, Ponce, M.A, Rios, M, De la Rosa, Castano, V.M. “Degradation of ZnO Base Surge Arresters Under Field Conditions”. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings – Volume 143, issue 5, sep/1996, pages 291-297.
- [5.3] Volker Hinrichsen, Max Reinhard, Bernhard Richter, “Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-oxide Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards”, Cigrè International Colloquium September 12th-13th, 2007, Rio de Janeiro – Brazil.
- [5.4] Shirakawa, S., et al., “Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No 3 pp 998-1003.
- [5.5] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [5.6] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., *Applied Statistics and Probability for Engineers* – USA – 3rd edition – John Wiley & Sons, Inc. 702 p.

CAPÍTULO 06

ENVELHECIMENTO DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO – ANÁLISE GRÁFICA

Neste capítulo, o envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico frente a surtos de curta duração é analisado através da representação gráfica dos parâmetros considerados – picos positivo e negativo de corrente, média dos picos de corrente, e potência dissipada, em função do número de impulsos de corrente aplicados. A análise contempla cada uma das amplitudes nas três temperaturas consideradas e, ao final, são ilustrados os efeitos da amplitude e da temperatura no envelhecimento das amostras.

As equações apresentadas representam as melhores aproximações conforme a avaliação do software TableCurve™.

6.1. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 10 kA

6.1.1. PICO POSITIVO

O valor do pico positivo da corrente de fuga considera apenas o seu componente ativo, ou seja, o valor instantâneo do semiciclo positivo em fase com a onda de tensão.

A Figura 6.1 mostra a evolução do pico positivo da corrente de fuga em função do número de impulsos de 10 kA aplicados nas amostras à temperatura ambiente. O gráfico da esquerda considera os 100 impulsos aplicados. E visando a comparação com as amplitudes de 15 kA e 20 kA, o gráfico da direita baseia-se apenas nos 20 primeiros

impulsos. Nestes gráficos são mostrados os pontos reais e dois modelos matemáticos: o retilíneo, e o melhor modelo não linear. Os pontos reais são representados pelo valor médio e pelos seus limites de confiança (inferior e superior). A curva da Figura 6.1a segue a forma expressa pela Equação 6.1.

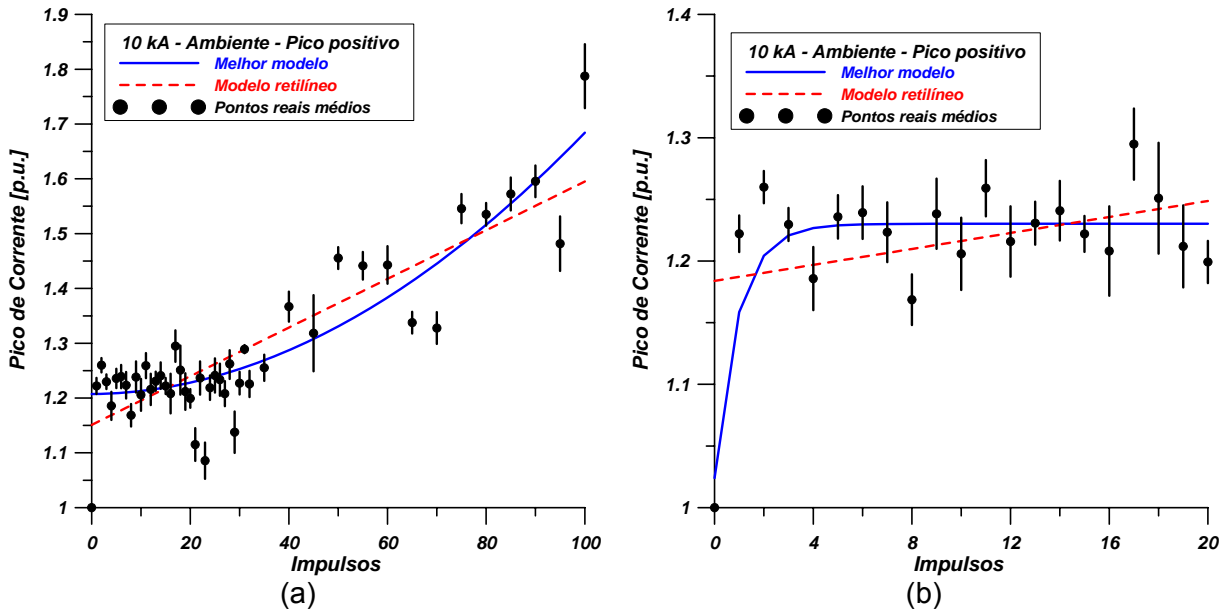


Figura 6.1 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em temperatura ambiente – (a) 100 impulsos (b) 20 impulsos

$$y = a + b \cdot x^c \quad (6.1)$$

A curva da Figura 6.1b tem a forma representada pela Equação 6.2, que foi a décima opção de representação fornecida pelo software TableCurve™. Neste caso, as oito primeiras equações apresentam divisão por zero ou logaritmo neperiano de zero, o que significa não representar o valor base dos pontos expressos em p.u. A Equação 6.1, apesar de ser a nona opção no ranking, apresenta um valor igual a -4,59, para o impulso zero, não permitindo uma visualização gráfica da dispersão dos pontos; e termina por coincidir com a reta a partir do quarto impulso. Neste caso, portanto, a representação matemática que mais se aproxima do fenômeno físico possui a forma da Equação 6.2:

$$y = \sqrt{a - b \cdot e^{-x}} \quad (6.2)$$

A diferença nas equações expressas nas Figuras 6.1a e 6.1b mostra que a representação de degradação pode levar a interpretações equivocadas. A previsão de um valor de corrente de fuga – por extrapolação – para o impulso de número 50 através da Figura 6.1b conduz a um valor inferior ao apresentado pelo modelo baseado em 100 pontos. É conveniente, então, que a degradação apresentada após 20 impulsos de 10 kA à temperatura ambiente – para fins de comparação – seja representada pelo maior número de

pontos possível. Seja então o modelo levantado com 20 pontos chamado de modelo reduzido, e o baseado em 100 pontos, de modelo pleno. De forma similar, seja aplicada a nomenclatura equivalente às aproximações retilíneas.

A Figura 6.2a mostra o modelo pleno, sobreposto pelo modelo reduzido extrapolado para $x=100$. Os modelos são diferentes no primeiro impulso, igualam-se por volta do 15º, quando o modelo reduzido já se encontra estabilizado, e assumem valores com diferenças progressivamente maiores. Por outro lado, os modelos retilíneos apresentam maior semelhança entre si, e proximidade com o melhor modelo pleno.

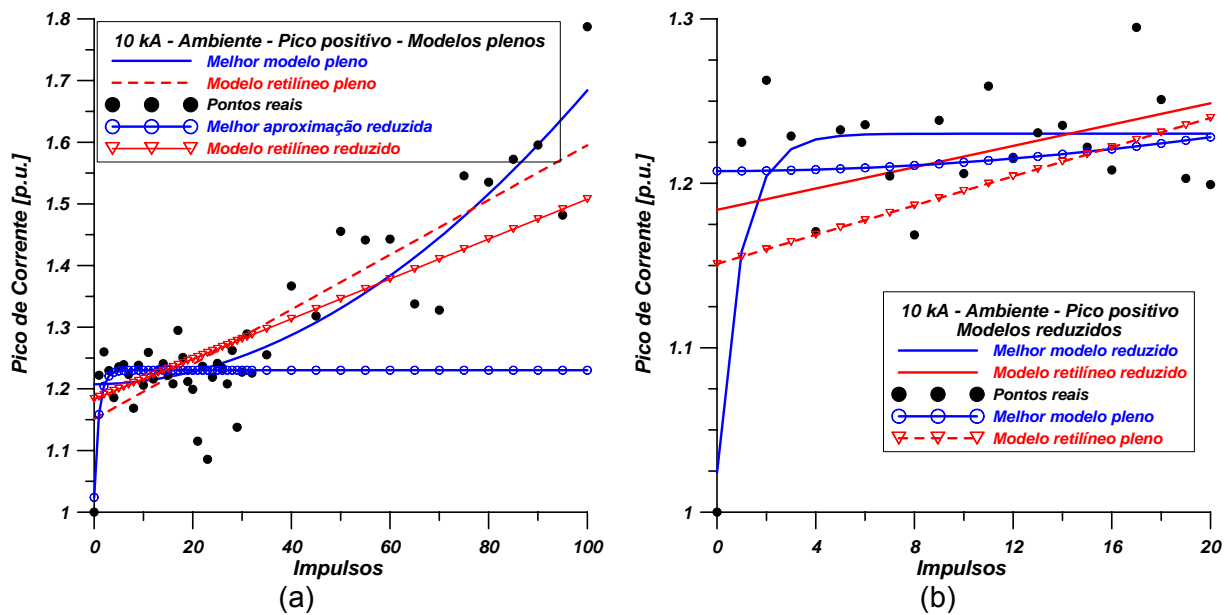


Figura 6.2 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em temperatura ambiente – Sobreposição dos modelos pleno e reduzido.

A Figura 6.2b, de maneira inversa, mostra o modelo reduzido sobreposto pelo modelo pleno representando apenas 20 impulsos. Neste caso, os modelos plenos apresentam valores inferiores aos os pontos reais e, conseqüentemente, estão abaixo dos modelos reduzidos. Apesar da diferença apresentada nos primeiros impulsos, os modelos plenos são os utilizados para a comparação com os impulsos de maior amplitude.

A Figura 6.3a e 6.3b mostram respectivamente a evolução do pico positivo da corrente de fuga para os impulsos aplicados a 60 °C. Neste caso, não é observada a diferença na forma das curvas em função do número de impulsos como ocorrido para a temperatura ambiente. Ambas seguem a Equação 6.1. A maior degradação proporcionada pela temperatura maior que a ambiente no instante do impulso pode ter levado a um comportamento mais definido, apesar da aleatoriedade dos pontos reais ser semelhante à da Figura 6.1. Na Figura 6.3a, a queda de amplitude observada no último ponto deve-se ao fato de que as amostras com os maiores valores de corrente de fuga foram estatisticamente eliminadas, reduzindo o valor médio.

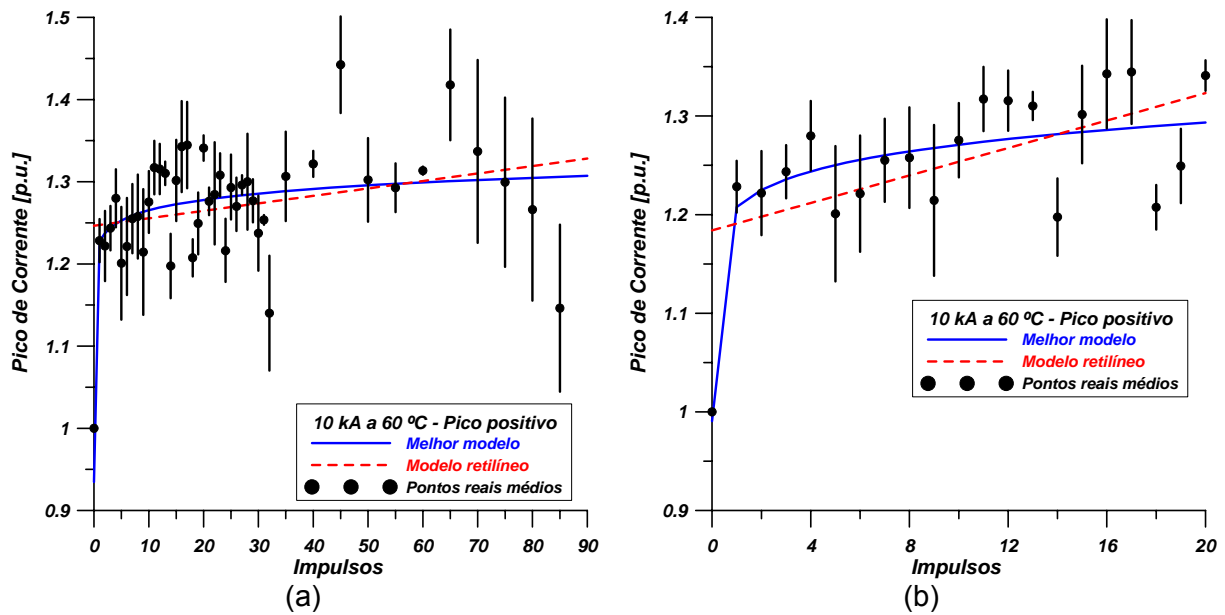


Figura 6.3 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C – (a) modelo pleno (b) modelo reduzido

A Figura 6.4a mostra os modelos plenos sobrepostos pela extrapolação correspondentes dos modelos reduzidos. Observa-se que as curvas se mantêm próximas, e que o modelo retilíneo pleno não se distancia dos melhores modelos. O melhor modelo reduzido, ao ser extrapolado, assume valores pouco acima dos representados pelo equivalente pleno. Por outro lado, o retilíneo reduzido possui maior inclinação e se distancia das outros modelos, ou seja, para um valor de corrente de fuga após 85 impulsos indica valores em torno de 50 % maior que o experimental, o que representa um estágio de envelhecimento mais avançado que o real.

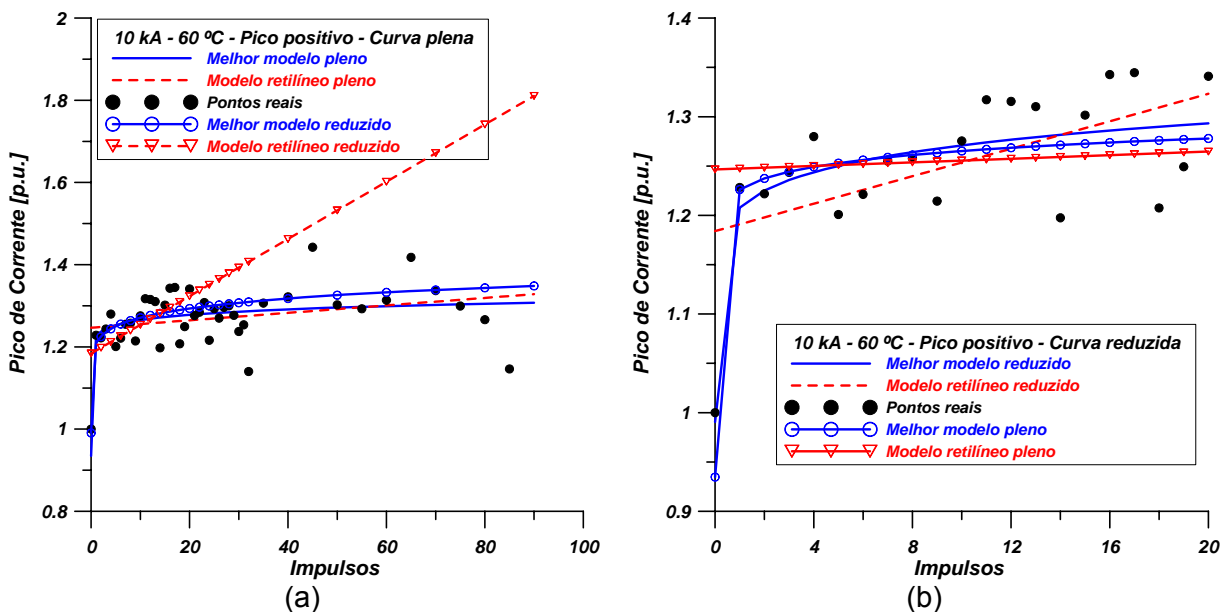


Figura 6.4 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C – Modelo reduzido sobreposto ao pleno

A Figura 6.4b mostra a proximidade dos dois melhores modelos (reduzido e pleno) entre si desde o impulso zero. A diferença nos parâmetros destas duas equações confere ao modelo reduzido uma leve tendência a assumir valores mais elevados que o real.

A Figura 6.5a mostra os modelos relativos aos impulsos de 10 kA aplicados às amostras à temperatura de 80 °C. A tendência de elevação dos valores de pico positivo da corrente de fuga em função do número de impulsos é mais definida que as anteriores, apesar da aleatoriedade permanecer. A Figura 6.5b mostra que também existe uma tendência mais definida de crescimento da corrente de fuga do que o gráfico equivalente para a temperatura ambiente.

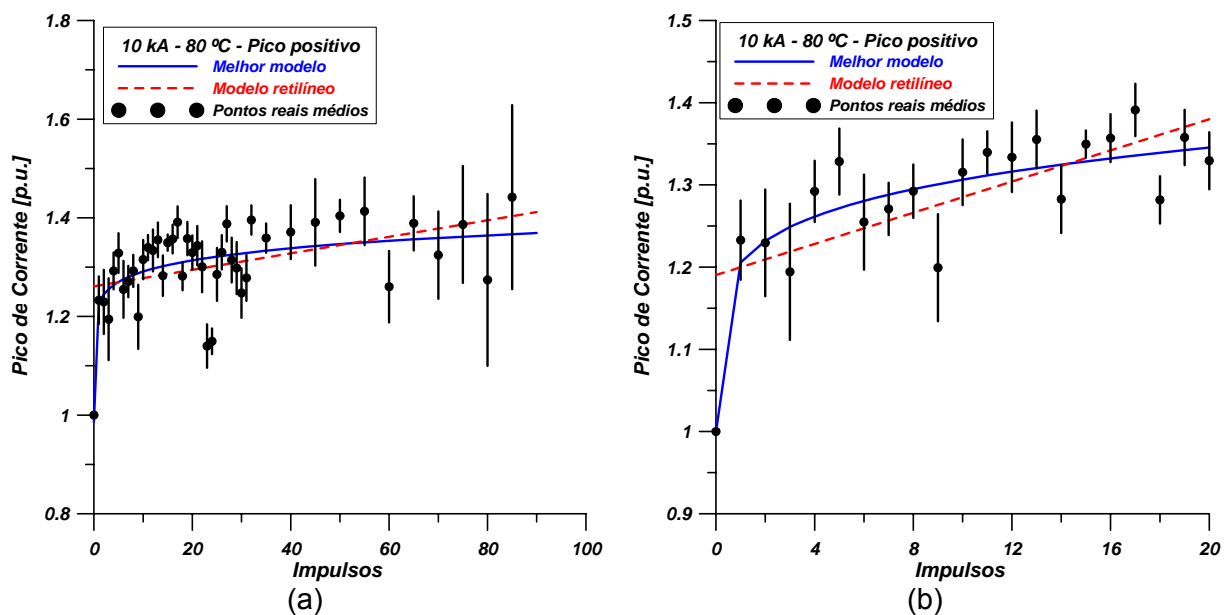


Figura 6.5 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA em a 80 °C – (a) modelo pleno (b) modelo reduzido

A Figura 6.6 mostra as sobreposições entre os modelos plenos e reduzidos para os impulsos de 10 kA aplicados nas amostras sob a temperatura de 80 °C.

Na Figura 6.6a, os modelos plenos são sobrepostos pelos modelos reduzidos equivalentes. O melhor modelo reduzido quando extrapolado assume valores sempre mais elevados que o equivalente pleno a partir do 10º impulso. O caso mais crítico é o modelo retilíneo reduzido extrapolado que assume valores progressivamente mais elevados que os pontos reais e, conseqüentemente, erros mais elevados a cada impulso.

Na Figura 6.6b os modelos reduzidos são sobrepostos pelos modelos plenos. O número reduzido de pontos permite a visualização do instante em que o melhor modelo reduzido cruza o equivalente pleno – 4º impulso – e passa a assumir valores sempre mais elevados.

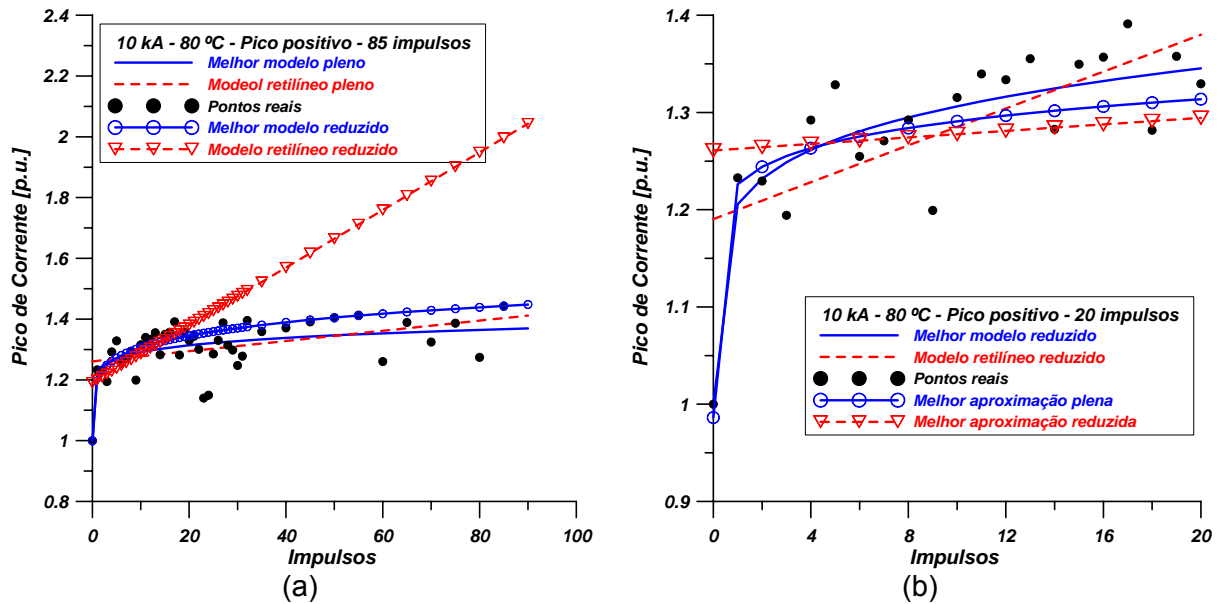


Figura 6.6 – Pico positivo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 80 ° – Sobreposição dos modelos pleno e reduzido

6.1.1.A. COMENTÁRIOS

Conforme declaração do fabricante, a corrente nominal de impulso atmosféricos das amostras é 10 kA. Para a temperatura ambiente, o “Melhor Modelo” comparado com o “Modelo Retilíneo” não se mostra consideravelmente mais próximo aos dados reais. Neste caso a afirmação feita por Fujiwara et. al. [6.1] de que a reta é a melhor representação do fenômeno em discussão pode ser observado na Figura 6.1a. No entanto, para temperaturas mais elevadas, a conclusão de [6.1], baseada na aplicação de 10 impulsos, não mais condiz com o observado, pois o modelo retilíneo traçado a partir de um número reduzido de impulsos apresenta valores completamente diferentes dos dados reais quando extrapolado.

6.1.2. PICO NEGATIVO

A Figura 6.7 mostra o comportamento do pico negativo da corrente de fuga em função do número de impulsos. Neste caso observa-se que ao invés da aleatoriedade do pico positivo, existe uma tendência crescente definida em função do número de impulsos, que evidencia o fenômeno da polarização no sentido preferencial negativo. Entre os gráficos a) e b), observa-se uma diferença na inclinação dos modelos retilíneos. Os melhores modelos, apesar da diferença nos parâmetros, são modelados pela Equação 6.1.

A Figura 6.8a mostra o Melhor Modelo Pleno sobreposto pela extrapolação do equivalente reduzido. Ambos são praticamente idênticos até por volta do 25º impulso quando o reduzido extrapolado passa assumir valores mais elevados, indicando um envelhecimento maior do que o real. Dentro deste contexto, os dois modelos são adequados para comparar os 20 primeiros impulsos com as amplitudes de 15 kA e 20 kA. Isto é adequado para aos ensaios normalizados, mas sem significado para a avaliação da vida útil.

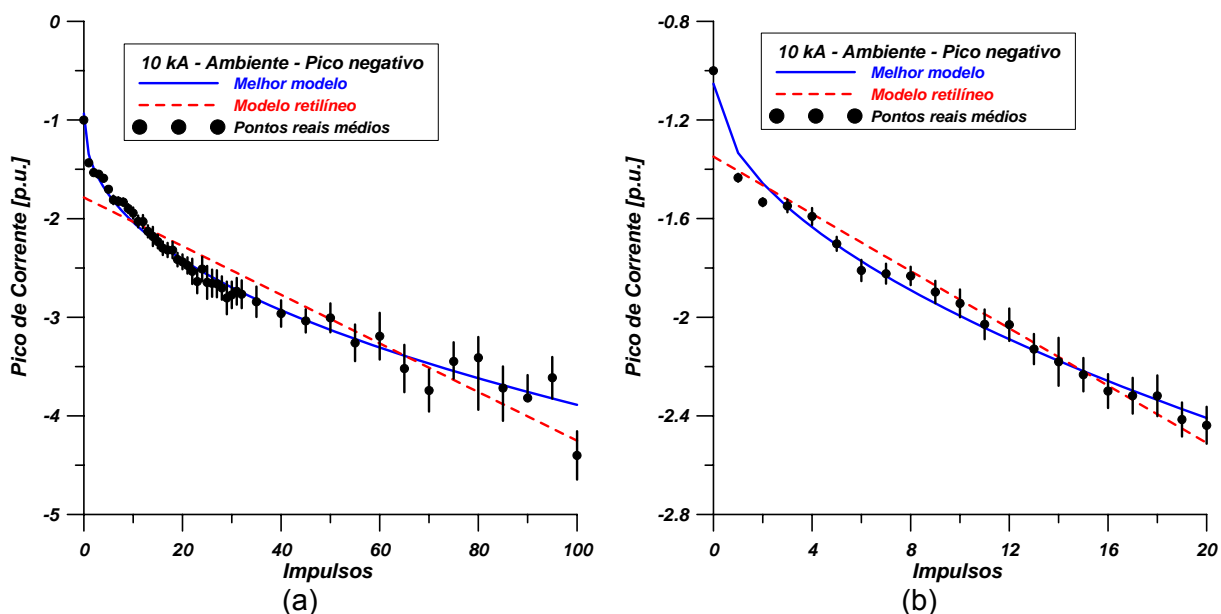


Figura 6.7 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a temperatura ambiente – (a) Modelo pleno (b) Modelo reduzido

A Figura 6.8b compara os modelos retilíneos levantados a partir dos 100, e a partir dos 20 primeiros impulsos. Observa-se uma alternância na condição de maior aproximação dos pontos reais. Até por volta de 25 impulsos aplicados, o modelo extrapolado apresenta erros menores, quando então se desvia da tendência obtida experimentalmente, e o melhor modelo passa a ser o pleno (baseado nos 100 impulsos).

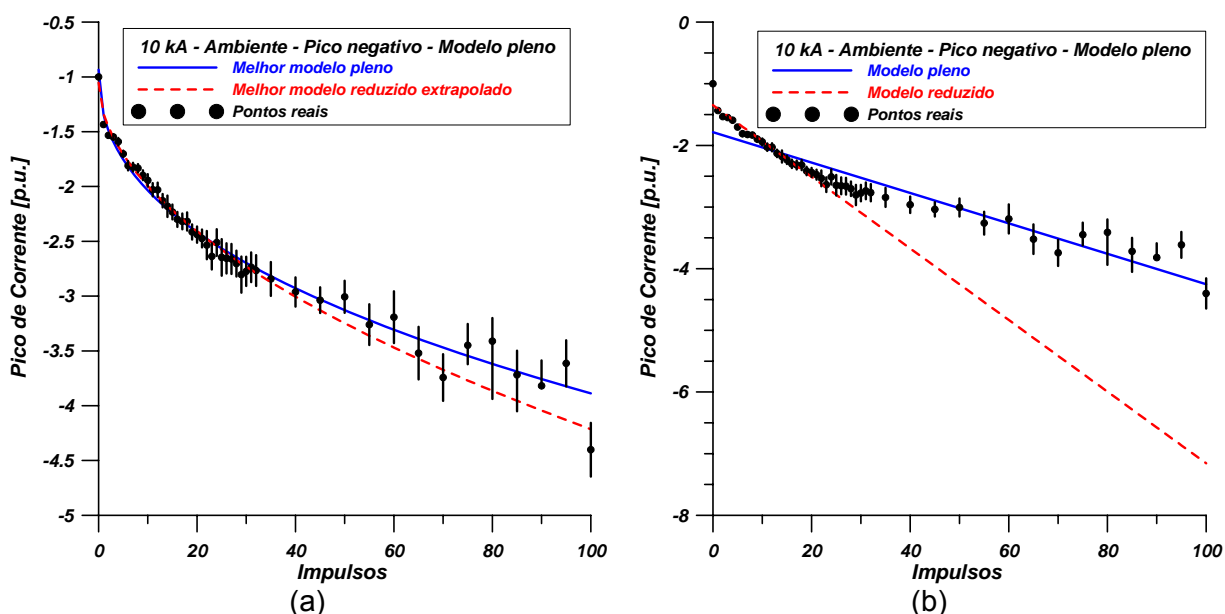


Figura 6.8 – Pico negativo da corrente de fuga para impulsos de 10 kA a temperatura ambiente – curvas plenas sobrepostas pela extrapolação dos modelos reduzidos. (a) Melhor modelo pleno (b) Retilíneo

Para o pico negativo da corrente de fuga, como verificado nas Figuras 6.7 e 6.8, os modelos plenos identificam-se com os pontos reais, mais do que a extrapolação dos modelos reduzidos. Esta afirmação verificada mais claramente no caso dos modelos

retilíneos, onde a extrapolação não indica valores coerentes para um número de impulsos maior do que o utilizado para sua obtenção. Diante deste fato, as Figuras 6.9 e 6.10 mostram apenas os modelos plenos.

A Figura 6.9a mostra os modelos plenos para os impulsos de 10 kA aplicados com as amostras a 60 °C. A Figura 6.9b é tão somente uma fração da Figura 6.9a, onde são representados os 20 primeiros impulsos aplicados. De maneira similar, As Figuras 6.10a e 6.10b mostram os gráficos equivalentes para as amostras ensaiadas a 80 °C.

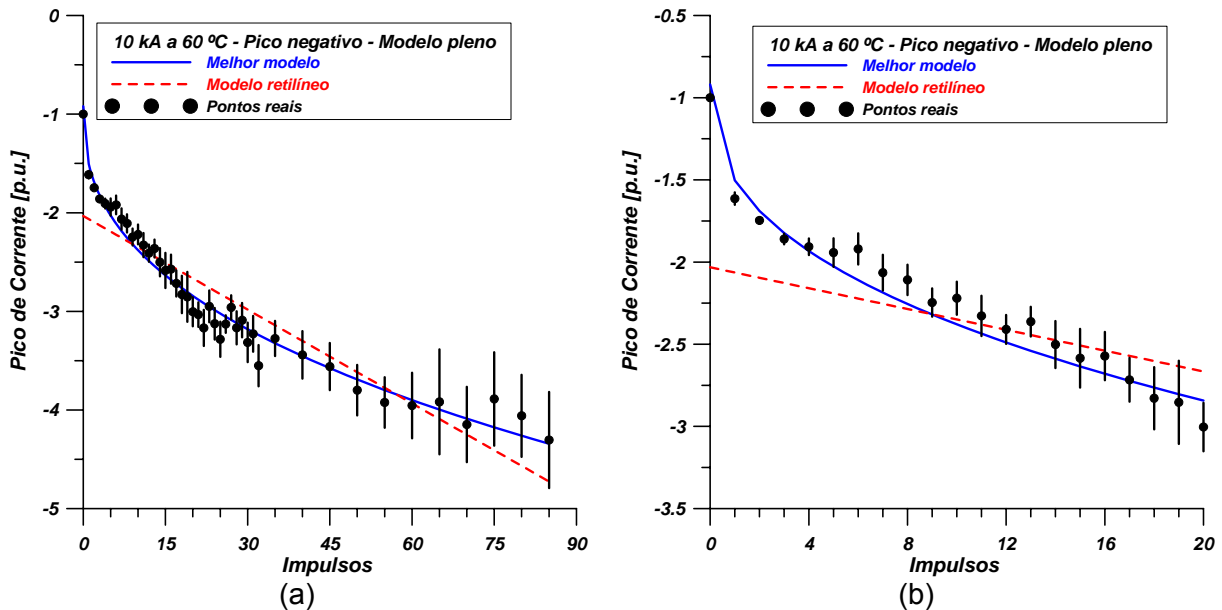


Figura 6.9 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 60 °C – (a) curva plena com todos os impulsos (b) curva plena com os 20 primeiros impulsos

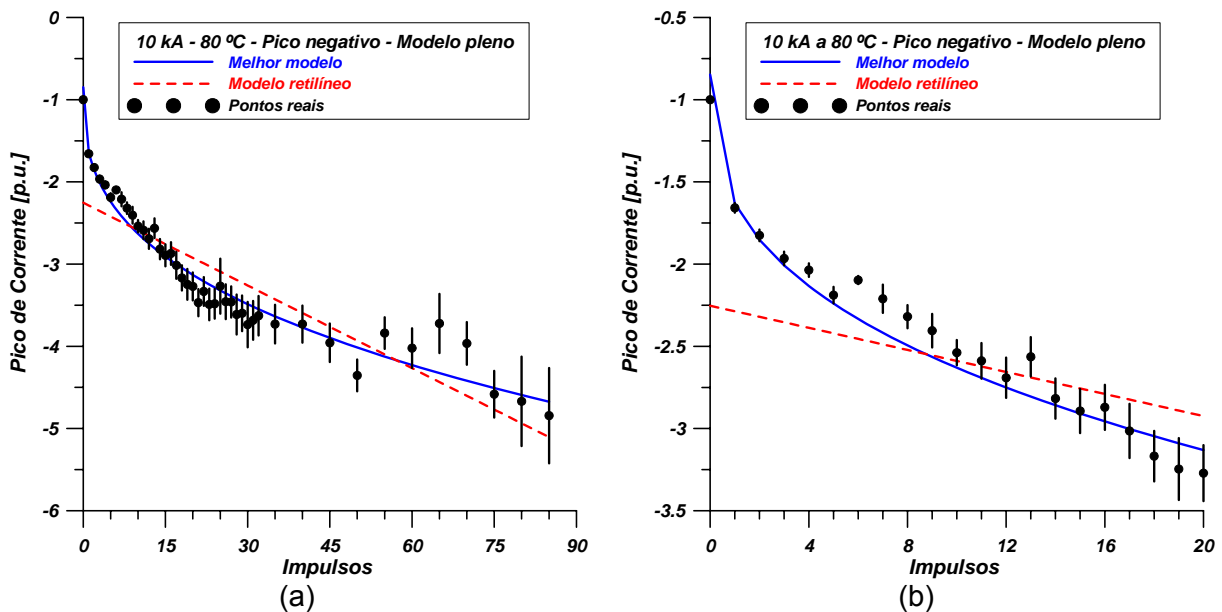


Figura 6.10 – Pico negativo da corrente de fuga para impulso de corrente de 10 kA a 80 °C – (a) Modelo pleno com todos os impulsos (b) Modelo pleno com os 20 primeiros impulsos

6.1.2.A. COMENTÁRIOS

A aleatoriedade apresentada pelo pico negativo é praticamente nula em comparação com o pico positivo. As tendências são definidas, os “Melhores Modelos” possuem a forma da Equação 6.1 e fornecem aproximações com os pontos reais maiores do que os modelos retilíneos. Quanto às retas obtidas por extrapolação, os números maiores de impulsos aplicados apenas intensificam o fato de que a utilização de “Modelos Retilíneos” não é adequada para representar o envelhecimento dos varistores a óxido metálico frente a surtos de curta duração.

6.1.3. POTÊNCIA DISSIPADA

Semelhante ao pico negativo, o comportamento da potência dissipada em função do número de impulsos tem sua melhor representação através da Equação 6.1. A potência dissipada para os impulsos de 10 kA aplicados à temperatura ambiente é representada pelas Figuras 6.11a e 6.11b para 100 e para 20, respectivamente.

Na Figura 6.11a o último ponto real assume um valor mais elevado do que o previsto pela curva e pela reta. Neste ponto, a maior parte das amostras teria entrado em colapso, resultando em maior potência dissipada. Na Figura 6.11b, a visualização mais clara proporcionada por um número mais reduzido de impulsos mostra que a maior elevação da potência dissipada antes do efeito avalanche – como no último ponto comentado – acontece após a aplicação do primeiro impulso de corrente.

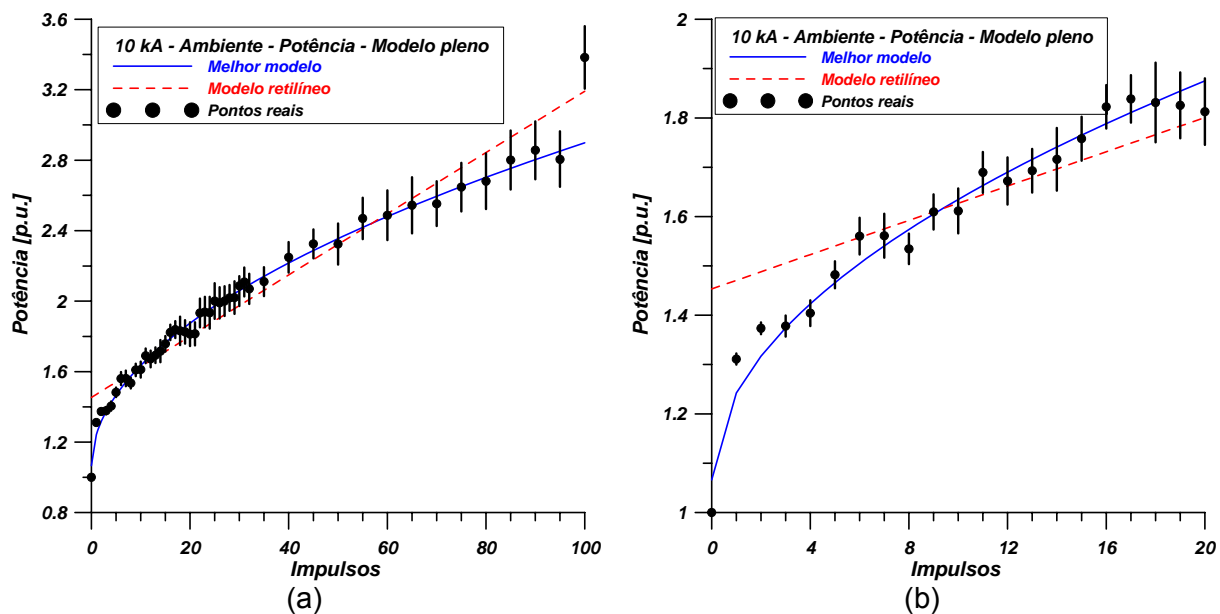


Figura 6.11 – Potência dissipada para 10 kA à temperatura ambiente – (a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos

Na Figura 6.12a observa-se uma queda nos três últimos pontos. Para este grupo de ensaios, as amostras que vinham apresentando os maiores valores de potência entraram

em colapso no impulso anterior e não mais contribuíram com a manutenção de um valor médio mais elevado. Na Figura 6.12b, observa-se que a elevação da potência dissipada é mais pronunciada após o primeiro impulso em comparação aos todos os impulsos aplicados.

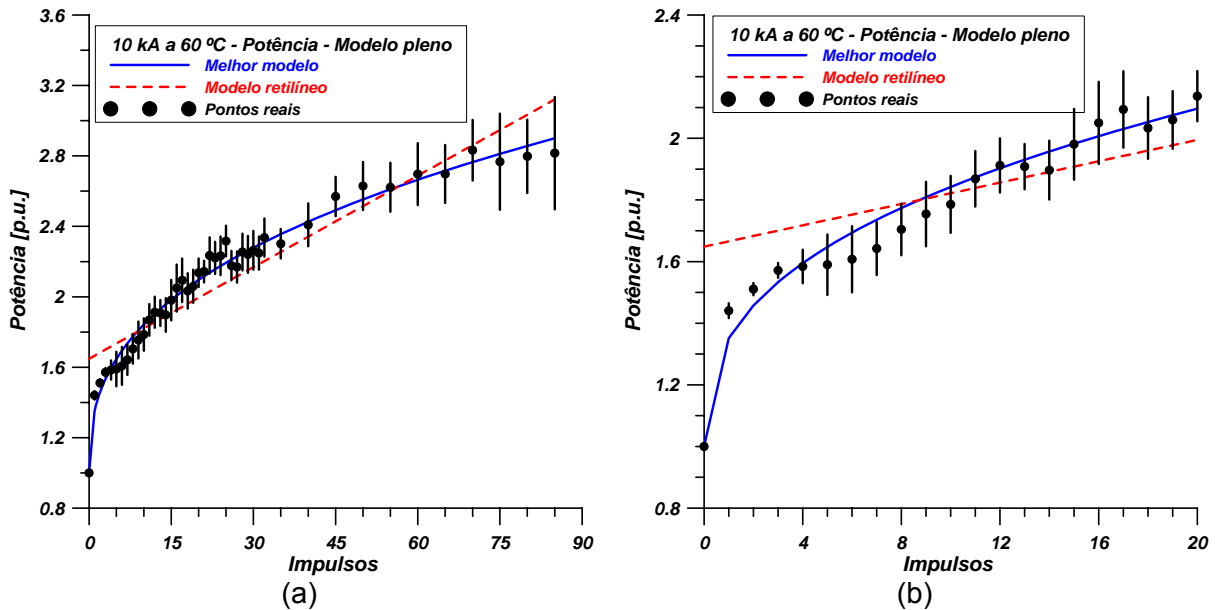


Figura 6.12 – Potência dissipada para impulsos de corrente de 10 kA a 60 °C –(a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos

A Figura 6.13a mostra que entre os impulsos 55 e 70, a destruição de amostras que dissipavam potências mais altas – um indicativo de degradação – terminaram por extrapolar os limites considerados pela análise estatística e deixaram de compor o conjunto analisado segundo os padrões do Boxplot ou pela identificação da distribuição individual.

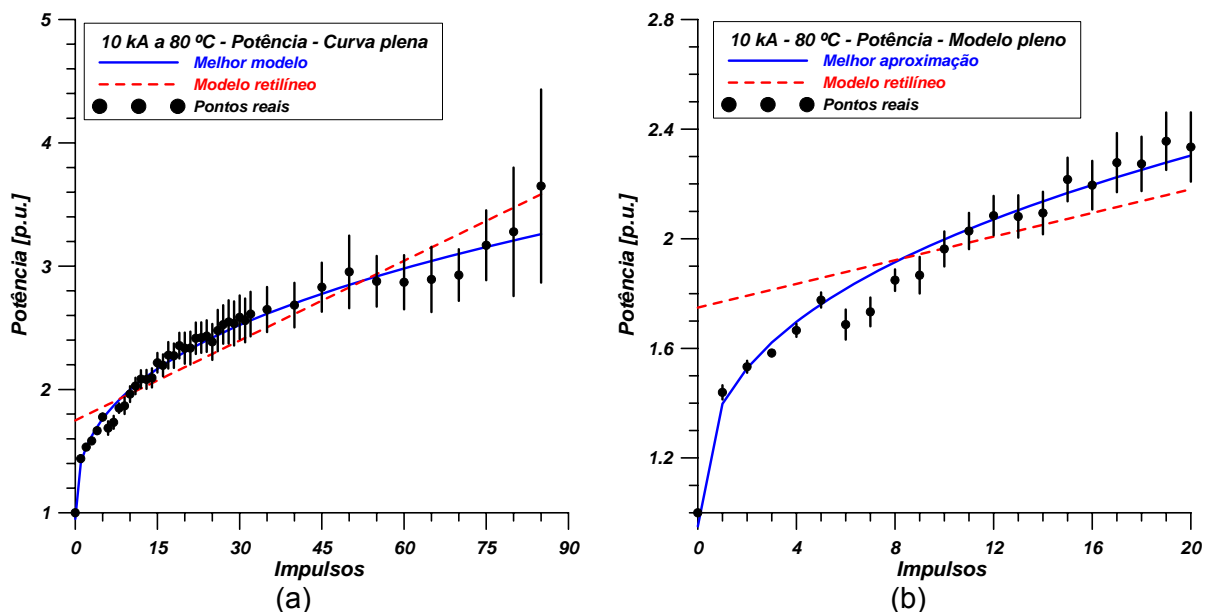


Figura 6.13 – Potência dissipada para impulsos de corrente de 10 kA a 80 °C – (a) Modelos plenos com todos os impulsos (b) Modelos plenos com os 20 primeiros impulsos

6.1.3.A. COMENTÁRIOS

Conforme se observa nas Figuras 6.11b a 6.13b, a Equação 6.1 representa modelos mais apropriados que o Retilíneo. A única diferença entre estes três gráficos está no valor mais elevado da potência dissipada em função das temperaturas mais altas. A avaliação da degradação dos resistores a óxido metálico através da potência dissipada possui consistência semelhante à do pico negativo da corrente de fuga.

6.2. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 15 kA

Para esta amplitude, o número máximo de impulsos aplicados foi 22. No entanto, a partir do vigésimo primeiro, a destruição de aproximadamente um terço das amostras resultou na inflexão da curva de aproximação devido à redução no valor médio dos parâmetros. Portanto as curvas apresentadas para esta amplitude são baseadas nos resultados da aplicação de 20 impulsos de corrente.

6.2.1. PICO POSITIVO

A Figura 6.14 mostra a evolução do pico positivo da corrente de fuga para os impulsos de 15 kA aplicados com as amostras à temperatura ambiente. O comportamento mostrado é similar ao equivalente para a amplitude de 10 kA mostrado na Figura 6.1b. Neste gráfico, a curva de aproximação, que exibe sempre o mesmo valor para o pico positivo a partir do sétimo impulso, é expressa na forma da Equação 6.3:

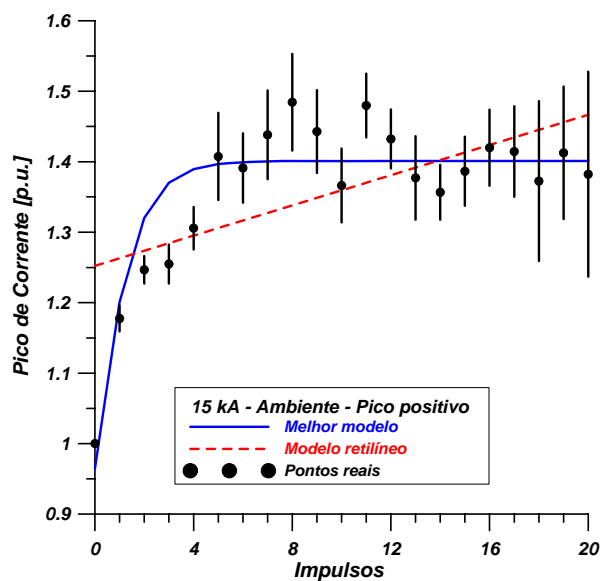


Figura 6.14 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente

$$y = \frac{1}{a + b \cdot e^{-x}} \quad (6.3)$$

A comparação das Figuras 6.1b com a 6.14 mostra que a elevação da amplitude (de 10 kA para 15 kA) não foi o suficiente para definir uma elevação dos valores expressos, como aconteceu com a temperatura de 60 °C para os impulsos de 10 kA. A Equação 6.3 diz que o envelhecimento tende a um valor limite a partir do qual não existe mais degradação. O Modelo Retilíneo na Figura 6.14, no entanto, sugere um envelhecimento em ritmo acelerado. Mas, como visto nas Figuras anteriores, ambos os casos não necessariamente condizem com a realidade.

Os impulsos de 15 kA aplicados nos resistores a 60 °C, conforme a Figura 6.15, apresentam uma tendência na forma da Equação 6.1. O modelo retilíneo, considerando a inclinação, tende a indicar estágios de degradação mais avançados que o real. Observa-se que nestas condições o primeiro impulso provocou um incremento em torno de 30% no valor do pico positivo da corrente de fuga.

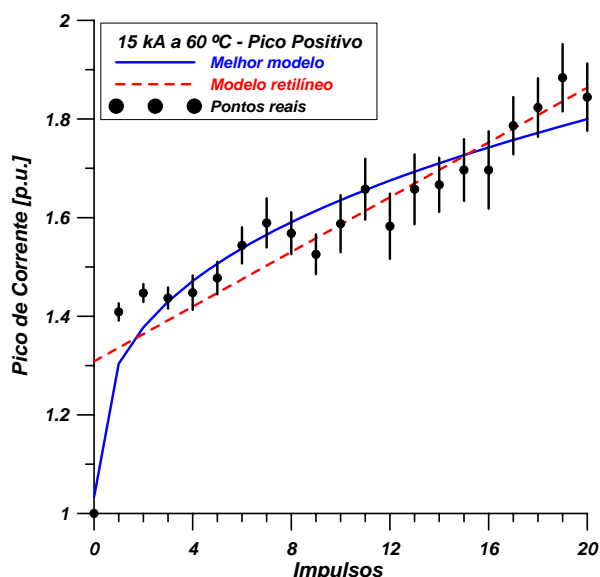


Figura 6.15 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C

A Figura 6.16 mostra o valor do pico positivo da corrente de fuga em função dos impulsos de 15 kA aplicados nas amostras a 80 °C. Apesar da tendência clara de elevação a aleatoriedade dos pontos permanece.

6.2.1.A. COMENTÁRIOS

Os gráficos de pico positivo para 10 kA e 15 kA em função da corrente de fuga mostram que este parâmetro não constitui uma referência adequada para a estimativa do envelhecimento dos resistores a óxido metálico frente a impulsos atmosféricos de curta duração. Esta aleatoriedade talvez seja resultado do processo de polarização, que seria consequência do envelhecimento, mas o parâmetro em si mostra-se impreciso.

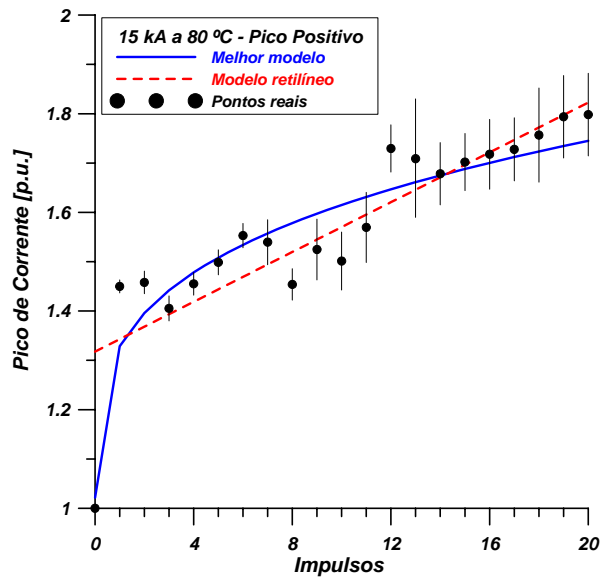


Figura 6.16 – Pico positivo para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C

6.2.2. PICO NEGATIVO

As Figuras de 6.17 a 6.19 mostram o pico negativo da corrente de fuga para os impulsos de 15 kA aplicados nas amostras às temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C. Os comportamentos são semelhantes, ou seja, existe uma tendência definida para a elevação do pico negativo. O Melhor Modelo segue a Equação 6.1 e o Retilíneo é não adequado para números de impulsos superiores a 20. Mais uma vez, salto de amplitude na aplicação do primeiro impulso de corrente é superior aos anteriores.

Os intervalos de confiança são relativamente maiores para a temperatura ambiente do que para as temperaturas mais elevadas. Esta diferença fica mais evidente entre os impulsos 18 a 20, quando a destruição/exclusão estatística de algumas amostras faz o valor médio oscilar.

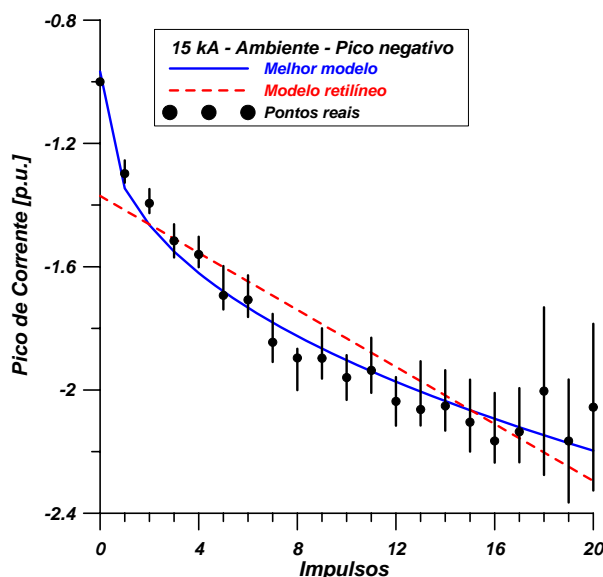


Figura 6.17 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente

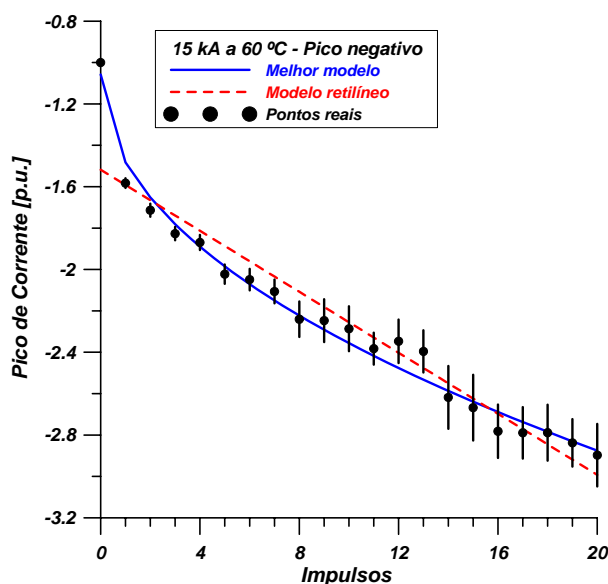


Figura 6.18 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C

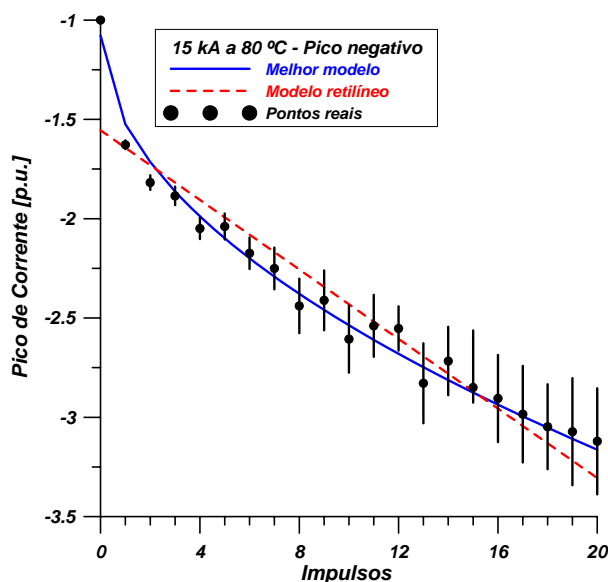


Figura 6.19 – Pico negativo para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C

6.2.3. POTÊNCIA DISSIPADA

As Figuras 6.20 a 6.22 mostram o comportamento da potência dissipada em função da aplicação de 15 kA, respectivamente, para as temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C. Os três Melhores Modelos seguem a Equação 6.1, apresentam uma tendência de crescimento definida e aleatoriedade praticamente nula se comparadas com as apresentadas pelos valores de pico positivo.

A potência dissipada, como já verificado para a amplitude de 10 kA, apresenta-se como um parâmetro consistente para o levantamento do envelhecimento frente a surtos de resistores a óxido metálico. A elevação da temperatura das amostras sob ensaio resulta na elevação da dissipação de potência.

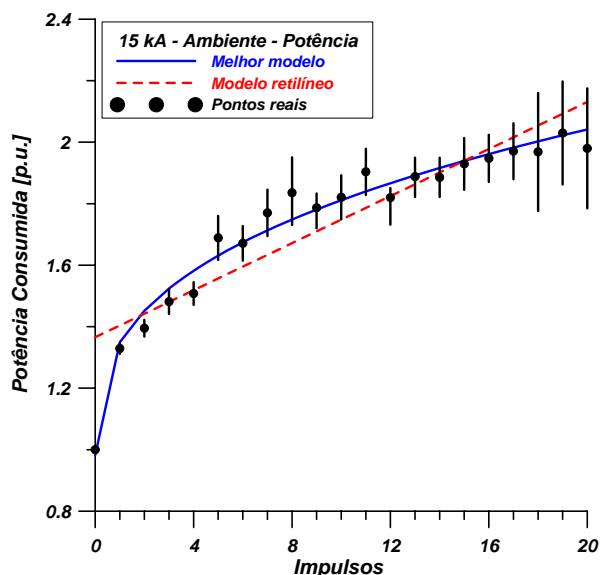


Figura 6.20 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a temperatura ambiente

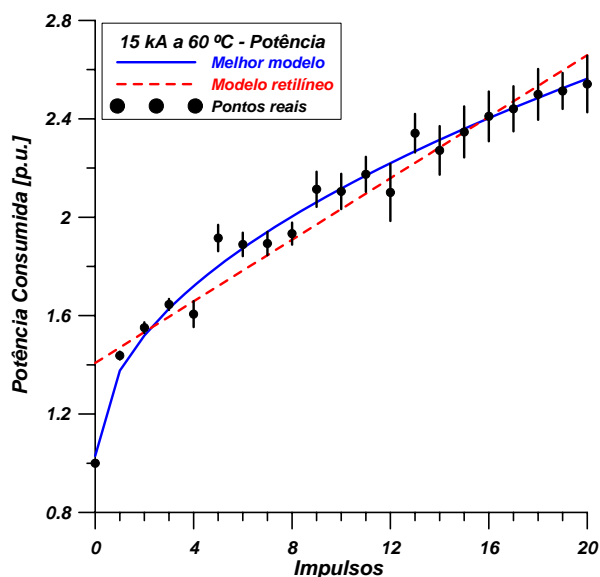


Figura 6.21 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a 60 °C

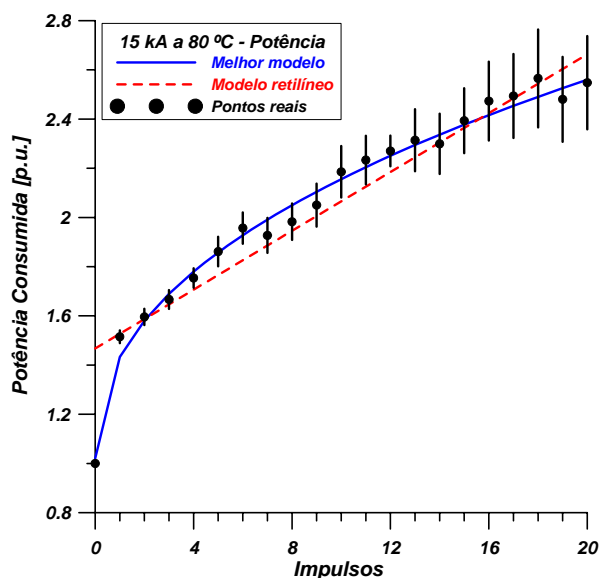


Figura 6.22 – Potência para impulsos de corrente de 15 kA a 80 °C

6.3. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 20 kA

A amplitude de 20 kA, referente a duas vezes a corrente de descarga nominal das amostras, atuou de forma diferenciada nas barreiras de potencial, resultando em um envelhecimento mais acelerado dos resistores não lineares. A degradação não tende a um incremento menor após cada impulso. O comportamento dos parâmetros levantados para 20 kA de impulso de corrente de curta duração seguem a Equação 6.4:

$$y = \frac{1}{a + b \cdot x^c} \quad (6.4)$$

6.3.1. PICO POSITIVO

As Figuras 6.23 a 6.25 mostram o comportamento do pico positivo para o impulso de corrente de 20 kA aplicados aos varistores em temperaturas ambiente, 60 °C, e 80 °C, respectivamente. Observa-se que, ao contrário das amplitudes de 10 kA e 15 kA, ao invés da aleatoriedade, os pontos apresentam uma tendência de crescimento definida.

As Figuras 6.23 e 6.24 mostram que o Melhor Modelo apresenta certo desvio do valor para zero impulso, mas representa adequadamente a evolução dos valores. Por outro lado, o Modelo Retilíneo – ao contrário do ocorrido com 10 e 15 kA – apresenta valores menores que o real a partir do vigésimo impulso, considerando que as amostras suportassem um número mais elevado de solicitações.

A Figura 6.25 mostra que para as amostras ensaiadas a 80 °C não foi possível exibir os valores referentes a 20 impulsos de 20 kA. A última aplicação destruiu parte dos varistores e a curva, então, foi extrapolada para 20 impulsos.

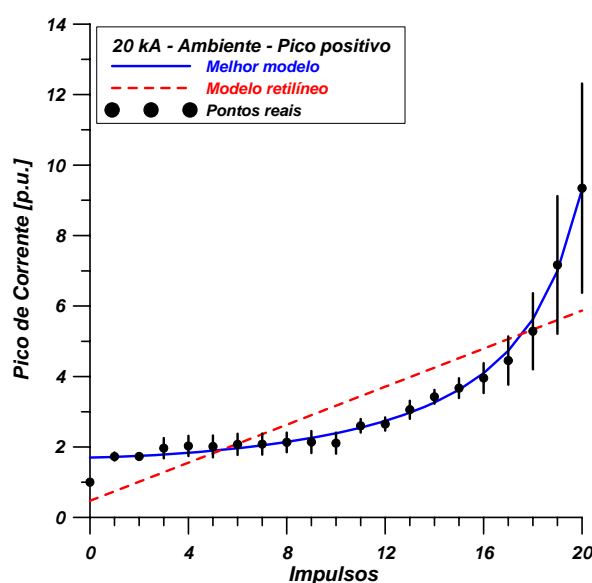


Figura 6.23 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente

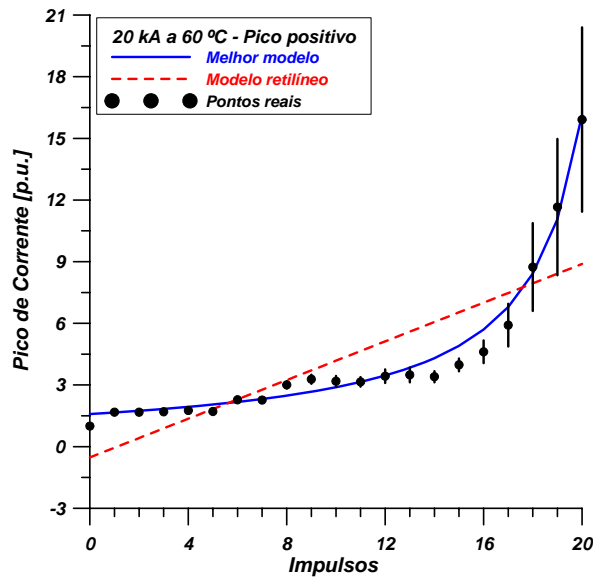


Figura 6.24 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C

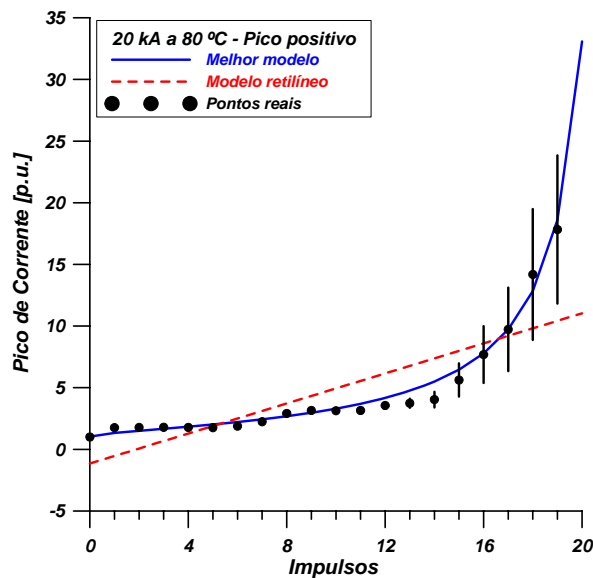


Figura 6.25 – Pico positivo para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C

6.3.1.A. COMENTÁRIOS

Na comparação entre os gráficos de pico positivo de 20 kA com os de 10 e 15 kA, além da não aleatoriedade, o primeiro apresenta uma nítida tendência à instabilidade. A amplitude elevada do impulso reduziu as barreiras de potencial em passos progressivamente maiores. A elevação da temperatura neste caso apenas acentuou a degradação que já se fazia evidente.

6.3.2. PICO NEGATIVO

As Figuras 6.26 a 6.28 mostram o comportamento do pico negativo em função da aplicação de impulsos de 20 kA nas temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C, respectivamente.

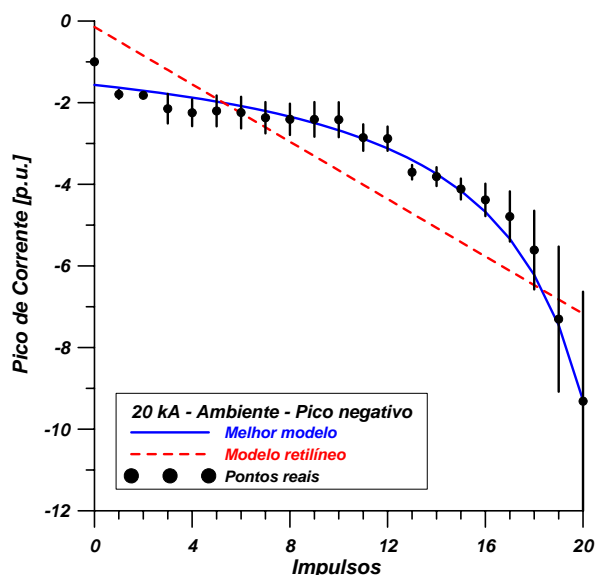


Figura 6.26 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente

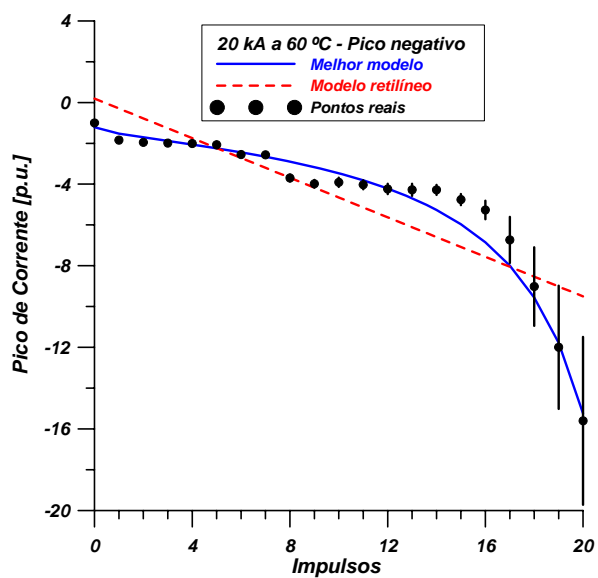


Figura 6.27 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C

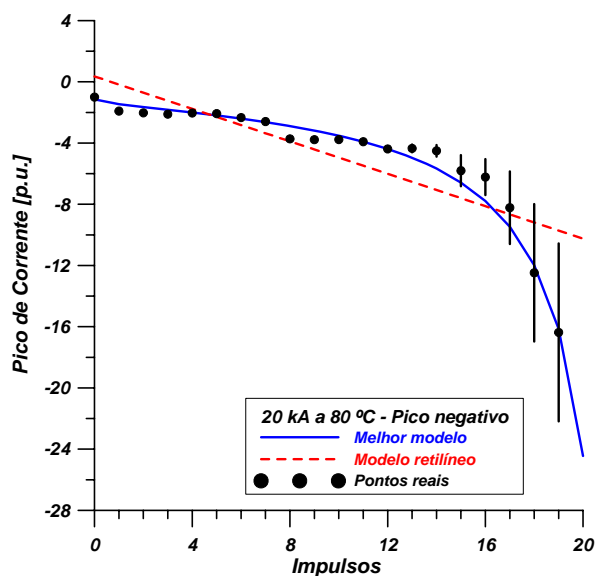


Figura 6.28 – Pico negativo para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C

6.3.2.A. COMENTÁRIOS

De forma semelhante ao pico negativo das amplitudes anteriores, a tendência ao crescimento é definida, porém, com uma tendência à instabilidade mais elevada. A comparação entre as amplitudes do pico positivo e pico negativo de 20 kA nas temperaturas correspondentes, mostra que não existe tendência à polarização. O processo de envelhecimento ocorre de forma direta sem o deslocamento das barreiras de potencial para um sentido preferencial de condução de corrente em frequência industrial.

Como no pico positivo, a temperatura acelera o processo de envelhecimento. Para esta amplitude de impulso de corrente, com as amostras a 80 °C não se observa o fenômeno de polarização até o 19º impulso. Os picos positivo e negativo referem-se a valores aproximados, em módulo, de 19 e 16, respectivamente. No entanto, se for considerada a extrapolação da curva de 19 para 20 impulsos, estes valores tornam-se próximos a 33 e 24, respectivamente. Se este fosse um fato real, este estágio de envelhecimento teria invertido o sentido preferencial de condução em frequência industrial.

6.3.3. POTÊNCIA DISSIPADA

As Figuras 6.29 a 6.31 mostram a potência dissipada para os impulsos de corrente de 20 kA nas temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C, respectivamente. O comportamento é o mesmo apresentado para os picos positivo e negativo da corrente de fuga, com forte tendência à instabilidade térmica, acentuada pelo aumento de temperatura.

6.3.3.A. COMENTÁRIOS

É possível observar que a elevação de temperatura impõe uma aceleração no envelhecimento mais pronunciada nesta amplitude do que nas demais. A diferença de uma temperatura para outra no parâmetro potência é, inclusive mais evidente do que no pico negativo da corrente de fuga.

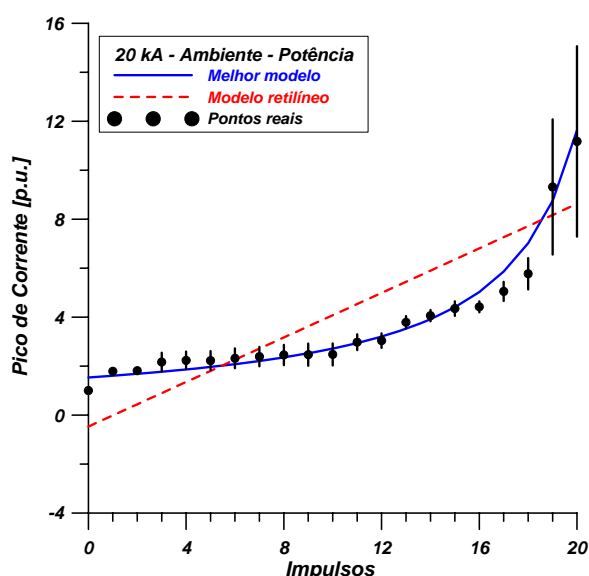


Figura 6.29 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a temperatura ambiente

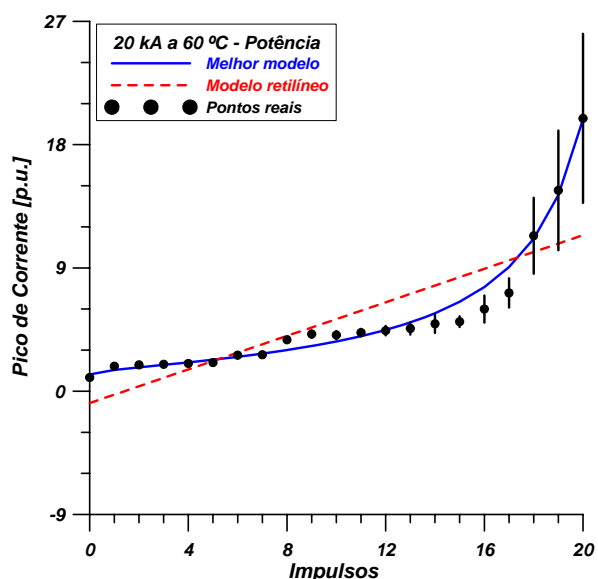


Figura 6.30 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a 60 °C

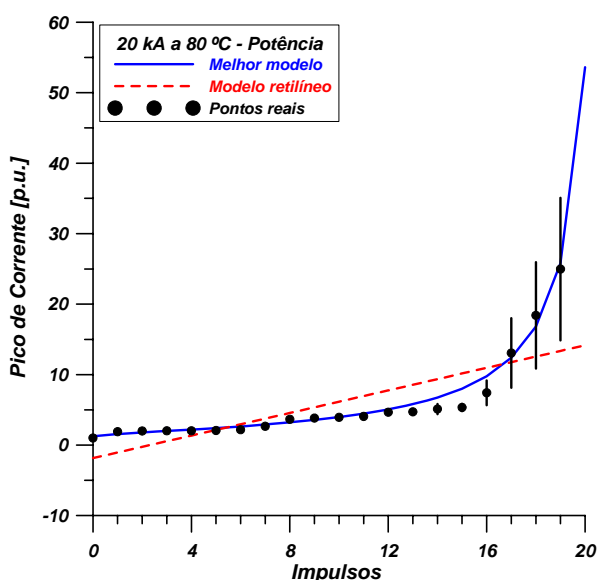


Figura 6.31 – Potência para impulsos de corrente de 20 kA a 80 °C

6.4. RESULTADOS GRÁFICOS DOS IMPULSOS DE 30 kA

A amplitude de 30 kA, referente a três vezes a corrente de descarga nominal das amostras, apresentou um efeito ainda mais pronunciado que a corrente de 20 kA, ou seja, um envelhecimento ainda mais acelerado ao ponto de algumas amostras serem destruídas logo na aplicação do primeiro impulso.

6.4.1. PICO POSITIVO

A Figura 6.32 mostra o comportamento do pico positivo para os impulsos de corrente de 30 kA aplicados aos varistores em temperatura ambiente, cujo comportamento segue a Equação 6.5.

$$y = a + b.e^{-x/c} \tag{6.5}$$

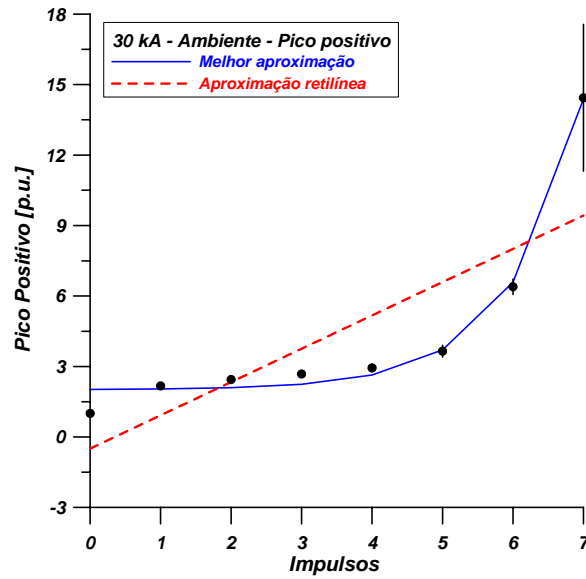


Figura 6.32 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente

A Figura 6.33 mostra o comportamento do pico positivo para o impulso de corrente de 30 kA aplicados aos varistores a 60 °C. O modelo representado na Figura 6.33 segue a Equação 6.6.

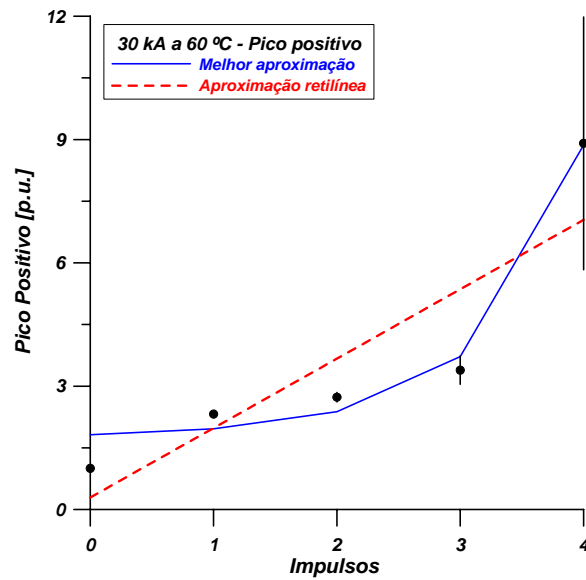


Figura 6.33 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C

$$y = (a + b.e^x)^2 \tag{6.6}$$

A Figura 6.34 mostra o comportamento do pico positivo para o impulso de corrente de 30 kA aplicados aos varistores sob a temperatura de 80 °C. O modelo que possui a melhor aproximação para este conjunto segue a Equação 6.7.

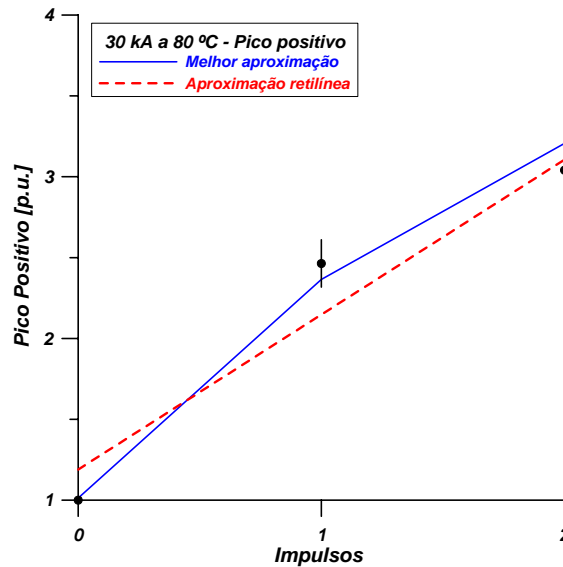


Figura 6.34 – Pico positivo para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C

$$y = a + b.x^c \quad (6.7)$$

6.4.1.A. COMENTÁRIOS

Para os impulsos aplicados à temperatura ambiente, os pontos apresentam uma tendência de crescimento definida de forma semelhante aos impulsos de 20 kA. O número de aplicações, no entanto, foi mais reduzido. Para a temperatura de 60 °C, também com tendência bem definida o número de aplicações ficou ainda menor, ou seja, a temperatura mais elevada acelerou a destruição dos varistores.

A destruição de mais de 60% das amostras ensaiadas a 80 °C, logo no terceiro impulso, a evolução dos valores, conforme a aproximação levantada pela Figura 6.34 e Equação 6.7 seria menos acelerada que o conjunto equivalente para 60 °C. Neste caso, considerando o baixo número de amostras sobreviventes após um número tão reduzido de aplicações, conclui-se que para estas amplitude e temperatura, não mais seria avaliado o modo de envelhecimento, mas o modo de destruição dos varistores a óxido metálico.

6.4.2. PICO NEGATIVO

As Figuras 6.35 a 6.37 mostram o pico negativo para os impulsos de 30 kA aplicados, respectivamente sob as temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C, que seguem, respectivamente as Equações 6.8 a 6.10.

$$y = a + b.e^{\left(\frac{x}{c}\right)} \quad (6.8)$$

$$y = a + b.e^x \quad (6.9)$$

$$y = a + b.x^c \quad (6.10)$$

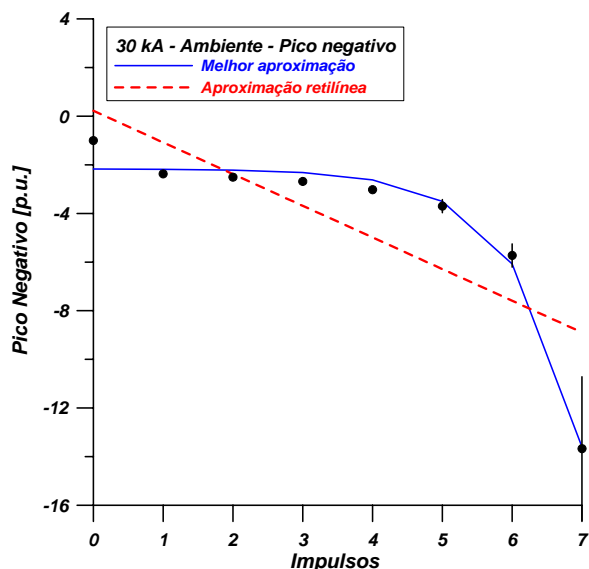


Figura 6.35 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente

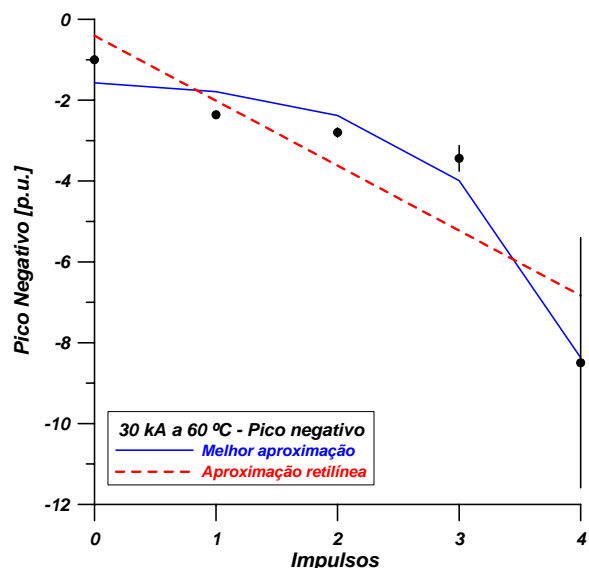


Figura 6.36 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C

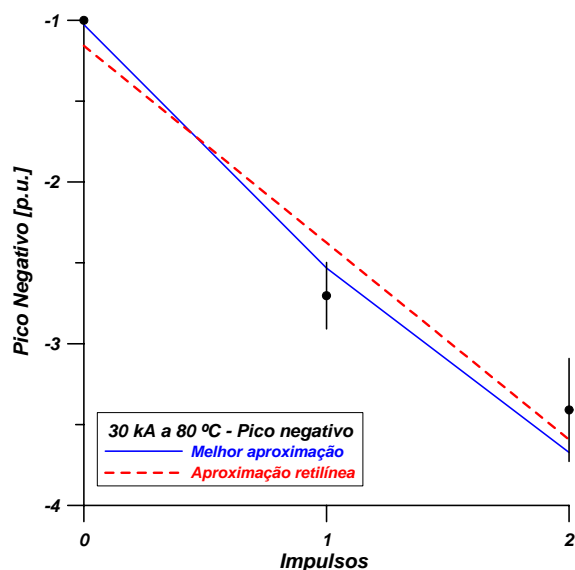


Figura 6.37 – Pico negativo para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C

6.4.2.A. COMENTÁRIOS

De forma similar ao pico positivo de corrente de fuga, a tendência é bem definida, mas devido ao número reduzido de impulsos de corrente suportado pelas amostras, principalmente para a temperatura de 80 °C, os resultados não representam adequadamente o processo de degradação. É possível observar, entretanto que mesmo em situação desta amplitude que representa 3,0 p.u. da corrente nominal, a temperatura mais elevada acelera o processo de envelhecimento.

6.4.3. POTÊNCIA

As Figuras 6.38 a 6.40 mostram a potência para os impulsos de 30 kA aplicados sob as temperaturas ambiente, 60 °C e 80 °C, respectivamente.

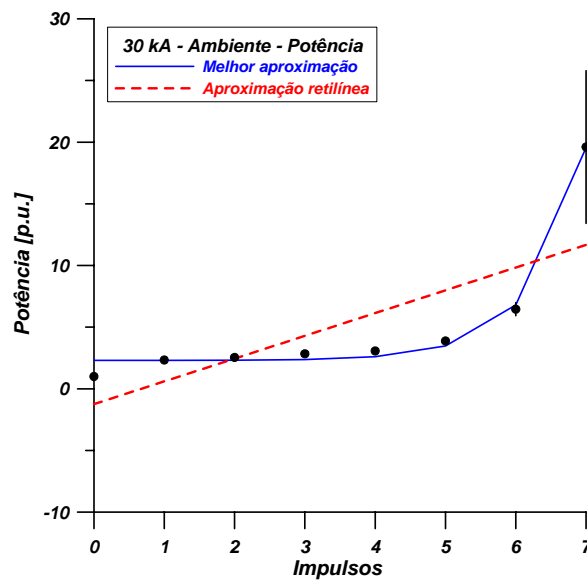


Figura 6.38 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a temperatura ambiente

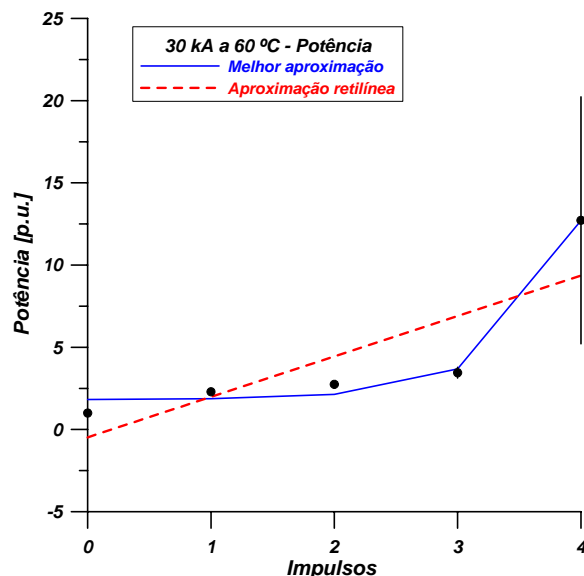


Figura 6.39 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a 60 °C

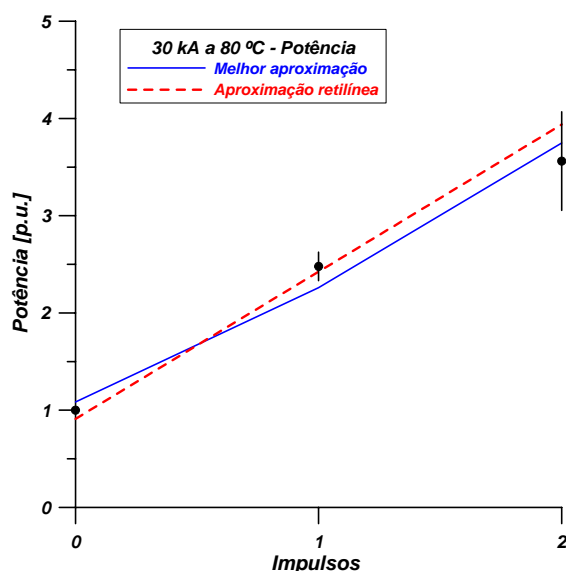


Figura 6.40 – Potência para impulsos de corrente de 30 kA a 80 °C

6.4.2.A. COMENTÁRIOS

A potência apresentou praticamente o mesmo comportamento dos picos de corrente positivo e negativo. Os intervalos de confiança mais amplos apresentados no terceiro impulso da Figura 6.40 refletem a destruição das amostras e o processo desigual de degradação das amostras submetidas a 80 °C.

6.5. PARÂMETROS INDICATIVOS DE ENVELHECIMENTO

A aleatoriedade do pico positivo para as amplitudes de 10 kA e 15 kA faz com que este parâmetro não seja adequado para a avaliação do envelhecimento frente a impulsos de curta duração. Para as amplitudes de 20 e 30 kA, a tendência definida de elevação deste parâmetro proporcionaria uma indicação do processo de envelhecimento.

O fenômeno de polarização, devido às descargas de corrente, foi observado nas amplitudes de 10 e 15 kA, mas não se manifestou nos impulsos de 20 e 30 kA.

Considerando que o parâmetro de avaliação de envelhecimento deve ser independente da amplitude da corrente de impulso, as análises do pico positivo e da polarização não se constituem em base de estimativa adequada para o envelhecimento dos resistores não lineares ou de um para-raios completo.

Por outro lado, o pico negativo e a potência dissipada apresentaram – até o momento – certa coerência na elevação de seus valores em função do número de impulsos para as quatro amplitudes e para as três temperaturas consideradas. Estas razões tornam interessante a análise mais criteriosa destes dois parâmetros para o fornecimento de uma estimativa do envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico frente a impulsos

de curta duração. Dentro deste contexto, são analisados os efeitos da temperatura e da amplitude nestes dois parâmetros.

6.6. O EFEITO DA TEMPERATURA

A Figura 6.41 mostra o efeito da temperatura no valor do pico negativo da corrente de fuga para os impulsos de corrente de 10 kA. De forma similar, as Figuras 6.42 a 6.44 mostram o efeito da temperatura no valor do pico negativo da corrente de fuga para as amplitudes de 15, 20 e 30 kA, respectivamente. Os símbolos sobre as curvas não representam os pontos médios, apenas são utilizados para identificar a temperatura referente.

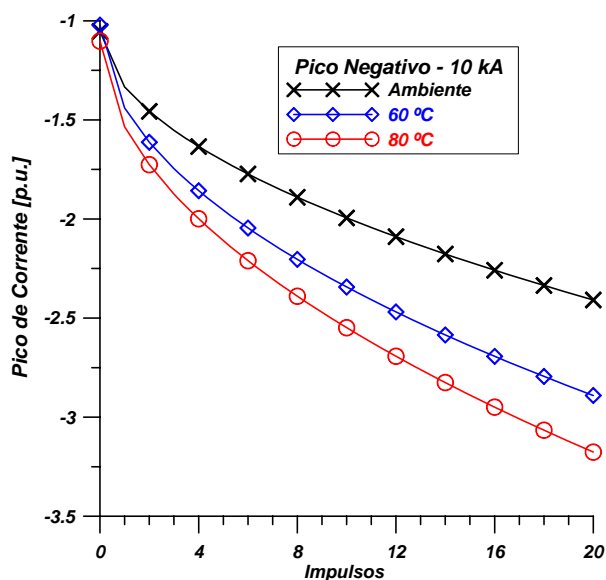


Figura 6.41 – Pico negativo para impulsos de 10 kA

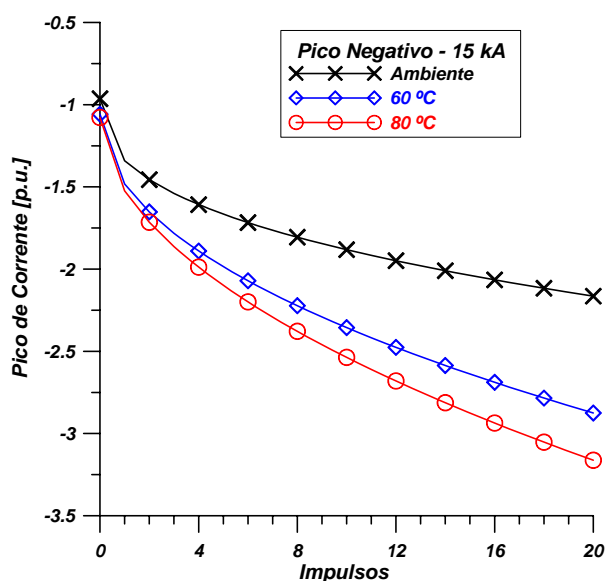


Figura 6.42 – Pico negativo para impulsos de 15 kA

As Figuras 6.41 e 6.42 mostram, respectivamente, que para as amplitudes 10 e 15 kA observa-se a maior proximidade das curvas 60 °C e 80 °C, em conformidade com a proximidade numérica da temperatura.

Para os impulsos de 20 kA, conforme Figura 6.43, as três curvas se confundem graficamente até por volta do 5º impulso, quando a diferença para a temperatura ambiente começa a se distanciar. A partir do décimo impulso, as curvas de 60 e 80 °C também começam a ficar mais distantes graficamente. Dadas as devidas proporções, este fato se atribui tão somente à escala do gráfico para ilustrar os valores mais altos.

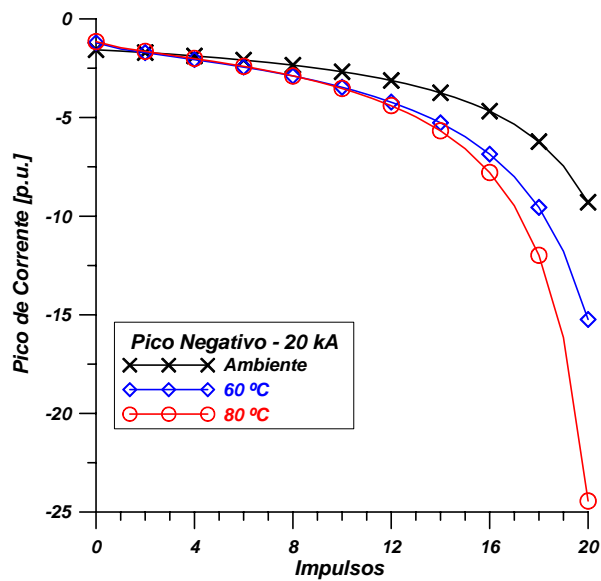


Figura 6.43 – Pico negativo para impulsos de 20 kA

Apesar do reduzido número de aplicações possíveis, a Figura 6.44 mostra que para os impulsos de 30 kA, as temperaturas mais elevadas aceleram o envelhecimento dos varistores.

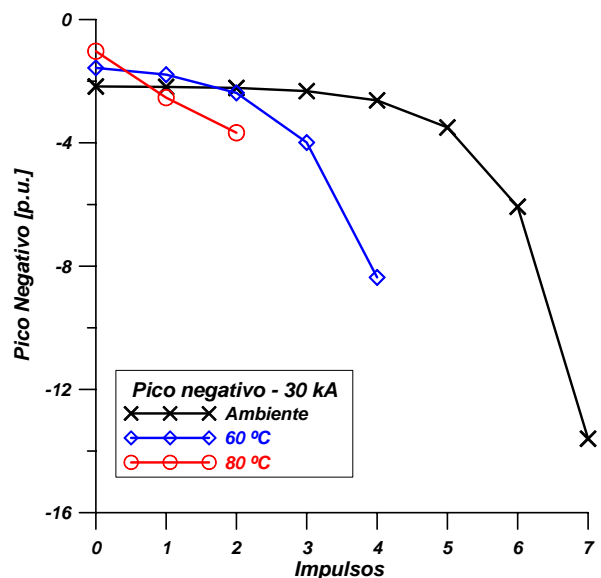


Figura 6.44 – Pico negativo para impulsos de 30 kA

As Figuras 6.45 a 6.48 mostram o efeito da temperatura na potência dissipada para cada uma das amplitudes consideradas. Para 10 kA, conforme ilustrado na Figura 6.45, a potência possui uma elevação mais acentuada para as temperaturas mais altas, em uma tendência bem definida.

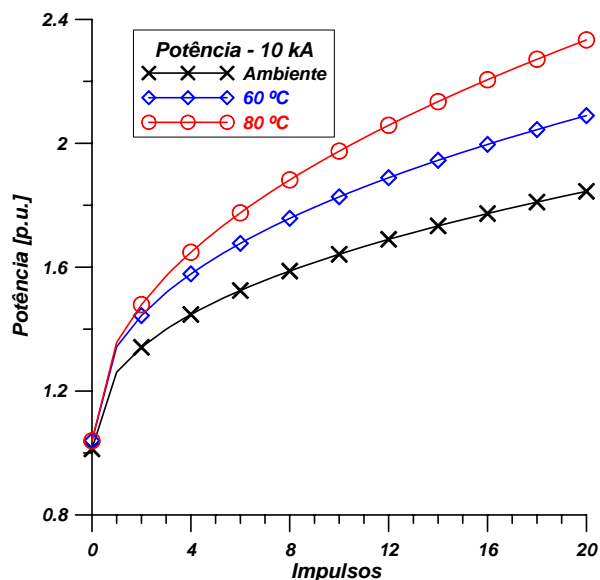


Figura 6.45 – Potência para impulsos de 10 kA

Para a amplitude de 15 kA a Figura 6.46 mostra que as potências para 60 °C e 80 °C passam a assumir o mesmo valor a partir do 16º impulso. Neste estágio, as amostras de 80 °C que vinham apresentando os maiores valores de corrente de fuga foram eliminadas pela análise estatística reduzindo valor médio final. Esta eliminação precoce indica maior envelhecimento causado por uma temperatura mais alta.

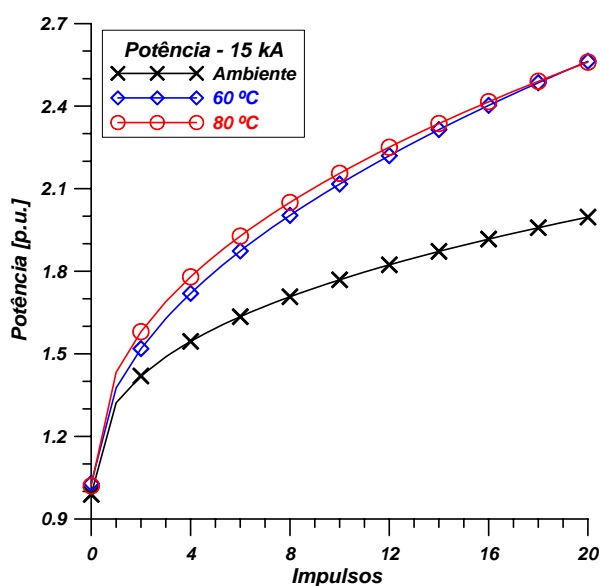


Figura 6.46 – Potência para impulsos de 15 kA

Na Figura 6.47, a elevada amplitude da curva levantada para a temperatura de 80 °C em relação às demais deixa a impressão que as três curvas se confundem até o quarto impulso. No entanto seus valores são distintos, e o número de impulsos amplifica a diferença de comportamento em relação à temperatura.

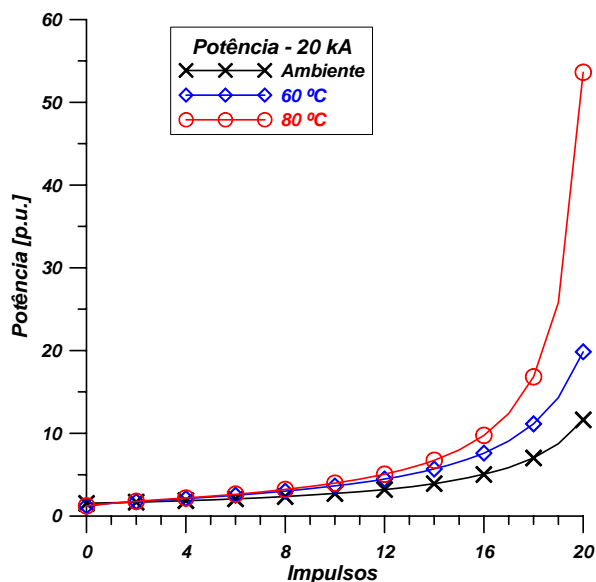


Figura 6.47 – Potência para impulsos de 20 kA

6.7. O EFEITO DA AMPLITUDE

As Figuras 6.48 a 6.51 mostram o efeito da amplitude no valor do pico negativo para as quatro amplitudes de corrente de impulso, em dois gráficos. O da esquerda com as quatro amplitudes e o da direita com apenas as duas amplitudes mais reduzidas. Devido aos valores mais elevados obtidos com os impulsos de 20 e de 30 kA a escala de cada gráfico, por vezes, não permite uma visualização/comparação clara entre as curvas de 10 kA e 15 kA. Desta forma, o gráfico da esquerda posiciona a curva de 20 e 30 kA em relação às menores, e o da direita, compara as duas de amplitudes menores entre si.

A Figura 6.48a mostra nitidamente a influência da amplitude, em temperatura ambiente, sobre a elevação do pico negativo de corrente. Cinco impulsos de 30 kA impõem uma degradação aos resistores metálicos maiores que vinte impulsos de 10 ou 15 kA, e ainda maior que dez impulsos de 20 kA.

Na Figura 6.48b, observa-se que a amplitude do pico negativo para impulsos de 10 kA é maior do que para impulsos de 15 kA quando aplicados à temperatura ambiente. E nas Figuras 6.49b e 6.50b observa-se que as temperaturas de 60 °C e 80 °C, respectivamente, resultam elevações semelhantes de pico negativo para as amplitudes de 10 kA e 15 kA. A ocorrência destes fatos não significa que o envelhecimento das amostras seja o mesmo para 10 kA ou 15 kA, ou seja, que não existe influência da amplitude. A

combinação temperatura-amplitude atua de forma distinta no fenômeno da polarização, tornando menos acentuada a elevação nos impulsos de 15 kA.

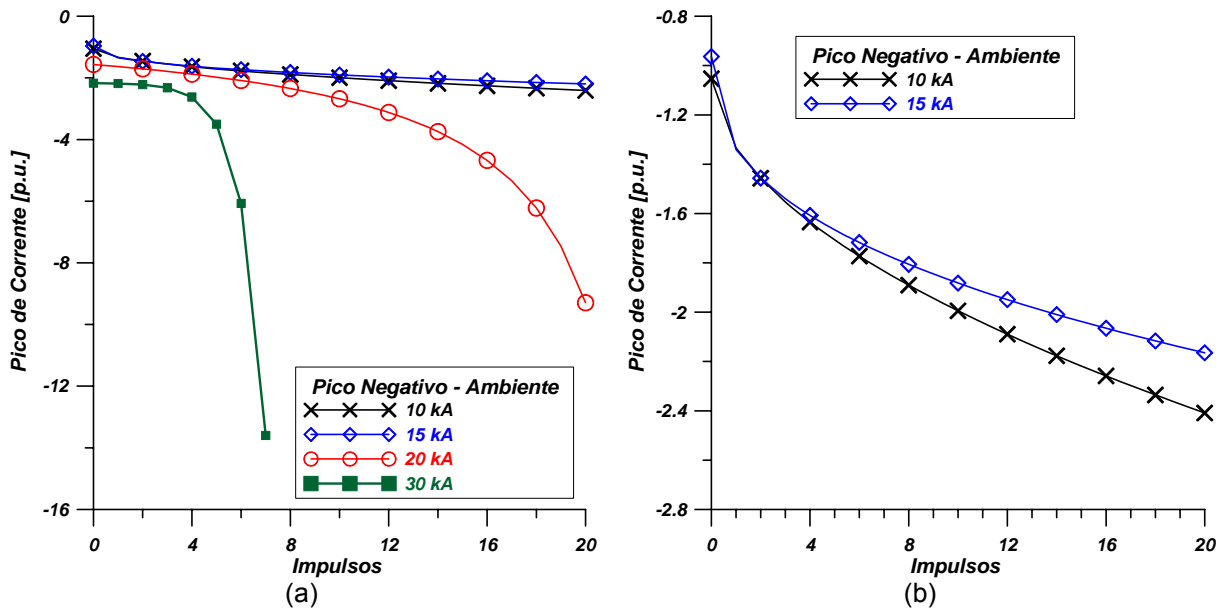


Figura 6.48 – Pico negativo para a temperatura ambiente

A Figura 6.49a confirma a aceleração acentuada dos impulsos de 30 kA mostrado na Figura 6.48a, além de mostrar que a elevação de temperatura para 60 °C praticamente duplicou o valor do pico negativo da corrente de fuga. A Figura 6.50, no entanto, devido à destruição prematura das amostras mostra valores inconsistentes para os impulsos de 30 kA a 80 °C.

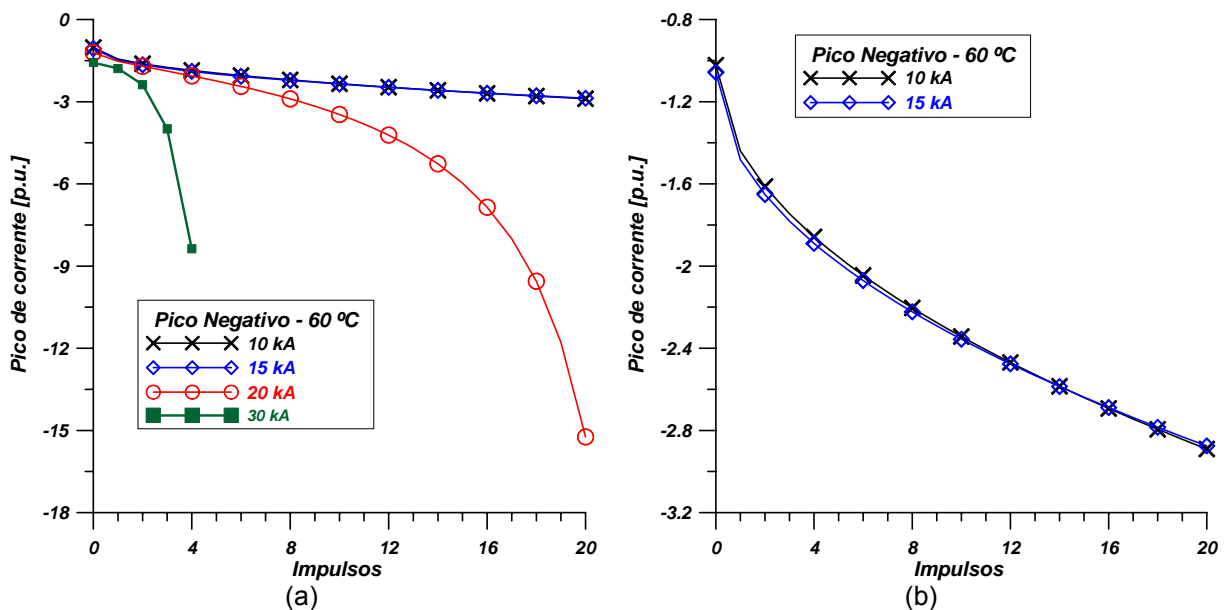


Figura 6.49 – Pico negativo para a temperatura de 60 °C

A compensação desta inferioridade e/ou igualdade de valores de corrente de fuga face à diferença de amplitudes pode ser explicada nas Figuras 6.51 e 6.52. A Figura

6.51a compara a diferença entre as três amplitudes e em (b) são comparados apenas os picos positivos à temperatura ambiente para 10 e 15 kA. Apesar da aleatoriedade apresentada pelas Figuras 6.3 e 6.14, o pico positivo dos impulsos de 15 kA aplicados à temperatura ambiente apresentou valores mais elevados que os referentes a 10 kA, conforme se verifica na Figura 6.51b.

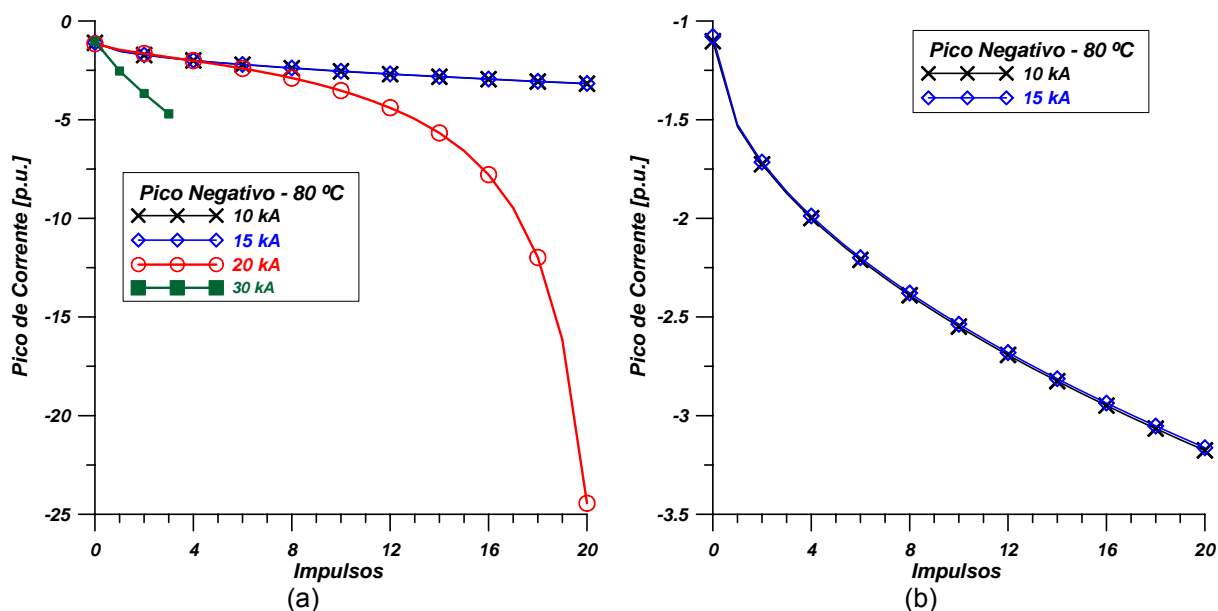


Figura 6.50 – Pico negativo para a temperatura de 80 °C

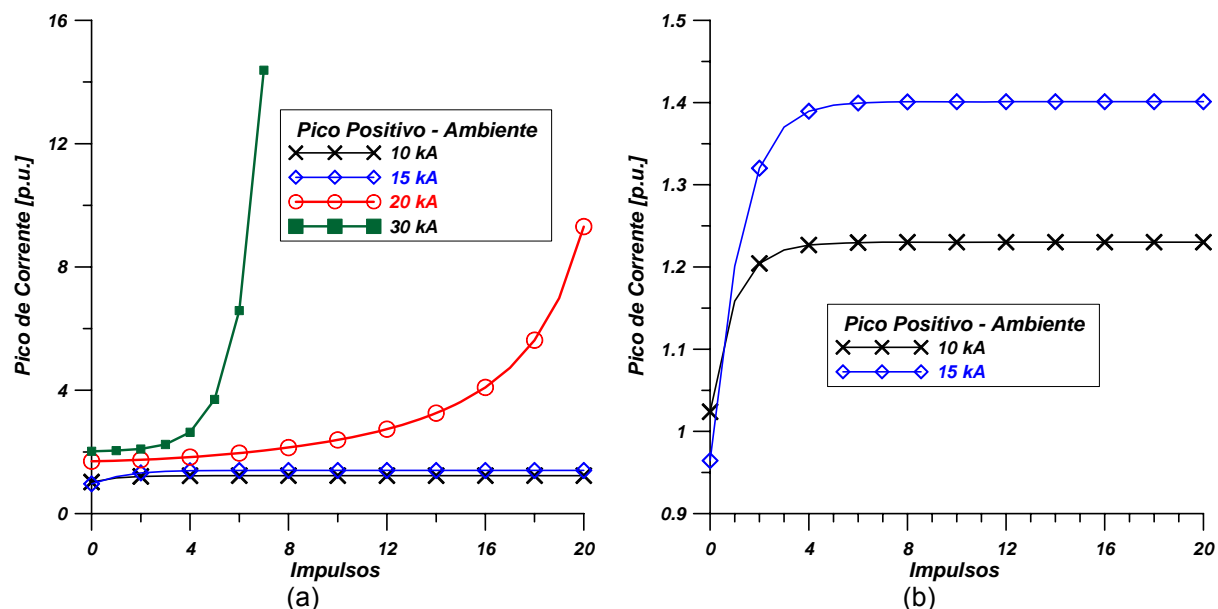


Figura 6.51 – Pico positivo à temperatura ambiente – a) 10, 15, 20 e 30 kA; b) 10 kA e 15 kA

De forma similar, a Figura 6.52 mostra a comparação entre os picos positivos resultantes da aplicação de impulsos de 10 kA e 15 kA com as amostras a 60 °C – à esquerda – e 80 °C à direita. Neste caso, a aleatoriedade apresentada pelas Figuras 6.3 e 6.5 (10 kA) não se reproduz nas Figuras 6.15 e 6.16 (15 kA) que apresentam uma tendência

de crescimento em função do número de impulsos. A polarização mais reduzida é então compensada por valores mais elevados e ordenados de pico positivo.

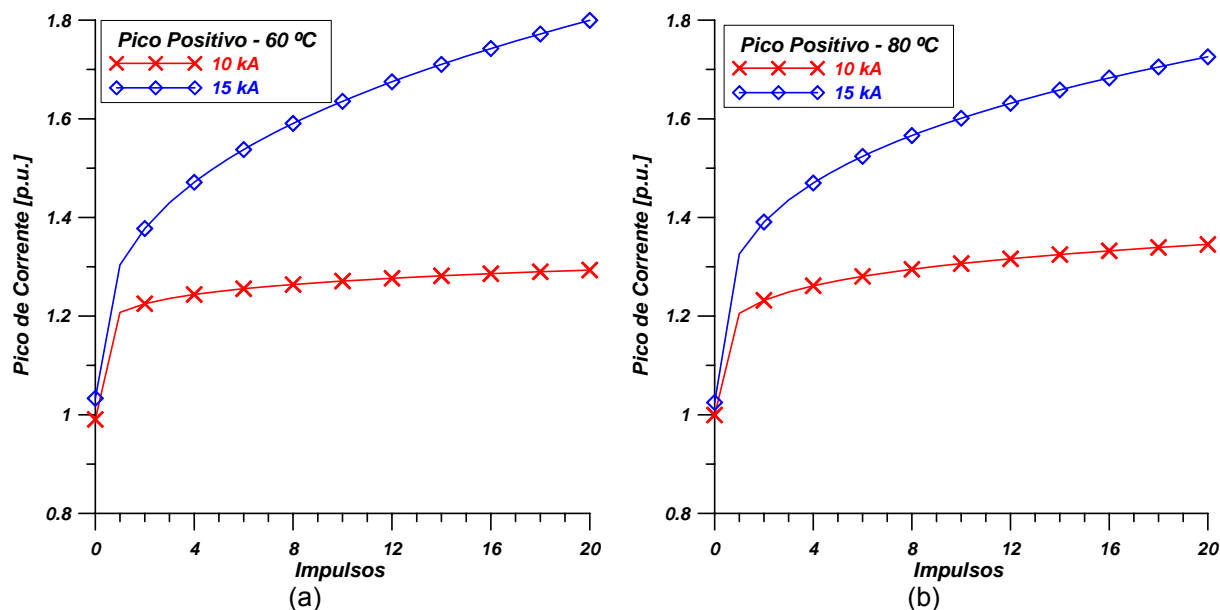


Figura 6.52 – Pico positivo para a 10 kA e 15 kA – a) 60 °C; b) 80 °C

Desta análise conclui-se que para os impulsos de 10 kA a qualquer das temperaturas referenciadas, o efeito da polarização com sentido preferencial negativo é pronunciado e o pico positivo apresenta valores aleatórios após cada aplicação de impulso. Por outro lado, a elevação da amplitude reduz o efeito da polarização e, em contrapartida, proporciona uma definição na tendência de valores do pico positivo. Este efeito da amplitude encontra consistência nos impulsos de 20 kA, onde os picos positivo e negativo apresentam praticamente a mesma amplitude e tendência de elevação de valores bem definida para as duas polaridades do pico de corrente de fuga.

É possível, então, afirmar que o aumento da amplitude de impulso tende a reduzir tanto o efeito da polarização, quanto a aleatoriedade dos valores de pico positivo.

As Figuras 6.53 a 6.55 apresentam a variação da potência dissipada em relação à amplitude do impulso de corrente aplicado. Os gráficos à esquerda evidenciam a diferença de comportamento dos impulsos de 20 e 30 kA em relação às demais. Os gráficos à direita, fornecem uma visualização melhor da diferença entre os impulsos de 10 e 15 kA.

A análise da variação de potência em relação à amplitude mostra que existe uniformidade de comportamento independente da temperatura da amostra no instante do impulso. Portanto, dentro dos parâmetros avaliados, a potência dissipada se apresenta como o parâmetro mais adequado para estimar o estágio de envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico frente a impulsos de curta duração.

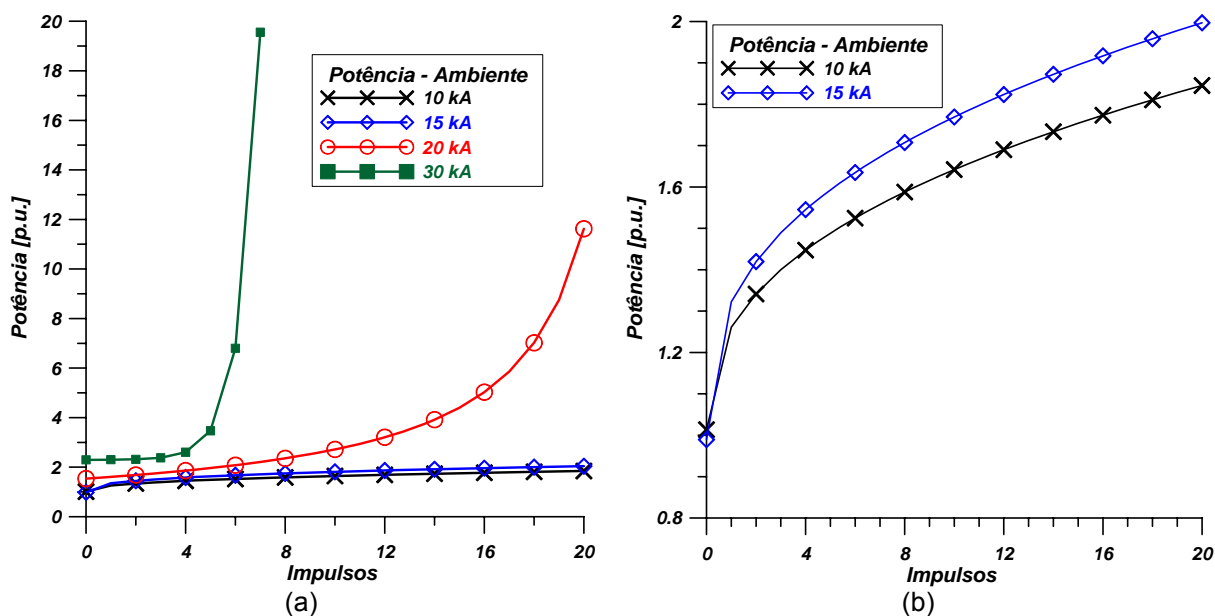


Figura 6.53 – Potência para a temperatura ambiente

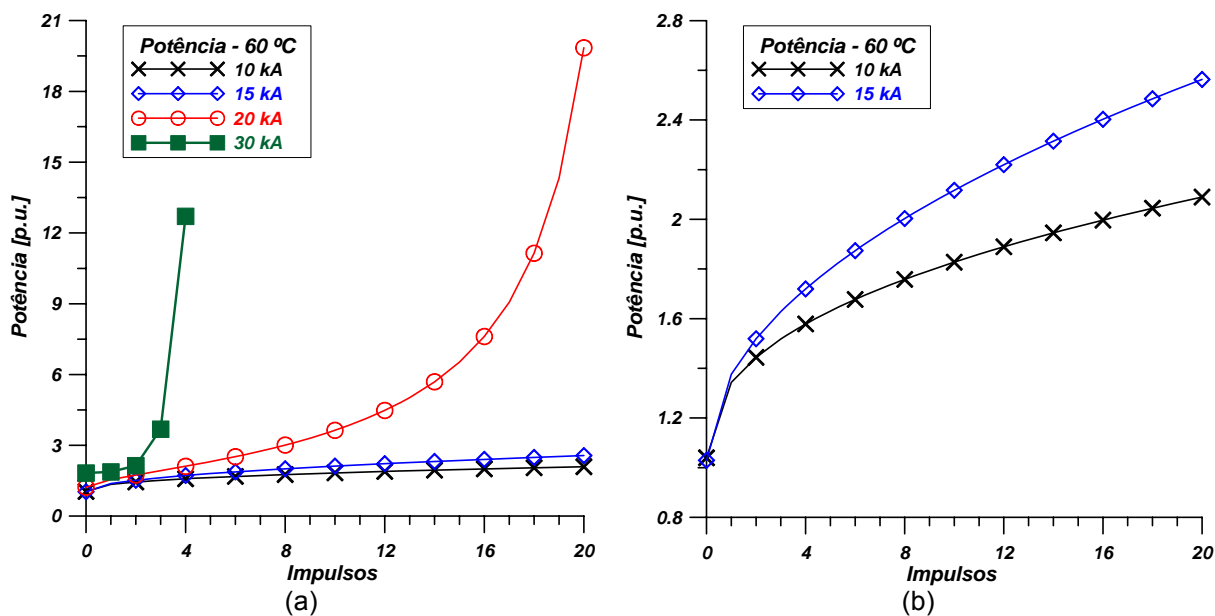


Figura 6.54 – Potência para a temperatura de 60 °C

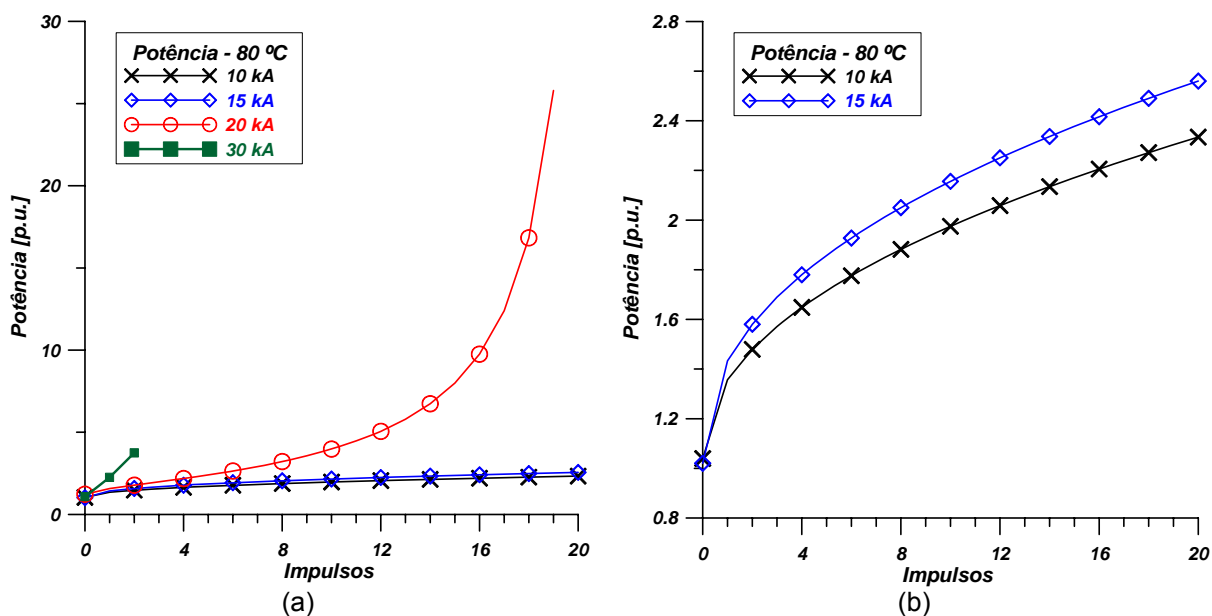


Figura 6.55 – Potência para a temperatura de 80 °C

6.8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6

- [6.1] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.

CAPÍTULO 07

CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados é possível observar que o fator mais importante no processo de envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico é a amplitude do impulso, e que a temperatura acentua/acelera os efeitos de cada amplitude.

Nas duas amplitudes mais baixas é possível observar que o maior incremento na corrente de fuga acontece na aplicação do primeiro impulso, conforme observado em [7.1], com exceção dos casos em que as amostras já se encontram próximas à região de avalanche térmica, como ocorrido com as amostras ensaiadas com 20 kA. Este mesmo fenômeno necessita de um número maior de impulsos para amplitudes menores.

Para as descargas de 10 kA, as amostras ensaiadas apresentaram um comportamento adequado para os parâmetros analisados. De acordo com o fabricante, a corrente nominal destes resistores é, de fato, 10 kA. Isto explica a necessidade de 12 impulsos de 10 kA – à temperatura ambiente – para se obter o mesmo valor em p.u. da potência consumida após o primeiro impulso de 20 kA.

De acordo com ^[7.2], em para-raios de 10 kA, o ensaio de alta corrente de impulso durante o ciclo de operação é executado com a aplicação de dois impulsos de 100 kA. Sem dúvidas a estabilidade térmica após a aplicação dos impulsos é o ponto chave na verificação da capacidade do resistor a óxido metálico de se resfriar após surtos severos. No entanto, pelo menos dois parâmetros não são considerados: a tensão residual do para-raios, e o real envelhecimento imposto ao equipamento.

No primeiro, frente a um impulso de 10 vezes a corrente nominal a tensão residual seria superior à tensão suportável pelo equipamento protegido pelo para-raios. A queima então do equipamento protegido representaria uma inversão de papéis, onde o para-raios seria protegido pela relativa baixa suportabilidade do equipamento sujeito a falha.

No segundo, em uma previsão otimista de considerar o envelhecimento um fenômeno linear em função da amplitude do impulso, e observando a degradação imposta por impulsos equivalentes a duas vezes a corrente nominal do para-raios, a aplicação de duas descargas desta amplitude, se não for o suficiente para destruir a amostra, a colocaria em uma região próxima de instabilidade térmica (thermal runaway).

Estudos recentes em uma área de concessão de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul, um dos maiores níveis cerâmicos da América do Sul ^[7.3 – 7.4] mostram que 98,5% das correntes descarregadas por para-raios na área urbana e 96 % na zona rural são menores que 40 kA, como nas Figuras 7.1 ^[7.3 – 7.4] e 7.2 ^[7.3 – 7.4], respectivamente.

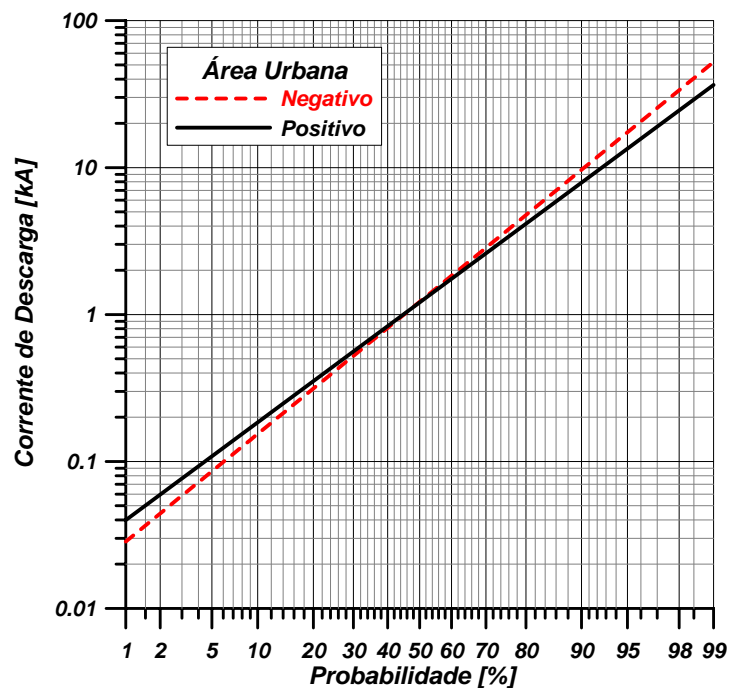


Figura 7.1 – Probabilidade acumulada de amplitude de corrente descarregada por pára raios na área urbana na região do Rio Grande do Sul

Até que ponto seria então conveniente ter um equipamento de proteção apto a se resfriar após uma descarga de 100 kA com níveis de tensão residual, de fato não comumente registrados, provavelmente maiores que o nível básico de isolamento do equipamento protegido e seriamente envelhecido em campo?

Conforme demonstrado, a amplitude dos impulsos é o principal fator de envelhecimento dos resistores não lineares a óxido metálico. Considerando que a

probabilidade de ocorrência de uma única descarga de amplitude elevada é tão baixa, a aplicação de dois impulsos durante os ensaios não se mostra necessária. Neste ponto seria, então, mais adequado ter um para-raios com habilidade para se resfriar após duas descargas de 65 ou 40 kA e, conseqüentemente, com menores valores de tensão residual e um processo de envelhecimento menos acelerado.

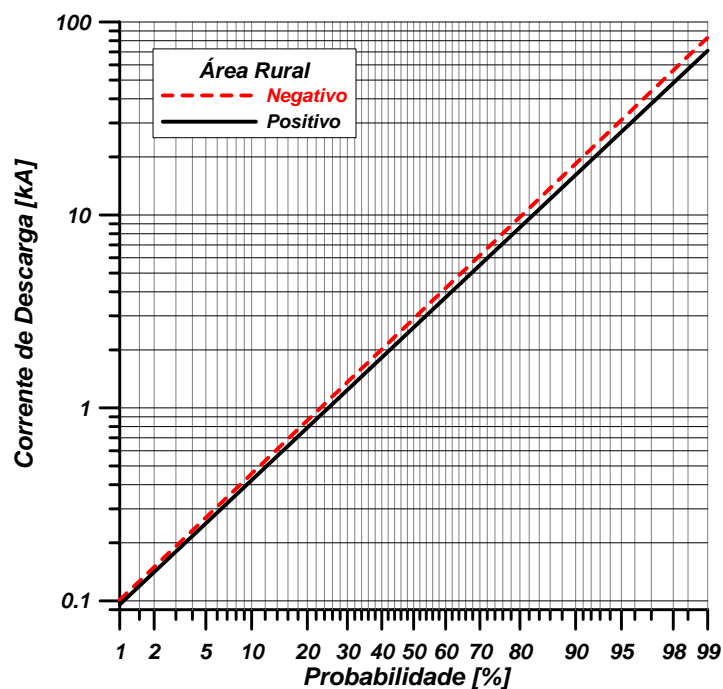


Figura 7.2 – Probabilidade acumulada de amplitude de corrente descarregada por pára raios na área rural na região do Rio Grande do Sul

A definição da corrente nominal de um resistor não linear a óxido metálico e/ou para-raios é baseada em dois fatores: o primeiro é o mecanismo de troca de calor, e o segundo, como observado no presente caso, o processo de envelhecimento. Segundo mostrado, os impulsos de 15 kA apresentam, pelo menos para certo número de impulsos, o mesmo envelhecimento obtido com os impulsos de 10 kA – a corrente de descarga nominal declarada pelo fabricante das amostras.

Outro ponto a ser observado é que para todo projeto de resistor não linear existe um impulso a partir do qual haverá ocorrência ou maior probabilidade de runaway. Não seria interessante alguma recomendação das normas nacionais e/ou internacionais sobre este ponto?

A suportabilidade à aplicação de dois impulsos de 100 kA, como normalmente requerido, pode ou não “mascarar” o processo de envelhecimento, ou apenas colocar as amostras próximas à região de runaway e de instabilidade térmica? Se for esta a razão por trás do requisito, seria conveniente fornecer ao usuário do para-raios um parâmetro para o

processo de envelhecimento pela verificação da potência dissipada antes e após a aplicação dos impulsos.

Finalmente, esta tese traz como contribuições:

- A definição de um método de ensaio para avaliar e/ou determinar corrente nominal descarga, observando a eficiência das leituras de potência dissipada ante os parâmetros de polarização;

- A avaliação e/ou determinação de qual o melhor modelo para verificar a degradação frente a surtos atmosféricos que difere do existente na literatura por contemplar não linearidades existentes;

- Definição do papel dos ensaios de corrente elevada previstos nas normas, ou seja, preservar a integridade física, sem correspondência com a eficácia na proteção ou característica de envelhecimento mesmo quando se verifica a estabilidade térmica;

- Lançamento de bases para uma proposta para a avaliação do desempenho e/ou envelhecimento de resistores e/ou para-raios como definição de limites par a variação da potência dissipada após ciclo de solicitação;

- Comprovação da influência da temperatura e da amplitude da corrente de descarga nos modos de envelhecimento e/ou falha, agravadas pela não linearidade dos fenômenos;

- Se a capacidade de absorção de energia é função da tensão residual, propõe a avaliação da suportabilidade dos para-raios com base na sua capacidade de escoamento de carga na forma de impulsos repetitivos.

Como trabalho futuro recomenda-se a extensão e aperfeiçoamento do presente para impulsos de manobra e a levantar de forma concisa a relação carga escoada – número de descarga (ciclo de atuação) – amplitude, forma da corrente e temperatura da amostra, haja vista que por exemplo, para temperatura de ambiente na forma 8/20 μ s, 0,04 C de modo aparentemente indefinido > 100 aplicações e 0,08 C somente X aplicações.

7.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 7

[7.1] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.

[7.2] IEC 60099-4:2004 Part. 4: “Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”.

- [7.3] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez and H. R. P. M. de Oliveira, “Determination of the Discharge Current on Distribution Network Surge Arrester”, presented at Powertech 2009, Bucharest, Romania, 2009.
- [7.4] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Distribution Networks*”. Proceedings of X SIPDA – Curitiba 2009.

CAPÍTULO 08

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1. CAPÍTULO 1

- [1.1] MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos* – 3ª edição – Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A, 2005. 792 p.
- [1.2] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [1.3] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Disribution Networks*”. Proceedings of X SIPDA – Curitiba 2009.
- [1.4] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Disribution Networks Surge Arresters*”. Proceedings of PowerTech 2009 Bucarest - Romania.

8.2. CAPÍTULO 2

- [2.1] M.L.B. Martinez, “*Para-raios para Sistemas de Média Tensão – Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência*”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – 1992.
- [2.2] Sakshaug, E.C. et al, “*A New Concept in Station Arrester Design*”, Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE – PAS pp. 647-656 – 1977.
- [2.3] Imataki, M. et al, “*Advanced Metal Oxide Surge Arrester for Gas Insulated Switchgear*”, Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE – PAS 103 – pp 2990-2998 – 1984.

- [2.4] Miznuo, M. et al. “Thermal Stability and Life of the Gapless Surge Arrester”, Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 100 – pp 2664-2671 – 1981.
- [2.5] Martinez, M.L.B., “Para-raios a ZnO – Tipos Construtivos”, I Seminário Sobre materiais do Setor Elétrico, Curitiba – 1987.
- [2.6] Martinez, M.L.B., “Para-raios a Óxido de Zinco – ZnO para Sistemas de Distribuição – Características Construtivas – Comentários Gerais”, I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte – 1990.
- [2.7] Westrom, A.C., Law, S.W., “Increasing the Reliability of Metal Oxide Arrester”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE – PWRD 5 – pp. 1823-1829 – 1990.
- [2.8] Cogo, J.R., Martinez, M.L.B., “Aspectos Tecnológicos da Construção de Para-raios para Sistemas de Potência em Média Tensão”, VI Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá – 1992.

8.3. CAPÍTULO 3

- [3.1] Electric Power Research Institute; “Development of a New Type of Nonlinear Resistance Valve Block for Surge Arresters”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL – 11647, 1980.
- [3.2] Electric Power Research Institute; “Gapless Surge Arresters for Power Systems Applications – Volume I, II, and III”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL – 3166, 1983.
- [3.3] Ragaller, K., et al.; “Surges in High Voltage Networks”; BBC – Brown Boveri Company Limited; Plenum Press; First Edition, New York – 1980.
- [3.4] Martinez, M.L.B.; “Para-raios a Óxido Metálico para Sistemas de Potência”; Apostila do Curso Sobretensões – FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria – 1ª Edição; Itajubá – 1984.
- [3.5] M.L.B. Martinez, “Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação”, Tese de Doutorado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 1998.
- [3.6] MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos* – 3ª edição – Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A, 2005. 792 p.
- [3.7] LAT, MV, “Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE – PAS 102 – pp. 2914-2202 – 1983.

- [3.8] Bernhard Ritcher – ABB Switzerland Ltd “Metal Oxide Surge Arresters for Distribution Systems” Tutorial Cigré.
- [3.9] Hinrichsen V. “Metal-Oxide Surge Arresters – Fundamentals Siemens AG, 1st edition, 114 pages. Download: www.siemens.com/arresters.
- [3.10] Kai Steinfeld, Siemens AG, Berlin Germany, “Design of Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housings”. www.siemens.com/arresters
- [3.11] Volker Hinrichsen, Darmstadt university of Technology “Designs of Station-Class polymer Housed Surge Arresters”. Cigré-Brasil. www.abb.com.br
- [3.12] Carrol, D.P., et al.; “A Dynamic Surge Arrester Model for Use in Power System Transient Studies”, Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 91 pp.1057-1067, 1972.
- [3.13] LAT, M.V. et al.; “Application Guide for Surge Arresters on Distribution Systems”; Ontario Hydro Research Division; First Edition; Toronto, 1998.
- [3.14] Pereira, P.S., Martinez, M.L.B.; “Simulação do Comportamento Transitório de TC’s”; VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 1984.
- [3.15] Martinez, M.L.B.; Cogo, J.R.; “The Influence of the Surge Arrester Model on the Results of Electromagnetic Transient Studies”, III Seminário Nacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 1994.
- [3.16] Martinez, M.L.B; Zanetta Jr, L.C.; “Considerações Sobre o Projeto Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores”; V Seminário de Materiais do Setor Elétrico, 1996.
- [3.17] LAT, M.V.; “A Method for Performance Prediction of Metal Oxide Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 104 – pp. 2665-2673, 1985.
- [3.18] Electric Power Research Institute; “Fundamental Research on Metal Oxide Varistors Technology”; Electric Power Research Institute; Final Report EPRI EL-2667, 1990.
- [3.19] LAU, M., et al.; “Surge Discharge Capability and Thermal Stability of Metal Oxide Surge Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 103 – pp. 282 – 289, 1984.
- [3.20] Mizukoshi, A.; et al.; “Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 102 – pp. 1384 – 1390, 1983.

- [3.21] EDA, K.; “Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Current”; American Institute of Physics; Journal of Applied Physics – pp. 2948 – 2955, 1984.
- [3.22] Zander, W.; “Influence of Material Heterogeneity on the Ageing of ZnO Arrester Material”, V International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, 1987.
- [3.23] IEC 60099-4:2004 Part. 4: “Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”.
- [3.24] IEEE Std. C62.11/2005: “IEEE Standard for Metal-Oxide surge arrester for AC power circuits”.
- [3.25] Projeto 03:037.07-002 – Outubro/2007 “Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaios” “
- [3.26] Volker Hinrichsen, Max Reinhard and Bernhard Richter “Energy handling Capability of High Voltage Metal-Oxide Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards”, Cigré International Colloquium –September 12th and 13th, 2007, Rio de Janeiro – Brazil.
- [3.27] “Curso sobre para-raios – Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão” – Franco Engenharia /Cemig – Agosto de 2008.

8.4. CAPÍTULO 4

- [4.1] N.M. Vong, D.M. Ryder, R. Miller – “Mult-factor Ageing of Metal Oxide Varistors”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1994. IEEE 1994 annual Report, Conference on. Volume, issue, 26-26 oct 1994 Pages 406-411.
- [4.2] Tominaga, S.; et al; “Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters”; IEEE – F79-637-07 –Summer Meeting, 1979.
- [4.3] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [4.4] Nishiwaki, S., et al.; “Study of Thermal Runaway Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester”, IEEE – PAS 104 – pp. 2665 – 2673, 1985.
- [4.5] Bengt Johnnerfelt, “Energy handling Capability of ZnO Arresters for Lightning, Switching, Power Frequency Voltages, and Capacitor Banks” MSA/ABB (Japan).

8.5. CAPÍTULO 5

- [5.1] P.M. Vipin, N.K. Kishore, G.R. Nagabhushana and B.N. Jayaram “Degradation of metal Oxide Surge Arresters Under Simulated Natural Conditions” Proceedings of XVI Annual Convention and Exhibition of the IEEE In India - 1990 Page(s): 165 – 169.
- [5.2] Plata, A.M, Ponce, M.A, Rios, M, De la Rosa, Castano, V.M. “Degradation of ZnO Base Surge Arresters Under Field Conditions”. Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings – Volume 143, issue 5, sep/1996, pages 291-297.
- [5.3] Volker Hinrichsen, Max Reinhard, Bernhard Richter, “Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-oxide Surge Arresters Part 1: A Critical Review of the Standards”, Cigrè International Colloquium September 12th-13th, 2007, Rio de Janeiro – Brazil.
- [5.4] Shirakawa, S., et al., “Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No 3 pp 998-1003.
- [5.5] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [5.6] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., *Applied Statistics and Probability for Engineers* – USA – 3rd edition – John Wiley & Sons, Inc. 702 p.

8.6. CAPÍTULO 6

- [6.1] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.

8.7. CAPÍTULO 7

- [7.1] Y. Fujiwara, Y. Shivuya, M. Imataki, T. Nitta, “*Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester*”; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE – PAS 101 – pp. 978-987 – 1982.
- [7.2] IEC 60099-4:2004 Part. 4: “Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”.
- [7.3] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez and H. R. P. M. de Oliveira, “Determination of the Discharge Current on Distribution Network Surge Arrester”, presented at Powertech 2009, Bucharest, Romania, 2009.

- [7.4] C. de Salles, A. F. Picanço, M. L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, “*Discharged Current on Surge Arresters in Distribution Networks*”. Proceedings of X SIPDA – Curitiba 2009.