

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

## **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

### ***ENSAIOS E AVALIAÇÃO ELÉTRICA DE UM NOVO PROJETO DE PARA-RAIOS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO***

***AELFCLÊNITON M. M. DINIZ***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**

**Orientador:** Prof. Manuel Luis B. Martinez, Dr.

**Co-orientador:** Prof. Estácio T. W. Neto, Dr.

**Itajubá, Março de 2011.**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Cristiane Carpinteiro- CRB\_6/1702

D585e

Diniz, Aelfclêniton Mouroner Maciel

Ensaio e avaliação elétrica de um novo projeto de para-raios para sistemas de distribuição em média tensão / por Aelfclêniton Mouroner Maciel Diniz. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2011.

103 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez.

Coorientador : Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Para-raios. 2. Óxido metálico. 3. Corrente de descarga. 4. Risco de falha. 5. Suportabilidade. I. Martinez, Manuel Luis Barreira, orient. II. Wanderley Neto, Estácio Tavares, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

Aos meus pais, Alexandre e Fátima.

A minha esposa, Ana Angélica, e a  
minha filha, Mariana.

# AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, coragem e fé;

Aos meus irmãos, tias, sobrinhos e amigos por sempre acreditarem;

Ao professor Martinez, pela oportunidade, confiança e pela disposição em colaborar e dividir seus ensinamentos;

Ao professor Estácio, pelo apoio, confiança e amizade;

Aos amigos e colegas que compõem a equipe do LAT-EFEI, com quem tanto aprendi;

A AES Sul pelo suporte financeiro;

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

## RESUMO

O projeto de para-raios está associado à determinação da capacidade de absorção de energia. Este parâmetro está diretamente relacionado às características da tensão de operação contínua e da corrente nominal do equipamento. A suportabilidade do para-raios é normalmente definida como a capacidade que este equipamento apresenta em suportar determinados níveis de corrente de descarga sem falhar. No Brasil, é prática comum utilizar nas redes de distribuição para-raios de corrente de descarga nominal de 10 kA. Entretanto, estudos permitem afirmar que para-raios de 5 kA apresentam suportabilidade adequada para a grande maioria das redes de distribuição, desempenhando apropriadamente o seu papel de dispositivo de proteção e apresentando um baixo risco de falha. Este trabalho discorre sobre projeto de para-raios a óxido metálico, com ênfase em uma descarga nominal de 5 kA, destacando a sua suportabilidade frente a surtos, assim como a estimativa da taxa de falhas através da relação entre a distribuição de probabilidade das descargas elétricas em uma determinada região e à suportabilidade do para-raios. O projeto envolve a aplicação de uma sequência adaptada de ensaios, baseada em ensaios de tipo definidos por normas internacionais, para seleção e avaliação de varistores de 5 kA e para-raios em desenvolvimento. O estudo da taxa de falhas permitirá estimar o número de para-raios instalados em uma determinada rede que poderão falhar. Isto permite um melhor planejamento por parte das concessionárias relacionado à necessidade de manutenção, estoque e especificação dos para-raios.

## ABSTRACT

The design of metal-oxide surge arresters is associated to its energy absorption capability. This parameter is directly related to characteristics as the continuous operating voltage and rating current of equipment. The supportability of surge arresters is usually defined as the ability this equipment presents to withstand certain levels of discharge current without failing. In Brazil, it is common practice to use in distribution networks surge arresters with rated discharge current of 10 kA. However, studies indicate that surge arresters of 5 kA present adequate withstand at most distribution networks, properly performing its function of protection device and presenting a low risk of failure. This paper discusses the design of metal-oxide surge arresters with 5 kA, nominal discharge current, highlighting their level of protection, so as the estimation of the failure rate by relating the probability distribution of lightning in a specific region and at supportability of the surge arresters. The project involves the application of an adapted sequence of tests based on type tests defined by international standards, for selection and evaluation of varistors of the 5 kA and surge arresters development. The study of the failure rate will estimate the number of surge arresters installed on a specific network that may fail. This allows a better planning by the concessionaires relating the maintenance necessities, stocking and specification of the surge arresters.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Objetivos .....	3
1.2 - Estrutura.....	3
1.3 - Referências bibliográficas do capítulo 1.....	4
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - O Para-raios de óxido metálico.....	5
2.2 - Evolução histórica.....	6
2.3 - Varistores.....	8
2.3.1 - Propriedades elétricas dos varistores de óxido metálico.....	11
2.3.2 - Comportamento térmico.....	14
2.4 - Estrutura .....	16
2.4.1 - Para-raios com invólucro de porcelana .....	16
2.4.2 - Para-raios com invólucro polimérico .....	16
2.5 - Escolha do para-raios .....	19
2.5.1 - Terminologia .....	19
2.5.2 - Determinação das características .....	22
2.6 - Características dos para-raios atualmente utilizados nas redes de distribuição no Brasil.....	26
2.7 - Classificação dos para-raios sem centelhadores.....	27
2.8 - Referências bibliográficas do capítulo 2.....	29

<b>ANÁLISE DAS NORMAS: ENSAIOS DE TIPO</b> .....	31
3.1 - Principais ensaios de tipo .....	32
3.1.1 - Ensaio de Tensão Suportável no Invólucro .....	32
3.1.2 - Ensaio de Tensão Residual .....	34
3.1.3 - Ensaio de Envelhecimento Acelerado .....	35
3.1.4 - Ensaio de Estandarização .....	37
3.1.5 - Ensaio da Tensão de Rádio Interferência .....	38
3.1.6 - Ensaio de Corrente Suportável .....	40
3.1.7 - Ensaio de Ciclo de Operação .....	42
3.1.8 - Ensaio de Curto-circuito .....	44
3.1.9 - Ensaio do Desligador Automático .....	47
3.2 - Comparativo entre as normas .....	49
3.3 - Sequência reduzida .....	49
3.4 - Referências bibliográficas do capítulo 3 .....	53
<b>ESTIMATIVA DO RISCO DE FALHA</b> .....	54
4.1 - Análise estatística dos níveis das correntes de descarga .....	55
4.2 - Suportabilidade de corrente .....	60
4.3 - Estimativa do risco de falha .....	62
4.4 - Referências bibliográficas do capítulo 4 .....	64
<b>DESENVOLVIMENTO E ENSAIOS</b> .....	66
5.1 - Equipamentos e montagens dos ensaios .....	69
5.1.1 - Ensaio de tensão de referência e potência dissipada .....	69
5.1.2 - Ensaio de tensão de rádio interferência .....	71
5.1.3 - Ensaio de impulso de corrente de curta duração .....	73
5.1.4 - Ensaio de impulso de corrente de longa duração .....	74
5.2 - Resultados obtidos dos ensaios realizados nos varistores .....	76
5.2.1 - Tensão de referência e potência dissipada .....	76
5.2.2 - Tensão residual .....	77
5.2.3 - Seleção dos varistores .....	79
5.3 - Resultados obtidos dos ensaios realizados nos módulos .....	79
5.3.1 - Seleção dos módulos .....	86

5.3.1.1 - Tensão de referência e potência dissipada .....	86
5.3.1.2 - Tensão de rádio interferência .....	87
5.3.1.3 - Tensão residual .....	88
5.4 – Referências bibliográficas do capítulo 5 .....	90
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
6.1 - Conclusões .....	91
6.2 - Trabalhos futuros .....	93
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO II .....</b>	<b>100</b>

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 - Arranjo simplificado exemplificando o modo de proteção de um para-raios.	5
Fig. 2.2 - Varistores de ZnO .....	8
Fig. 2.3 - Estrutura microscópica dos varistores de ZnO.....	9
Fig. 2.4 - Circuito equivalente simplificado de um para-raios de ZnO. ....	10
Fig. 2.5 - Corrente de fuga total e suas componentes capacitiva e resistiva.....	10
Fig. 2.6 - Curva V x I característica típica de um varistor .....	12
Fig. 2.7 - Características Dissipada e Consumida versus Temperatura para um Resistor a Óxido Metálico.....	14
Fig. 2.8 - Falha de um varistor após a aplicação de impulsos de corrente de 40 kA.	16
Fig. 2.9 - Detalhes do projeto construtivo de para-raios moldado .....	17
Fig. 2.10 - Módulos de para-raios utilizados no projeto, 15 kV e 24kV.....	17
Fig. 2.11 - Detalhes de projetos de para-raios tipo gaiola .....	18
Fig. 2.12 - Componentes de para-raios moldados e injetados .....	19
Fig. 2.13 - Curva característica “tensão na frequência industrial x tempo” .....	23

## CAPÍTULO 4

Fig. 4.1 - Marcas de campo, menor área. ....	56
Fig. 4.2 - Marcas de campo, maior área.....	56
Fig. 4.3 - Probabilidade de descarga para a área de concessão da AES Sul. ....	58
Fig. 4.4 - Obtenção dos valores da distribuição Lognormal para a corrente positiva da região 1.....	59
Fig. 4.5 - Curva de distribuição lognormal para a probabilidade das amplitudes das correntes de descarga.....	60
Fig. 4.6 - Curva de probabilidade acumulada para a suportabilidade de para-raios de 5 kA. ....	62

Fig. 4.7 - Sobreposição das curvas de probabilidade e curva correspondente para cálculo da taxa de falhas. ....	63
---	----

## CAPÍTULO 5

Fig. 5.1 - Fonte de tensão senoidal de 60 Hz e Painel de controle e sistema de aquisição .....	70
Fig. 5.2 - Divisor resistivo e shunt para medição de tensão e corrente .....	70
Fig. 5.3 - Transformador de alta tensão alimentado pela fonte de 60 Hz .....	70
Fig. 5.4 - Diagrama esquemático da fonte de tensão senoidal de 60 Hz .....	71
Fig. 5.5 - Arranjo para medição de tensão de rádio interferência.....	72
Fig. 5.6 - Diagrama esquemático do arranjo para medição de tensão de rádio interferência.....	72
Fig. 5.7 - Gerador de impulsos de corrente de curta duração .....	73
Fig. 5.8 - Gerador de impulsos de corrente de curta duração .....	74
Fig. 5.9 - Gerador de impulso de corrente de longa duração .....	75
Fig. 5.10 - Gerador de impulso de corrente de longa duração .....	75
Fig. 5.11 - Diagrama esquemático do Gerador de impulso de corrente de longa duração .....	76
Fig. 5.12 - Falha apresentada no varistor A1 após a aplicação do impulso de corrente de longa duração.....	79
Fig. 5.13 - Corrente de fuga referente às quatro etapas da sequência reduzida. ....	87
Fig. 5.14 - Característica Tensão versus Corrente em módulos de para-raios a óxido metálico .....	89

# LISTA DE TABELAS

## CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Corrente de descarga nominal de acordo com a referida faixa de tensão .....	24
Tabela 2.2 - Níveis eficazes de corrente presumível de falta para os para-raios classe estação e distribuição .....	28

## CAPÍTULO 3

Tabela 3.1- Tensão de ensaio de suportabilidade do invólucro .....	33
Tabela 3.2- Determinação dos valores corrigidos das tensões nominal e de operação contínua.....	36
Tabela 3.3 - Requisitos para o ensaio de impulso de corrente de longa duração em para-raios de 5 kA .....	41
Tabela 3.4 - Parâmetros do modo de falha referentes à para-raios com encapsulamento polimérico – classe distribuição .....	45
Tabela 3.5 - Correntes de curto-circuito requeridas para os ensaios curto-circuito...	45
Tabela 3.6 - Exigências do ensaio .....	46
Tabela 3.7 - Ensaio Exclusivos da ANSI e da IEC/ABNT .....	49
Tabela 3.8 - Sequência reduzida de ensaios nos varistores de ZnO. ....	51
Tabela 3.9 - Sequência reduzida de ensaios aplicada nos módulos/parte ativa dos para-raios projetados. ....	52

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Distribuição de probabilidade de descargas de acordo com a sua intensidade para as regiões de Novo Hamburgo e Lajeado.....	57
---	----

## CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Fabricantes e modelos dos varistores.....	66
Tabela 5.2 - Sequência de ensaios .....	68
Tabela 5.3 - Valores das tensões de referência e potências dissipadas.....	76

Tabela 5.4 - Valores médios de tensão residual de acordo com a corrente aplicada. .....	77
Tabela 5.5 - Falhas dos varistores de acordo com a aplicação de impulsos. ....	78
Tabela 5.6 - Falhas dos varistores de acordo com o fabricante. ....	78
Tabela 5.7 - Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga. .....	80
Tabela 5.8 - Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga. .....	80
Tabela 5.9 - Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga. ....	81
Tabela 5.10 - Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga. .....	81
Tabela 5.11 - Tensão de rádio interferência.....	82
Tabela 5.12 - Tensão residual obtida após a aplicação dos impulsos de 1,5 kA ....	82
Tabela 5.13 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 3,0 kA .....	83
Tabela 5.14 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 5,0 kA .....	83
Tabela 5.15 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 10 kA .....	84
Tabela 5.16 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 40 kA .....	84
Tabela 5.17 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 150 A .....	85
Tabela 5.18 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 250 A.....	85
Tabela 5.19 - Valores médios de tensão de referência e potência dissipada para os varistores do fabricante 4. ....	86
Tabela 5.20 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para as quatro etapas da sequência reduzida de ensaios. ....	87
Tabela 5.21 - Valores médios de tensão residual obtidos a partir dos impulsos aplicados nas Etapas 3 e 4 da sequência reduzida de ensaios. ....	89

# 1

# Introdução

O sistema de distribuição normalmente está sujeito a descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra. Para evitar que equipamentos como transformadores sejam danificados, são instalados no sistema de distribuição equipamentos de proteção contra sobretensões, sendo os para-raios os mais adequados para esta finalidade.

Os para-raios modernos apresentam uma estrutura relativamente simples, formados basicamente pelo empilhamento de pastilhas cerâmicas (chamadas varistores) com característica  $V \times I$  altamente não linear. Comumente utiliza-se carboneto de silício (SiC) ou óxido de zinco (ZnO) como principal elemento dos varistores, sendo este último mais eficiente. Nas literaturas o ZnO é normalmente denominado de óxido metálico. Na presente dissertação esse também será o termo adotado para denominar o ZnO.

O dimensionamento e utilização dos para-raios normalmente seguem orientações prescritas em normas, sendo as mais importantes a ANSI C62-11 de origem norte-americana e a IEC 60099-4 de origem européia. No Brasil, por não haver norma específica, é costume seguir as orientações previstas nestas duas normas, em especial a IEC, que tem sido referência para a maioria das normas nacionais.

As normas estabelecem critérios que se relacionam aos aspectos construtivos, características elétricas e capacidade de absorção/dissipação de energia. Sendo

alguns pontos principais a corrente de descarga nominal, a tensão nominal, a tensão de operação contínua e a energia específica, as quais são explicadas mais detalhadamente nos próximos capítulos. Com base nestes valores, são definidos os requisitos mínimos que um para-raios deve atender afim de que ele atue adequadamente na proteção da rede de distribuição, em especial, do transformador de distribuição. Com isso, para uma mesma classe de tensão, é possível encontrar para-raios com diferentes dimensões e características, as quais, para uma correta definição, necessitam que se tenha o conhecimento da rede e dos equipamentos que são protegidos, assim como da severidade das solicitações elétricas às quais esta rede é submetida.

Convencionalmente, são produzidos para-raios com valores de corrente de descarga nominal de 5 kA, 10 kA ou 20 kA. Esta corrente é uma das grandezas de referencia do para-raios. Ela representa o valor limite para o qual as características de proteção do para-raios, em termos de tensão residual, são asseguradas pelo fabricante. Na prática, estes para-raios podem ser submetidos a correntes superiores à sua corrente de descarga nominal. Isto não significa, no entanto, que nestes casos há falha do para-raios, pois eles são projetados para suportar correntes superiores à sua corrente de descarga nominal, a chamada corrente de suportabilidade. Neste caso, o que acontece é que não se pode assegurar que os valores de tensão residual obtidos estão dentro dos limites aceitáveis para proteção do transformador. Isto depende basicamente da curva característica do para-raios [1].

No Brasil, é prática comum utilizar, nas redes de distribuição, para-raios de corrente de descarga nominal de 10 kA. Entretanto, se forem analisadas as características das descargas atmosféricas no país, é possível afirmar, com base em estudos de campo, que para-raios de 5 kA seriam adequados para a grande maioria das redes de distribuição, desempenhando adequadamente o seu papel de dispositivo de proteção e apresentando uma baixo risco de falha. Entretanto, a utilização de para-raios de 5 kA nas redes de distribuição no Brasil representariam uma quebra de paradigma, sendo necessário mostrar os riscos e os ganhos envolvidos nesta possibilidade, os quais estão relacionados ao risco de falha e ao custo do equipamento. Através da estimativa do risco de falha, é possível avaliar o número de para-raios de uma determinada rede que provavelmente entre em modo

de falha, permitindo um melhor planejamento por parte das concessionárias em termos da necessidade de manutenção, estoque e especificação.

A presente dissertação trata do projeto de para-raios a óxido metálico, com ênfase em unidades de 5 kA, destacando a sua suportabilidade frente a surtos, assim como a estimativa da taxa de falhas através da relação entre a distribuição de probabilidade das descargas elétricas em uma determinada região e à suportabilidade do para-raios.

O projeto de para-raios envolve a determinação da sua capacidade de absorção de energia, a qual está relacionada à sua tensão de operação e, principalmente à sua corrente de descarga nominal – amplitude e duração. Portanto, foi realizada uma sequência de ensaios em varistores e módulos de para-raios (parte ativa do equipamento) de óxido metálico com a finalidade de verificar os requisitos atribuídos a suportabilidade frente a surtos no projeto de para-raios. Os ensaios foram baseados nas principais normas vigentes.

## **1.1 - Objetivos**

Pretende-se, neste trabalho, apresentar o desenvolvimento de um projeto de para-raios de 5 kA com base em uma sequência reduzida de ensaios, apresentando estimativa de falhas destes equipamentos a partir da intensidade de descargas para uma região específica. Com isso, podem ser verificados os critérios que se relacionam as características elétricas e capacidade de absorção/dissipação de energia, bem como realizar um comparativo com a taxa de falhas dos para-raios de 10 kA, convencionalmente utilizados nas redes de distribuição no Brasil.

## **1.2 - Estrutura**

O texto desta dissertação é dividido em seis capítulos, iniciando com a presente introdução.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica referente aos para-raios de óxido metálico, onde aborda-se desde a estrutura até o projeto destes equipamentos.

No capítulo 3 são abordados os ensaios de tipo realizados em para-raios de óxido metálico sugeridos pelas normas IEC 60099-4 (Surge arresters – Part 4: Metal-

oxide surge arresters without gaps for a.c. systems), ANSI/IEEE C62-11 (IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits) e pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002 (Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaio). É apresentado um resumo destes ensaios bem como uma descrição de uma sequência resumida de ensaios baseada nas normas supracitadas e utilizada para avaliação do projeto em desenvolvimento.

O capítulo 4 aborda a análise do risco de falha dos para-raios baseados nos limites de suportabilidade indicados pelas normas vigentes e nos resultados da análise estatística.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados e análise dos resultados dos ensaios realizados nos varistores e nos módulos dos para-raios. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá – LAT-EFEI.

Já no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as proposições de estudos posteriores.

### **1.3 – Referências bibliográficas do capítulo 1**

- [1] HINRICHSEN, V, *Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals*, 1<sup>st</sup> Edition. Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.

# 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1 - O Para-raios de óxido metálico

O para-raios é um dispositivo de proteção dos sistemas elétricos cuja principal finalidade é reduzir as amplitudes das sobretensões transitórias. Estas sobretensões são impostas nos terminais dos equipamentos a níveis pré-estabelecidos e operacionalmente aceitáveis.

Atualmente, o projeto de para-raios mais elaborado para esta finalidade contempla o uso de varistores fabricados a base de óxido metálico e a não utilização de centelhadores. A Figura 2.1 apresenta um esboço do modo de operação de um para-raios.

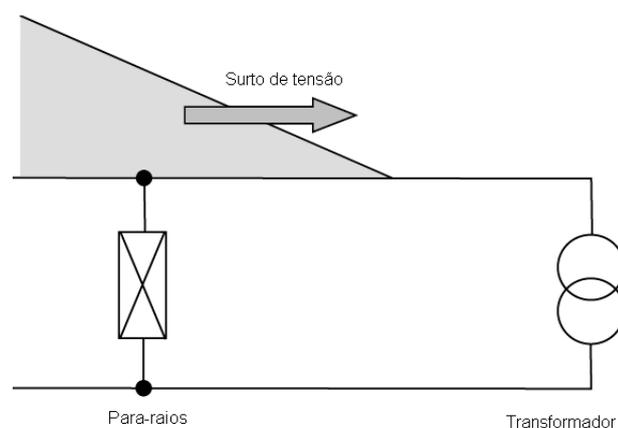


Fig. 2.1 – Arranjo simplificado exemplificando o modo de proteção de um para-raios<sup>[1]</sup>.

## 2.2 - Evolução histórica

A utilização dos para-raios fabricados nos dias atuais só foi possível após um longo processo de desenvolvimentos e aperfeiçoamentos destes equipamentos. Inicialmente utilizavam-se centelhadores separados pelo ar para a proteção dos sistemas elétricos contra descargas atmosféricas e de manobra. Nestes centelhadores, a ignição do arco elétrico ocorria a um nível de tensão relativamente baixo, além de ser dependente das condições atmosféricas e do seu estado de conservação. Eram associados a resistências, disjuntores e fusíveis, sendo esta associação necessária para a extinção do arco elétrico [2].

Na primeira década do século XX passaram a ser utilizados os resistores não lineares na proteção de sistemas elétricos. Estes “novos para-raios” eram compostos de um gap esférico em série com um tanque contendo as células não lineares a base de alumínio. Estas células eram formadas por cones invertidos preenchidos por um eletrólito e eram imersos em óleo isolante. Este tipo de dispositivo promovia uma boa limitação de corrente, mas as tensões de descarga eram altas e aleatórias, havendo ainda o inconveniente do tamanho exagerado do para-raios.

Por volta de 1920 surgiram os primeiros para-raios tipo expulsão. Constituídos basicamente por dois centelhadores montados em um tubo isolante e conectados em série. Seu princípio de funcionamento devia-se à presença de diferentes materiais dielétricos em seus centelhadores, resultando em distribuição de tensão não uniforme entre eles. O início da interrupção ocorria no centelhador localizado na parte superior do para-raios, logo, toda a tensão passava a ser aplicada sobre o centelhador inferior, iniciando o processo de formação do arco em seu dielétrico. Este dielétrico gerava gases que provocavam a deionização do arco provocando a interrupção da corrente de frequência fundamental de forma natural quando da passagem da corrente pelo zero. Por apresentarem vida útil relativamente curta foram pouco utilizados.

Na década de 1930 surgiram os resistores não lineares a base de SiC. Estes resistores apresentavam uma característica  $V \times I$  que, quando associadas a um conjunto de centelhadores, promoviam a proteção contra surtos de maneira bem mais eficaz em relação aos para-raios até então utilizados. Com este tipo de para-raios obteve-se uma redução na tensão de descarga de cerca de 40%, além de uma

redução de cerca de 30% na altura e 80% no volume do mesmo em relação aos dispositivos anteriores. Por volta de 1954, estes dispositivos foram aperfeiçoados com a introdução de centelhadores ativos. Estes centelhadores eram construídos em conjunto com uma bobina que promovia um campo magnético intenso na região de formação do arco elétrico. Este campo magnético tinha duas finalidades principais: alongar o arco e fazer com que ele se movesse sobre a superfície do eletrodo, saindo do seu ponto inicial para um ponto de maior afastamento entre os seus terminais, facilitando dessa forma a sua extinção.

Para-raios a base de SiC ainda são utilizados, com menor demanda, seja nas redes de distribuição rurais ou urbanas ou nas subestações. Com a falta de evolução tecnológica nos para-raios de SiC estes tendem a se tornar obsoletos.

Em meados da década de 1970 surgiram os varistores de óxido metálico, capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos sem a necessidade de uso de centelhadores. Esse novo material (empregado inicialmente na proteção de dispositivos eletrônicos) passou a ser utilizado na composição de supressores de surtos representando um grande avanço dado na proteção dos sistemas elétricos. Com eles, foi possível obter dispositivos com uma capacidade de dissipação de energia duas vezes maior que a promovida pelos dispositivos de carboneto de silício [2].

Na década de 80 diversas empresas (japonesas, européias e americanas) começaram a desenvolver e produzir para-raios de óxido metálico para aplicação em redes de distribuição. Neste período foram produzidos os primeiros para-raios com invólucro polimérico. Isto resultou em uma evolução tecnológica bastante significativa por que, até então, eram conhecidos apenas os para-raios com invólucro de porcelana. Com a utilização de para-raios com invólucro polimérico (em especial os projetos sem espaçamentos internos de ar entre as partes ativas e a parte interna do invólucro) as falhas relacionadas à perda de estanqueidade foram reduzidas.

A partir da década de 90 as empresas concessionárias de energia elétrica e grandes consumidores industriais do Brasil começaram a utilizar o para-raios de óxido metálico com invólucros poliméricos. Desde então, o processo de aquisição de para-raios poliméricos vem crescendo ano a ano, com uma grande quantidade de para-raios com invólucros poliméricos atualmente instalados em redes de

distribuição, em linhas de transmissão e em subestações com tensões nominais até 500 kV [3].

### 2.3 - Varistores

Varistores são dispositivos semicondutores eletro-cerâmicos com características corrente-tensão não lineares. A palavra varistor é derivada do termo “*variable resistor*”. No entanto, os varistores também são conhecidos como: resistores não lineares, resistores variáveis, supressores de surto e limitadores de tensão [4].

Os varistores de óxido metálico são os componentes fundamentais do para-raios. São constituídos, além do ZnO, por outros óxidos aditivos (alumínio, antimônio, bismuto e manganês). Estes outros óxidos, principalmente os de bismuto e o de antimônio, são responsáveis pela formação da camada intergranular, ou seja, as camadas entre os grãos de ZnO que proporcionam ao material características exclusivas. As características dos varistores variam em função de sua composição e pureza [5]. A Figura 2.2 mostra alguns varistores de óxido metálico.



Fig. 2.2 - Varistores de óxido metálico.

A origem do comportamento não linear está relacionada com as características microestruturais dos varistores que são dependentes do tipo de processamento empregado e da natureza dos dopantes. Na Figura 2.3 pode ser observada a estrutura microscópica dos varistores com os grãos de óxido metálico e camadas intergranulares.

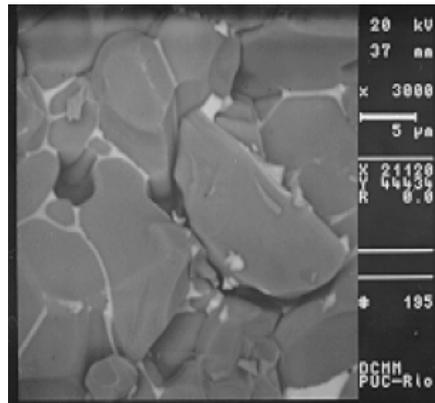


Fig. 2.3 - Estrutura microscópica dos varistores de óxido metálico<sup>[6]</sup>

Os varistores de óxido metálico são preparados pela sinterização de grãos de ZnO, um semicondutor tipo n, na presença de pequenas quantidades de óxidos metálicos como bismuto, cobalto, manganês, antimônio e outros. Estes materiais passam por um processo de mistura e moagem até que as partículas atinjam o tamanho adequado (da ordem de  $10^{-6}$  cm). Esta mistura é prensada no formato de pastilhas e sinterizada em fornos com tempo e temperatura programados. A pastilha já resfriada é então submetida a um processo de metalização de sua superfície e aplicação de um colar isolante em sua lateral. O disco varistor completo é recozido para proporcionar maior estabilidade das suas características no tempo [5].

Finalmente, cada varistor é ensaiado nas regiões de baixa e alta corrente, determinando-se assim as suas características. Os varistores de óxido metálico tornam-se materiais policristalinos compostos de grãos de ZnO, semicondutores, com contornos de grãos bem definidos. A região intergranular apresenta características de materiais semicondutores de modo que a condução elétrica nos varistores pode ser explicada a partir da teoria de formação de barreiras de potencial [7].

Sendo a parte ativa dos para-raios de óxido metálico composta por varistores, verifica-se na Figura 2.4 o circuito elétrico equivalente simplificado dos para-raios.

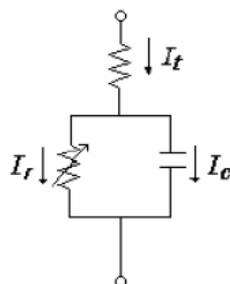


Fig. 2.4 - Circuito equivalente simplificado de um para-raios de ZnO.

Verifica-se no circuito da figura 2.4 a corrente de fuga total ( $I_t$ ) e suas componentes resistiva ( $I_r$ ) e capacitiva ( $I_c$ ). A componente resistiva representa a corrente que percorre a resistência não linear. A componente capacitiva representa a corrente que percorre a capacitância formada pelos grãos de ZnO separados pela região intergranular. A componente  $I_c$  é predominante na tensão de operação do para-raios e apresenta comportamento praticamente senoidal quando o para-raios está submetido à tensão de operação do sistema. A Figura 2.5 apresenta a corrente de fuga total e suas componentes  $I_r$  e  $I_c$ .

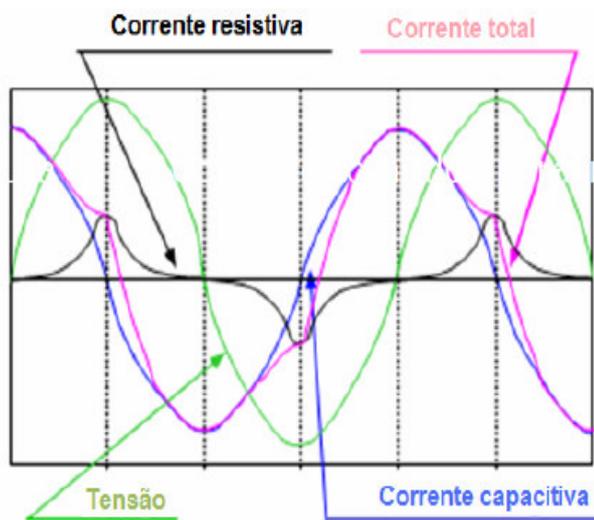


Fig. 2.5 - Corrente de fuga total e suas componentes capacitiva e resistiva<sup>[3]</sup>

O aumento da tensão promove mudanças nas características dos varistores, resultando no aumento da componente resistiva da corrente de fuga. Esta corrente é responsável pelas perdas no para-raios. A componente resistiva da corrente de fuga é caracterizada por apresentar distorções harmônicas face às características não

lineares das regiões intergranulares. Sua resistividade é fortemente dependente do campo elétrico aplicado, da temperatura e da frequência.

Em condições normais de operação, os para-raios de óxido metálico podem ser submetidos a diferentes solicitações: tensão normal de operação, sobretensões temporárias, descargas de longa duração ou de alta intensidade e curta duração, contaminação externa do invólucro e penetração de umidade por perda de estanqueidade. Estas solicitações afetam e alteram significativamente a característica  $V \times I$  dos elementos de óxido metálico utilizados no projeto dos para-raios, levando a degradação ou envelhecimento.

### **2.3.1 - Propriedades elétricas dos varistores de óxido metálico**

A propriedade mais importante dos varistores de óxido metálico é a sua característica não linear  $I \times V$ . Desenvolvidos inicialmente para aplicação em circuitos eletrônicos, suas características não lineares e a baixa corrente de fuga na tensão de operação em regime permanente, adicionadas à alta capacidade de absorção térmica, fizeram o varistor de óxido metálico atrativo para as aplicações elétricas de potência. Essa associação de fatores representou um avanço em relação aos para-raios convencionais a carboneto de silício, possibilitando um novo tipo de equipamento com níveis de proteção melhores. Isto é possível devido a conexão direta dos varistores que compõem o para-raios ao sistema elétrico gerando apenas uma corrente de fuga desprezível em condições de operação normal.

Na figura 2.6 estão destacados os principais aspectos referentes a um varistor de óxido metálico. Podem-se ver três regiões distintas: a região de baixa corrente (região I), a região de alta não linearidade (região II) e a região de alta corrente (região III).

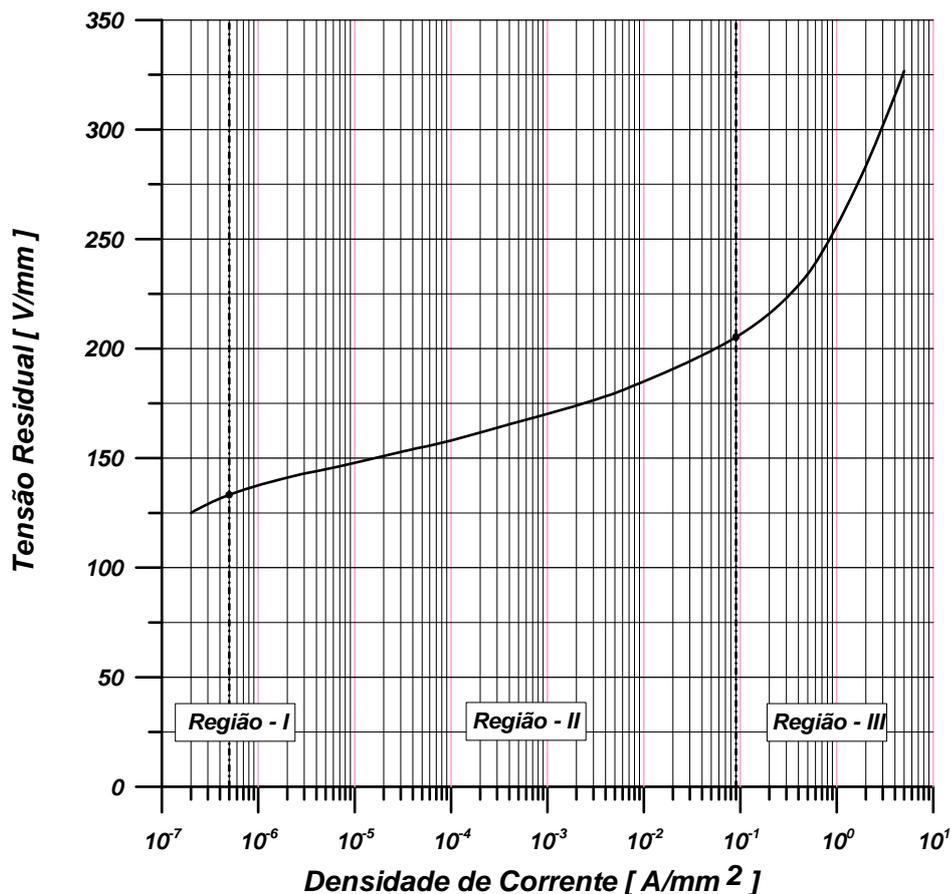


Fig. 2.6 - Curva V x I característica típica de um varistor<sup>[8]</sup>

A região I (região linear de baixa corrente) é caracterizada por um comportamento aproximadamente linear, dependente da temperatura e torna-se bastante íngreme nas proximidades da região de ruptura. As propriedades elétricas principais são determinadas pelas características dos contornos de grão de ZnO. Nesta região o para-raios opera em regime permanente.

A tensão nominal do para-raios é o limite entre as regiões I e II. Quando se trata de para-raios de óxido metálico sem centelhadores, a tensão nominal não representa a tensão que pode ser aplicada continuamente sobre o mesmo, e sim a tensão que pode ser aplicada temporariamente sobre este equipamento sem causar danos aos varistores.

Na região II (alta não linearidade) o para-raios conduz uma grande corrente, mesmo para pequenas variações de tensão. O grau de não linearidade é determinado no patamar da região não linear, quanto menos inclinada for a curva (I x V), melhor será o dispositivo ou equipamento.

O limite entre a região de alta não linearidade e a região de alta corrente é denominado de nível de proteção contra surtos atmosféricos. Este ponto da curva representa a queda de tensão no para-raios quando uma descarga de corrente nominal flui entre seus terminais.

A região III (região de alta corrente) está diretamente relacionada ao nível de proteção oferecida pelo para-raios. Trata-se de uma região de condução aproximadamente linear. Nesta região, o para-raios pode entrar em processo de avalanche térmica e não se pode assegurar a manutenção de suas características.

O mecanismo de condução no óxido metálico pode ser explicado em termos de sua microestrutura [5]. Conforme visto anteriormente (Figura 2.3), o material é composto de duas regiões distintas – os grãos de ZnO e a região intergranular, composta de outros óxidos metálicos. A região entre grãos é de fundamental importância na primeira parte da curva característica, sendo que a intensidade da corrente de fuga depende essencialmente dos materiais constituintes desta camada. O processo de condução na primeira parte da curva característica é explicado pelos mecanismos de barreiras de potencial na região entre os grãos, característicos de dispositivos semicondutores. A temperatura exerce forte influência na condutividade nesta região, já que temperaturas mais elevadas aumentam a energia dos elétrons facilitando sua passagem através das barreiras de potencial. Tal dependência com a temperatura explica o crescimento da corrente de fuga quando os varistores são submetidos a algum tipo de aquecimento.

A segunda parte da curva característica é explicada pela condução através dos grãos de ZnO. Neste ponto da curva a energia absorvida pelos elétrons da camada intergranular se torna tão alta que os impactos causados pelo seu movimento criam lacunas na barreira de potencial nos contornos dos grãos. A corrente de lacunas diminui a largura da barreira de potencial, permitindo o aumento da corrente. A continuidade deste processo leva a redução das barreiras de potencial e, conseqüentemente, destruição dos varistores, chegando-se então a terceira parte da curva característica.

A terceira parte da curva característica apresenta uma elevação drástica da tensão e retorna a ser linear. Nesta região inicia-se a predominância da resistência dos grão de ZnO sobre a camada intergranular e o comportamento ôhmico é definido pela resistividade intrínseca dos grãos da matriz de ZnO.

### 2.3.2 - Comportamento térmico

Durante a operação normal do sistema ao qual se encontram conectados, os para-raios a óxido metálico sofrem um processo de aquecimento devido a potência consumida sob frequência industrial, bem como devido a presença de radiação solar. Uma vez que os resistores a óxido metálico apresentam característica semi-condutora, qualquer elevação na temperatura de operação dos para-raios resulta em uma elevação na corrente de fuga, e na potência consumida, fato que, a princípio, resulta em um fenômeno cíclico, com tendência a instabilidade[8].

Na ocorrência de sobretensões ou surtos, a corrente de fuga que percorre os elementos de óxido metálico sofre um aumento significativo, o que implica no aumento de energia absorvida pelo para-raios e, conseqüentemente, aumento de temperatura. O seu comportamento térmico pode ser analisado através das curvas de estabilidade térmica mostradas na Figura 2.7 [9].

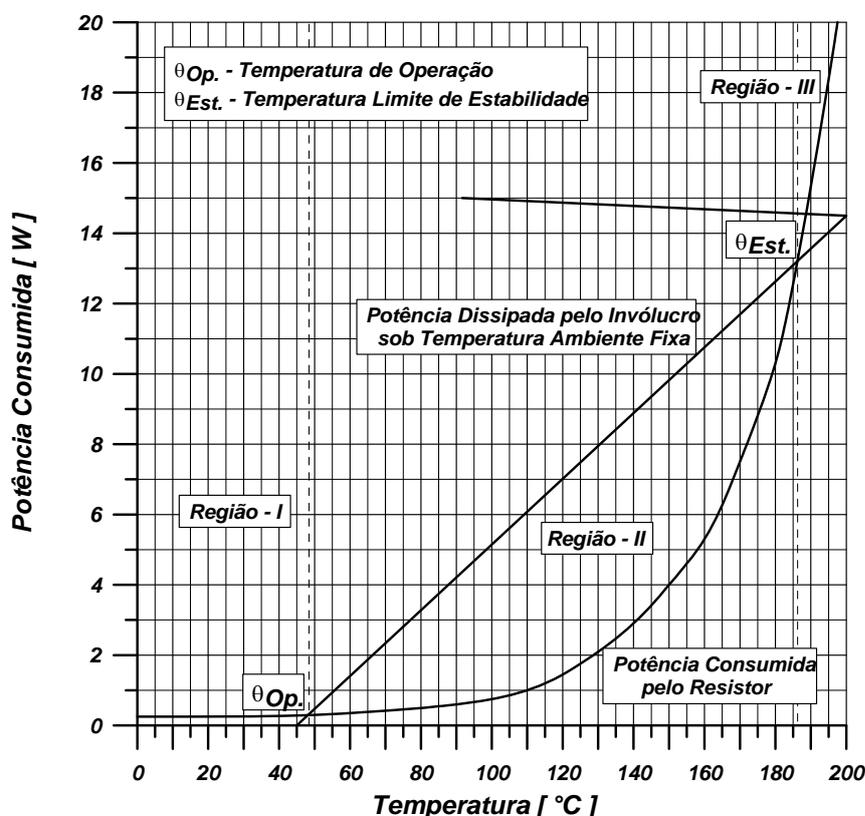


Fig. 2.7 – Características Dissipada e Consumida versus Temperatura para um varistor de óxido metálico <sup>[10]</sup>.

Um varistor é considerado estável termicamente quando após a ocorrência de um surto ele retorna as suas condições normais e mantém sua capacidade de dissipação de calor durante o regime de operação contínua sem apresentar aquecimento excessivo.

Na Figura 2.7 verifica-se que quando a capacidade de dissipação de calor do para-raios é maior que a capacidade de geração de calor, o mesmo apresenta uma tendência intrínseca de retornar ao ponto de equilíbrio estável. Entretanto, se a capacidade de dissipação de calor do para-raios for inferior a capacidade de geração de calor, o mesmo apresenta uma tendência intrínseca a aumentar rapidamente sua temperatura de operação, fato que caracteriza um fenômeno denominado avalanche térmica.

Os para-raios podem, teoricamente, tolerar variações de temperatura até o seu limite de estabilidade térmica. Estas variações são resultantes das descargas de surtos atmosféricos, de manobra ou mesmo de sobretensões em frequência industrial. Esta característica torna-se possível quando o limite de estabilidade térmica não é ultrapassado, resultando sempre no retorno da temperatura para o valor de operação estável. Teoricamente, a margem de temperatura entre o *Ponto de Operação* e o *Ponto Limite de estabilidade Térmica* define a *Máxima Capacidade Teórica de Absorção de Energia* de um para-raios a óxido metálico sem centelhadores [8].

A aplicação de impulsos de correntes de elevada amplitude ou de correntes de longa duração associados a altas energias, são fatores que aceleram o processo de degradação dos varistores produzindo pontos de condutividade seguidos de rupturas ou perfurações. Isto resulta na redução do ponto limite de estabilidade do varistor e conseqüente redução da capacidade de absorção de energia reduzindo assim o desempenho do elemento e deixando-o mais propenso a apresentar falhas. A Figura 2.8 apresenta a fotografia de um varistor que falhou após a aplicação de impulsos de corrente na forma  $4 \times 10 \mu\text{s}$  e amplitude de 40 kA.



Fig. 2.8 – Falha de um varistor após a aplicação de impulsos de corrente de 40 kA.

## **2.4 - Estrutura**

### **2.4.1 - Para-raios com invólucro de porcelana**

Os para-raios utilizados em redes de distribuição aéreas eram fabricados inicialmente com invólucros de porcelana vitrificada não porosa. Entretanto, devido à taxa de falha anual relacionada a este tipo de projeto essa tecnologia vem sendo substituída de forma gradativa por para-raios encapsulados com invólucros poliméricos. Estudos realizados por empresas concessionárias de energia e laboratórios de pesquisa apontam a penetração de umidade por perda de estanqueidade do invólucro como a principal causa de falhas nos para-raios com invólucro de porcelana [3].

No projeto destes para-raios foram inseridos os espaçadores metálicos, cuja função é promover o aumento no tamanho da parte ativa do para-raios (coluna de varistores) e, adicionalmente, facilitar a dissipação de calor destes equipamentos.

### **2.4.2 - Para-raios com invólucro polimérico**

Existem basicamente três concepções de projetos para para-raios poliméricos [3]. Na primeira, o invólucro polimérico é moldado e posteriormente encapsulado sobre o conjunto de varistores de óxido metálico envoltos geralmente em um material de fibra de vidro impregnado em resina epóxi. A interface entre o material de fibra de vidro e a parte interna do invólucro polimérico é geralmente preenchida por fluído de silicone. Portanto, para este projeto os processos de preenchimento dos possíveis espaços de ar e de fechamento do para-raios são essenciais para o

bom desempenho do para-raios. Essa concepção de projeto está ilustrada na Figura 2.9.

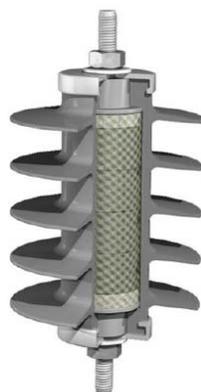


Fig. 2.9 - Detalhes do projeto construtivo de para-raios moldado<sup>[3]</sup>

Na segunda concepção de projeto existe, de forma similar a primeira, o conjunto de varistores encapsulado em um material geralmente de fibra de vidro impregnado em resina epóxi. A diferença desta concepção está no processo de aplicação do invólucro polimérico, que neste caso é feito através de injeção direta. Esta concepção de projeto apresenta como maior vantagem em relação a primeira a ausência da flange para o fechamento do para-raios, reduzindo de forma significativa a possibilidade de penetração de umidade no interior do para-raios. Na Figura 2.10 é possível verificar fotografias de módulos de para-raios cobertos por resina.



Fig. 2.10 – Fotografias de módulos de para-raios utilizados no projeto, 15 kV e 24kV.

Quando se trata do processo de montagem do invólucro diretamente sobre o conjunto encapsulado, verifica-se que este procedimento também reduz os riscos de existência de espaços de ar. Entretanto, há a necessidade de um controle durante o processo de injeção direta no intuito de garantir que este ocorra de forma homogênea, evitando a formação de bolhas de ar. Caso o procedimento de injeção direta não ocorra de forma homogênea, a presença de bolhas de ar pode resultar na formação de descargas parciais que podem conduzir a uma degradação do para-raios ao longo do tempo.

A terceira concepção consiste em um conceito de projeto mecânico bem diferente das duas primeiras concepções, conhecido como projeto tipo gaiola ou “cage design” onde as solicitações mecânicas do para-raios são garantidas pela própria coluna varistores de óxido metálico. Para cumprir esta função varistores são fixados e montados entre os terminais do para-raios por meio de fitas trançadas ou bastões de fibra que são pré-tensionados axialmente em uma faixa de aproximadamente 100 kN. Esta concepção de projeto foi inicialmente desenvolvida para para-raios de distribuição, sendo posteriormente expandida aos para-raios aplicados em subestações e linhas de transmissão.

A principal vantagem desta concepção de projeto em relação aos anteriores se refere a elevada suportabilidade mecânica associada ao seu bom desempenho para as condições requeridas no ensaio de curto-circuito. No entanto, essa concepção geralmente requer uma maior tecnologia de fabricação.

A Figura 2.11 apresenta detalhes construtivos de projetos de para-raios tipo gaiola utilizados por diferentes fabricantes.

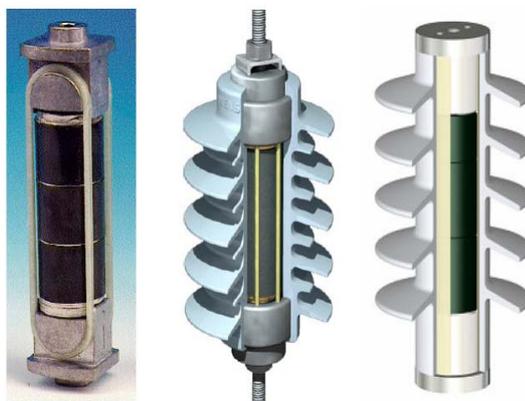
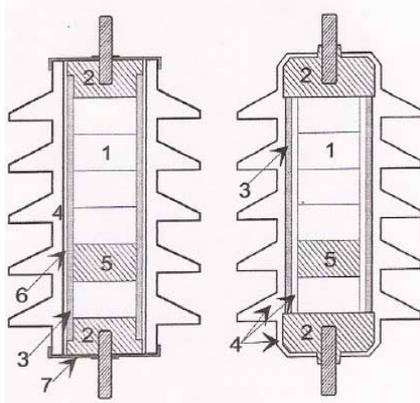


Fig. 2.11 - Detalhes de projetos de para-raios tipo gaiola<sup>[3]</sup>

A Figura 2.12 (extraída da referência [11]) apresenta os componentes básicos encontrados em projetos de para-raios poliméricos moldados e diretamente injetados.



- 1 - Resistores não lineares
- 2 - Terminações metálicas
- 3 - Suporte mecânico
- 4 - Invólucro polimérico
- 5 - Eletrodos metálicos
- 6 - Interface entre o polímero e o suporte mecânico
- 7 - Flanges metálicos

Fig. 2.12 - Componentes de para-raios moldados e diretamente injetados<sup>[11]</sup>

A principal diferença nos componentes utilizados na montagem desses para-raios está na existência de uma interface entre o polímero e o suporte isolante e nos flanges metálicos, os quais são encontrados apenas nos para-raios moldados.

## 2.5 - Escolha do para-raios

A escolha de um para-raios adequado para operação em um sistema específico envolve a determinação dos seus requisitos mínimos, relacionando características elétricas e térmicas. Para isto, os seguintes conceitos precisam ser avaliados:

### 2.5.1 - Terminologia

- **Tensão nominal ( $U_R$ )**

A tensão nominal de um para-raios é o valor de tensão de frequência industrial para o qual o para-raios é projetado. Geralmente a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, sendo permitido ultrapassar este valor somente nas condições estabelecidas explicitamente pelo fabricante do para-raios considerado.

Em para-raios de óxido metálico sem centelhadores a tensão nominal consiste no valor de tensão (eficaz à frequência industrial) que é aplicada aos terminais do para-raios durante 10 segundos sob condições de sobretensão transitória. O para-raios deve operar corretamente e manter a estabilidade térmica após a absorção de uma energia prévia. Esta energia é estabelecida no ensaio de ciclo de operação [3].

- ***Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV)***

É definida como o maior valor eficaz de tensão na frequência fundamental aplicada de forma permanente sob os terminais do para-raios de óxido metálico sem centelhadores onde o mesmo opera de forma contínua sem que haja alteração em suas propriedades térmicas e elétricas.

- ***Corrente de referência***

Consiste no maior valor da componente resistiva da corrente na frequência fundamental utilizada para determinar a tensão de referência dos para-raios. Normalmente é utilizado por parte dos fabricantes uma corrente de referência de 1 mA.

- ***Tensão de referência***

Trata-se do maior valor da tensão de frequência fundamental dividida por  $\sqrt{2}$  que é aplicada aos terminais do para-raios quando por este flui a corrente de referência. Ela define o ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de elevada não linearidade, sendo utilizada como parâmetro para a especificação das características de operação desses para-raios.

- ***Corrente de descarga***

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

- ***Corrente de descarga nominal***

Valor máximo da corrente de descarga com forma 8/20  $\mu$ s utilizado para classificar o para-raios.

- ***Tensão residual***

Defini-se como o valor máximo da tensão que aparece nos terminais do para-raios durante a passagem da corrente de descarga. Sua amplitude é função da forma do impulso e da taxa de crescimento da corrente, bem como da amplitude da corrente de descarga. Ela é importante na determinação dos níveis de coordenação de isolamento, pois os equipamentos a serem protegidos devem apresentar um nível básico de isolamento superior ao valor da tensão residual.

- ***Capacidade de absorção de energia***

A capacidade de absorção de energia pode ser entendida a partir das propriedades intrínsecas dos elementos varistores e das propriedades térmicas dos projetos de para-raios.

A capacidade de absorção de energia intrínseca é relacionada a energia para um único impulso, e está associada a uma solicitação de energia instantaneamente injetada durante um único impulso de energia de poucos micro ou milisegundos que não pode exceder a um valor de energia para o qual os resistores não lineares sofrem uma severa solicitação termo-mecânica. Desta forma, solicitações com elevadas densidades de corrente e de energia podem acarretar uma variação súbita de temperatura em partes dos resistores não lineares, associados com severos esforços de tração e de compressão atuando sobre esses elementos. Estas solicitações podem provocar trincas, “quebras”, perfuração ou descarga na isolação dos resistores não lineares.

A capacidade de absorção de energia térmica está associada com a capacidade de um determinado projeto de para-raios de absorver uma máxima quantidade de energia, para uma dada forma de onda e amplitude de corrente, e ser capaz de dissipar esta energia para o meio externo em forma de calor, mantendo a

sua estabilidade térmica e sem que ocorram alterações significativas em suas propriedades térmicas e elétricas.

A capacidade de absorção de energia é geralmente declarada pelos fabricantes em termos de kJ/kV (nominal ou da MCOV), e está associada a um impulso de corrente com forma de onda e amplitude de corrente definidas.

Um fator importante que deve ser considerado quando da análise da capacidade de absorção de energia de um para-raios é a relação entre a capacidade de absorção de energia e a corrente de descarga que flui pelos resistores não lineares, visto que a capacidade de absorção de energia apresenta uma dependência com as características da corrente de descarga.

### **2.5.2 - Determinação das características**

- ***Determinação da Tensão Nominal***

É possível escolher a tensão nominal do para-raios de óxido metálico sem centelhadores a partir de dois métodos [3]. O primeiro método é baseado em duas premissas:

- 1) Os para-raios sem centelhadores apresentam um valor limite de tensão eficaz de frequência fundamental que pode ser aplicado continuamente entre os seus terminais sem alterações no seu desempenho elétrico. Este valor de tensão é definido como a Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV) do para-raios.
- 2) Devido a elevada capacidade de absorção de energia dos varistores é possível que esses absorvam, por um determinado tempo, uma quantidade de energia proveniente de sobretensões temporárias, e tenha condições de dissipá-la sem afetar as suas características de operação e de proteção. Essa característica do para-raios é definida pela curva “Tensão de frequência fundamental x tempo” (TOVPR), Figura 2.13, e depende basicamente das características dos varistores utilizados.

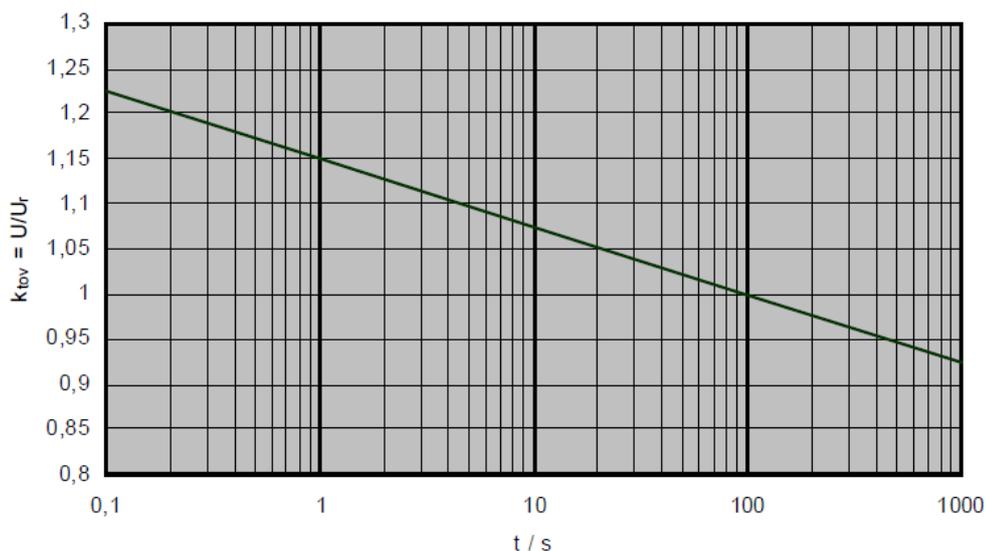


Fig. 2.13 – Curva característica “tensão na frequência industrial x tempo”<sup>[1]</sup>

Portanto, ao se utilizar um para-raios sem centelhadores, é preciso garantir que a MCOV do para-raios seja igual ou superior à máxima tensão operativa do sistema no ponto de aplicação do para-raios. Deve-se garantir também que a característica tensão de frequência fundamental versus tempo do para-raios deve exceder a característica amplitude da sobretensão temporária versus duração para o sistema.

O segundo método para a determinação da tensão nominal do para-raios de óxido metálico consiste na determinação da sobretensão temporária equivalente a 10 segundos, a partir da sobretensão temporária encontrada no sistema. Neste caso, a amplitude e a duração das sobretensões temporárias com durações entre 0,1 s e 100 s, podem ser convertidas para uma amplitude equivalente -  $U_{eq}$ , com uma duração de 10 s:

$$U_{eq} = U_t \left( \frac{T_t}{10} \right)^m \quad (2.1)$$

Onde,

$U_{eq}$  - Amplitude da sobretensão temporária equivalente de 10 s;

$U_t$  - Amplitude da sobretensão temporária;

$T_t$  - Duração da sobretensão temporária em s;

$m$  - Expoente que descreve a característica “tensão em frequência fundamental versus tempo” de um para-raios. Para diferentes projetos de para-raios este expoente varia entre 0,022 e 0,018. Valor médio considerado 0,02.

Para que o para-raios garanta as condições mínimas dos requisitos prescritos no ensaio de ciclo de operação, de acordo com este método de obtenção da tensão nominal do para-raios, a tensão nominal deve ser igual ou superior ao valor de crista por  $\sqrt{t}$  da sobretensão equivalente obtida para 10 segundos.

- **Selecionando a corrente de descarga nominal**

A corrente de descarga nominal serve para classificar um para-raios de óxido metálico. A norma IEC 60099-4 [12] especifica 5 diferentes valores nos quais pertencem a diferentes faixas de tensões nominais, como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Corrente de descarga nominal de acordo com a referida faixa de tensão

1500 A	2500 A	5000 A	10000 A	20000 A
Sem consideração	$U_r \leq 36 \text{ kV}$	$U_r \leq 132 \text{ kV}$	$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 360 \text{ kV}$	$360 \text{ kV} < U_r \leq 756 \text{ kV}$

Os valores presentes na Tabela 2.1 não se referem diretamente às características de operação do equipamento, no entanto, dependendo da classe na qual o para-raios está inserido, estes valores especificam diferentes demandas e requisitos de ensaios adicionais.

Tratando-se de para-raios de distribuição, cujo tema é o foco deste trabalho, normalmente são utilizados com classes 5 kA e 10 kA. Quando realiza-se o ensaio de ciclo de operação, a energia dentro de um para-raios de 5 kA é injetada na forma de dois impulsos de alta corrente de 65 kA cada, isso após ter sido condicionado a 20 impulsos de corrente de descarga atmosférica de 5 kA (na qual é a corrente de descarga nominal) [12]. Com o para-raios de 10 kA, por outro lado, o valor apropriado para impulsos de alta corrente é 100 kA, e o valor para os impulsos de corrente atmosféricos é 10 kA. Uma vez que isso considera um esforço considerável para varistores de óxido metálico (com diâmetros entre 30 mm e 45 mm), um para-raios de 10 kA deve ser de fato constituído com varistores mais volumosos do que os necessários na construção de um para-raios de 5 kA para ser aprovado no ensaio [1].

- ***Selecionando os níveis de proteção do para-raios***

A característica de proteção de um para-raios é normalmente avaliada por meio do seu nível de proteção contra impulso atmosférico. Isto significa que é avaliada de acordo com a tensão residual, enquanto a corrente nominal de descarga está fluindo [1].

Para que o para-raios atue de forma eficaz é necessário que haja um fator de segurança ( $K_s$ ) de no mínimo 1,15 entre o padrão de tensão suportável de impulso atmosférico do dispositivo a ser protegido e a maior sobretensão proveniente de descarga atmosférica que está prevista para ocorrer nos seus terminais.

Quando o para-raios está próximo do equipamento que será protegido, um nível adequado para a tensão residual é calculado através da razão entre o padrão de tensão suportável de impulso atmosférico do dispositivo a ser protegido e 1,4.

A tensão residual proveniente do impulso de manobra normalmente é um valor entre 75% e 90% da tensão residual do impulso atmosférico de 10 kA.

## **2.6 - Características dos para-raios atualmente utilizados nas redes de distribuição no Brasil**

Os para-raios instalados em redes de distribuição no Brasil apresentam normalmente corrente de descarga nominal de 10 kA, deste modo, um para-raios de 15 kV - 10 kA atua satisfatoriamente para correntes de descarga de 10 kA, começando a apresentar envelhecimentos pronunciados a partir de 20 kA, ou seja, o dobro do valor nominal [13]. No entanto, este mesmo para-raios deve também operar duas vezes frente a uma corrente de descarga máxima de 100 kA. Estudos realizados em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento através de uma parceria AES Sul/LAT-EFEI mostram um levantamento estatístico das correntes de descargas na área de concessão da AES Sul com base em medições feitas em para-raios com centelhadores retirados de campo. A partir desses estudos verificou-se uma melhor adequação em relação ao nível das descargas atmosféricas para os para-raios de 5 kA com suportabilidade frente a impulsos de corrente elevados de 40 kA. Além disso, segundo inspeções das concessionárias, verifica-se a atuação do desligador automático durante a ocorrência de descargas elevadas retirando o para-raios do sistema, em alguns casos, mesmo quando este se encontra em boas condições operacionais. Isto indica que o desligador automático atuaria de forma satisfatória desconectando um para-raios de 5 kA ou 10 kA antes que estes entrem em condição de falha, sinalizando a necessidade de sua substituição.

Em alguns países da Europa Central os para-raios de 5 kA são completamente adequados. Apenas em casos excepcionais, devido à média elevada do nível cerâmico, os para-raios de 10 kA são recomendados.

No Brasil, o uso de para-raios de 10 kA é prática comum. Acredita-se que isso se deve a pequena diferença de preço entre o para-raios de 5 kA e 10 kA, bem como há vantagens logísticas de se usar apenas um tipo de para-raios para todo o sistema.

O para-raios em desenvolvimento neste projeto espera agregar um conjunto de vantagens (relacionados com o material utilizado no invólucro e com os varistores) aumentando o custo/benefício relativo à sua utilização, sem comprometer o desempenho da rede elétrica. Isto justifica e incentiva o uso do para-raios de 5 kA no

sistema de distribuição no Brasil, reduzindo custos para as concessionárias e consumidores.

## 2.7 - Classificação dos para-raios sem centelhadores

- ***De acordo com a corrente de descarga nominal***

20 kA, 10 kA, 5 kA, 2,5 kA e 1,5 kA.

- ***De acordo com a classe de descarga de linha de transmissão ou corrente de longa duração***

Segundo a norma IEC 60099-4 [12], os para-raios de 10 kA podem ser classificados como classes 1 a 3, enquanto que os para-raios de 20 kA correspondem as classes 4 e 5. Os para-raios de 5 kA devem ser submetidos ao ensaio de corrente suportável de longa duração, com amplitude e forma definidas em norma.

- ***De acordo com a corrente suportável de falta***

Trata-se da capacidade de suportar correntes internas de falta de alta e de baixa intensidades após uma eventual falha do para-raios, sem que haja violenta fragmentação do invólucro ou desprendimento dos varistores. De acordo com [12], os níveis eficazes de corrente presumível de falta para os para-raios classe estação e distribuição podem ser verificados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Níveis eficazes de corrente presumível de falta para os para-raios classe estação e distribuição

Corrente de descarga nominal	Valor eficaz da corrente de falta (kA <sub>ef</sub> )			Corrente de baixa intensidade (A <sub>ef</sub> )
	Nominal	Correntes reduzidas		
20 kA ou 10 kA	80	50	25	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	63	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	50	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	40	25	12	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	31,5	12	6	600 ± 200
20 kA ou 10 kA	20	12	6	600 ± 200
10 kA ou 5 kA	16	6	3	600 ± 200
10, 5, 2,5 kA ou 1,5 kA	10	6	3	600 ± 200
10, 5, 2,5 kA ou 1,5 kA	5	3	1,5	600 ± 200

A duração mínima de circulação da corrente de falta durante o ensaio deve ser de 0,2 s para correntes de alta intensidade e 1 s para baixas correntes.

A norma ANSI C62-11 [14] classifica os para-raios de óxido metálico sem centelhadores de acordo com os ensaios realizados em:

- Para-raios tipo estação: 20 kA, 15 kA e 10 kA;
- Para-raios tipo intermediário: 5 kA;
- Para-raios tipo distribuição serviço pesado: 10 kA;
- Para-raios tipo distribuição serviço normal: 5 kA;
- Para-raios tipo distribuição serviço leve: 5 kA.
- **Selecionando a classe de descarga de linha**

A classe da descarga de linha não se aplica a para-raios de 5 kA, mas como critério informativo ela é definida através da suposição de que uma longa linha de transmissão descarrega uma sobre tensão de manobra em um para-raios na forma de um processo de ondas viajantes, simulando parte da componente contínua das descargas atmosféricas.

Dentro do contexto exposto neste capítulo verifica-se a necessidade do conhecimento de um conjunto de recomendações (normas técnicas), que sugerem procedimentos mínimos para a utilização de forma correta dos para-raios. Sendo assim, o capítulo 3 trata das principais normas vigentes relacionadas aos para-raios de óxido metálico sem centelhadores e com base nestas normas é elaborada uma sequência de ensaios para avaliar o projeto de para-raios abordado no presente trabalho.

## 2.8 – Referências bibliográficas do capítulo 2

- [1] HINRICHSEN, V, *Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals*, 1<sup>st</sup> Edition. Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.
- [2] SAKSHAUG, E. C.: “*A Brief History of AC Surge Arresters*”. IEEE Power Engineering Review, August, 1991.
- [3] FRANCO, J. L. Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, São Paulo, 174., 2001.
- [4] COSTA, E. G.: “*Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco*”. Tese de Doutorado, COPELE/UFPB, Campina Grande, Abril, 1999.
- [5] ABB Switchgear: “*Physical properties of zinc oxide varistors*”. ABB Power Technology Products AB, 2001.
- [6] WANDERLEY NETO, E. T., “*Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais*”. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Agosto, 2007.
- [7] GUPTA, T. K.: “*Application of zinc oxide varistors*”. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, N° 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [8] MARTINEZ, M. L. B., “*Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação*”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

- [9] CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K; SWEETANA, A.: “*A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters*”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, N° 2, pp. 67-73, April 1986.
- [10] LAT, M. V.: “*Thermal properties of metal oxide surge arresters*”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, N° 7, pp. 2194-2202, July 1983.
- [11] Lahti K., “*Effects of Internal Moisture on the Durability and Electrical Behaviour of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters*”, PhD Thesis Publication 437, Tampere University of Technology, Finland, 2003.
- [12] IEC 60099-4 – “*Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*”. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.
- [13] Salles, C. “*Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta Duração*”, Qualificação de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Fevereiro, 2011.
- [14] ANSI Std. C62-11 – IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Ac Power Circuits (>1kV). Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA, 1999.

# 3

## Análise das normas: Ensaaios de tipo

Neste capítulo é realizada a análise das principais normas internacionais relacionadas a ensaios em para-raios de óxido metálico sem centelhadores (com ênfase para os para-raios com invólucro polimérico sem espaço de ar interno), visto que no momento no Brasil não existem normas específicas para os determinados ensaios. Estes ensaios são fundamentais para seleção dos componentes que formam o para-raios, durante a etapa de projeto, e avaliação dos protótipos desenvolvidos.

Atualmente, fabricantes e concessionárias utilizam-se das recomendações da IEC 60099-4 - Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems [1] e do projeto de norma da ABNT 03037.07-002 - Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaios [2]. As normas IEC são normas internacionais elaboradas pela Comissão Eletrotécnica Internacional, sediada na Europa. Estas normas usualmente servem de base para a elaboração das normas brasileiras pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Além da IEC, outra norma de destaque é a ANSI C62-11 - IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits [3], elaborada pelo Instituto dos Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos, sediado nos Estados Unidos. Estas duas normas são referência em todo o mundo para a realização de ensaios e elaboração de normas locais. Portanto, foi realizada uma análise com base na IEC, na ANSI e no projeto da

ABNT que possibilitou destacar os principais pontos associados a cada uma destas bem como suas semelhanças e diferenças.

Na etapa de projeto de equipamentos, os ensaios de tipo desempenham papel primordial. Consistem em um conjunto de ensaios realizados em corpos-de-prova específicos. Sua função é verificar as características do equipamento e sua conformidade em relação as normas vigentes. Estes ensaios normalmente não precisam ser repetidos enquanto não houver mudanças no projeto.

Após a análise das normas e seus principais aspectos, foi definida uma sequência simplificada de ensaios utilizada no LAT-EFEI, denominada Sequência Reduzida, que é utilizada em todo o processo do projeto de para-raios com a finalidade de avaliá-lo. Esta sequência de ensaios possui como principais características o baixo custo e consistência.

A seguir são apresentados resumos dos principais ensaios de tipo propostos pelas normas IEC e ANSI e pelo projeto da ABNT, os quais serviram de base para a Sequência Reduzida. Convém lembrar que estes resumos indicam apenas a descrição de ensaios realizados. Os detalhes para cada aplicação devem ser consultados nas respectivas normas: IEC 60099-4 e ANSI C62 e no projeto de norma da ABNT 03037.07-002.

### **3.1 - Principais ensaios de tipo**

#### **3.1.1 - Ensaio de Tensão Suportável no Invólucro**

Este ensaio tem a finalidade demonstrar a capacidade do invólucro em suportar as solicitações dielétricas em ar através da sua superfície externa.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

Especifica valores de tensão para o ensaio de acordo com a máxima tensão entre os terminais do para-raios, no qual seja possível realizar o ciclo de operação (Tabela 3.1). Adicionalmente, indica a realização da aplicação de tensão, 1,5 x MCOV, sob chuva, durante 10 s entre o terminal de terra e o suporte do para-raios.

Tabela 3.1-Tensão de ensaio de suportabilidade do invólucro

Tensão de ciclo de operação [kV rms]	Ensaio de impulso 1,2/50 $\mu$ s onda completa [kV] crista [BIL]	Tensão de ensaio em 60 Hz [kV rms]	
		Ensaio a seco [1 minuto]	Ensaio sob chuva [10 s]
15	95	35	36
24	125	42	36

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Os ensaios devem ser realizados em um corpo-de-prova constituído pelo para-raios completo, sem a parte interna ativa e equipados com anéis de equalização, se existentes. Devem-se realizar os ensaios de tensão suportável a impulso atmosférico e de tensão suportável à frequência industrial.

O ensaio de tensão suportável a impulso atmosférico deve ser realizado com tensões de impulso atmosférico normalizado a seco através da aplicação de 15 (quinze) impulsos consecutivos de cada polaridade e com a forma normalizada 1,2/50  $\mu$ s. A tensão de ensaio deve ser igual ao nível de proteção do para-raios para impulso atmosférico multiplicado pelo fator 1,30. Se a distância de arco a seco, ou a soma das distâncias de arcos parciais, for maior do que a tensão de ensaio dividida por 500 kV/m, não é necessária a execução deste ensaio.

No ensaio de tensão suportável à frequência industrial o para-raios de uso interno deve ser ensaiado a seco e o para-raios de uso externo deve ser ensaiado sob chuva. Com relação aos para-raios de 5 kA, o valor de crista da tensão de ensaio aplicado durante 60 segundos deve ser igual ao nível de proteção a impulso atmosférico multiplicado por 0,88.

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### 3.1.2 - Ensaio de Tensão Residual

Este ensaio tem a finalidade de obter os máximos valores de tensão residual determinando-se desta forma os níveis de proteção dos para-raios ensaiados.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

Realizar a medição da tensão de pico após a aplicação de impulsos de corrente com valores de crista iguais a 1500 A, 3000 A, 5000 A, 10000 A e 20000 A na forma de 8/20  $\mu$ s.

Os ensaios devem ser realizados em corpos-de-prova novos e limpos, caso o projeto utilize desligador automático este deve estar conectado ao para-raios ou seção representativa no ensaio. Caso o projeto utilize suporte, este deve estar aterrado durante o ensaio.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Os ensaios devem ser efetuados sobre três corpos-de-prova novos de para-raios ou seções representativas. Devem ser realizados os ensaios de tensão residual a impulso de corrente íngreme e o ensaio de tensão residual a impulso atmosférico.

O ensaio de tensão residual a impulso de corrente íngreme é realizado utilizando um impulso com valor de crista igual à corrente de descarga nominal do para-raios. O ensaio de tensão residual a impulso atmosférico é obtido utilizando impulsos de corrente na forma 8/20  $\mu$ s com valores de crista de 0,5; 1,0; e 2,0 vezes a corrente de descarga nominal do para-raios. Ambos os ensaios são realizados com tolerância de 5%. Sugere-se também aplicar um impulso de manobra com os valores de corrente de 125 e 500 A.

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Os ensaios devem ser efetuados sobre três corpos-de-prova novos de para-raios ou seções representativas. Para tensões nominais inferiores a 3 kV, os ensaios

devem ser realizados no para-raios completo. Nos demais, devido as limitações existentes com os equipamentos de ensaio, os ensaios podem ser realizados em seções de no mínimo 3 kV, não necessitando ultrapassar os 12 kV. Em para-raios classe distribuição com tensões nominais de até 12 kV o ensaio deve ser realizado no para-raios completo. Para tensões nominais acima de 12 kV, o ensaio deve ser realizado em seções representativas com tensão nominal mínima de 12 kV, incorporando o desligador automático.

Devem ser realizados os ensaios de tensão residual a impulso de corrente íngreme utilizando um valor de corrente com crista igual à corrente de descarga nominal do para-raios, tolerância de 5%, e o ensaio de tensão residual a impulso atmosférico, utilizando impulsos de corrente, 8/20  $\mu$ s, com valores de crista de 0,5; 1,0; e 2,0 vezes a corrente de descarga nominal do para-raios, tolerância de 5%.

### **3.1.3 - Ensaio de Envelhecimento Acelerado**

Este procedimento de ensaio tem por objetivo determinar fatores de correção utilizados no ensaio de ciclo de operação.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

A norma ANSI C62-11 não trata o envelhecimento acelerado como ensaio. Além disso, informa que não há um processo de avaliação. Relata apenas que trata-se de um procedimento de envelhecimento no qual elevados índices de tensão ( $K_C$  e  $K_R$ ) são obtidos.

O procedimento de envelhecimento acelerado é realizado determinando-se as relações de energia e os fatores de tensão elevada  $K_C$  e  $K_R$ .

O procedimento é realizado em três varistores do projeto que está sendo ensaiado.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Três corpos-de-prova constituídos de varistores devem ser submetidos a uma tensão igual à máxima tensão de operação contínua corrigida  $U_{CT}$  do corpo-de-prova

durante 1000 h. Para-raios com comprimento H menor que 1 metro da tensão de operação contínua corrigida  $U_{CT}$  pode ser determinada pela Equação:

$$U_{CT} = U_C(1 + 0,15H) \quad (3.1)$$

A temperatura deve ser controlada e mantida a  $115^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$  na superfície do resistor. São registrados três valores de perdas,  $P_{1CT}$ ,  $P_{2CT}$  e  $P_{3CT}$ . O primeiro valor ( $P_{1CT}$ ) é registrado no período de uma a duas horas após a medição da tensão. O segundo valor ( $P_{2CT}$ ) é registrado ao final das 1000 h, tolerância entre 0-, 100+ horas, sob as mesmas condições. O terceiro valor ( $P_{3CT}$ ) é o mínimo referente às perdas nos resistores medidas a cada intervalo de 100 horas após a primeira medição. Determinados os valores de  $P_{1CT}$ ,  $P_{2CT}$  e  $P_{3CT}$ ,  $K_1$  é calculado de acordo com as condições estabelecidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Determinação dos valores corrigidos das tensões nominal e de operação contínua

<i>Perdas medidas</i>	<i>Corpos-de-prova e tensão de ensaio para o ensaio de ciclo de operação</i>
$P_{2CT} \leq 1,1 \times P_{3CT}$ e $P_{2CT} \leq P_{1CT}$	Corpos-de-prova novos e fator de correção $k_1 = 1$
$P_{2CT} \leq 1,1 \times P_{3CT}$ e $P_{2CT} > P_{1CT}$	Corpos-de-prova novos e fator de correção $k_1 = P_{2CT}/P_{1CT}$ [Máximo]
$P_{2CT} > 1,1 \times P_{3CT}$ e $P_{2CT} < P_{1CT}$	Corpos-de-prova envelhecidos e fator de correção $k_1 = 1$
$P_{2CT} > 1,1 \times P_{3CT}$ e $P_{2CT} \geq P_{1CT}$	Corpos-de-prova envelhecidos e fator de correção $k_1 = 1$ ou corpos-de-prova novos e fator de correção $k_1 = P_{2CT}/P_{1CT}$ [Máximo] após acordo entre fabricante e comprador

As perdas  $P_{1c}$  e  $P_{1r}$  às tensões  $U_c$  (tensão de operação contínua) e  $U_n$  (tensão nominal), respectivamente, são medidas em três novos resistores à temperatura ambiente. Em seguida, as tensões são aumentadas de forma que as perdas correspondentes  $P_{2c}$  e  $P_{2r}$  atendam às relações mostradas nas equações a seguir:

$$\frac{P_{2c}}{P_{1c}} = K_1 \quad (3.2)$$

$$\frac{P_{2r}}{P_{1r}} = K_1 \quad (3.3)$$

A tensão de operação contínua corrigida pelo fator K1 corresponde ao maior dos três valores obtidos após a aplicação do procedimento de correção. O mesmo se aplica para a tensão nominal. As tensões de ensaio de frequência industrial a serem aplicadas na seção de para-raios  $U_{sc}$  e  $U_{sn}$  devem ser a tensão de operação contínua e nominal do para-raios completo dividido pelo número n total de seções similares de para-raios. Essas tensões,  $U_{sc}$  igual a  $U_c/n$  e  $U_{sn}$  igual a  $U_n/n$  devem ser corrigidas para estabelecer as tensões de ensaio  $U_c^*$  e  $U_n^*$ , logo:

$$U_c^* = K_1 U_{sc} \quad (3.4)$$

$$U_n^* = K_1 U_{sn} \quad (3.5)$$

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### 3.1.4 - Ensaio de Estanqueidade

Verificar a capacidade dos para-raios em resistir à penetração de umidade após ter sido submetido a um pré-condicionamento termo-mecânico especificado. O pré-condicionamento são esforços de flexão nos quais os para-raios são submetidos, em quatro direções e variações térmicas. O esforço de flexão é especificado pelo fabricante.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

As amostras devem ser submetidas aos ensaios de torque nos terminais, condicionamento térmico e imersão.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Os corpos-de-prova devem ser novos e limpos. O fabricante pode usar qualquer método capaz de detectar baixas taxas de vazamento de gases adequado para a medição da taxa de vazamento especificada. O corpo-de-prova deve ser a maior unidade do para-raios. Se o comprimento da maior unidade do para-raios for superior a 800 mm, pode-se testar uma seção mecânica de comprimento inferior, adotando-se como valor mínimo o maior valor entre 800 mm e três vezes o diâmetro externo do invólucro medido na parte inferior junto ao flange, desconsiderando o diâmetro das saias. Deve ser realizado torque de pré-condicionamento e pré-condicionamento termomecânico. Em seguida o para-raios deve ser mantido imerso em uma cuba, com água fervente desmineralizada com 1 kg/m<sup>3</sup> de NaCl, durante 42 horas.

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### **3.1.5 - Ensaio da Tensão de Rádio Interferência**

A medição da Tensão de Rádio Interferência - RIV tem por objetivo avaliar os ruídos em alta frequência produzidos pelo para-raios energizado, comparando com os valores obtidos para as condições ambientais normais.

Os resultados destes ensaios são indicativos da qualidade do projeto do para-raios e servem como base para verificação de degradação mecânica estrutural após solicitações de corrente de descarga com formas padronizadas 8/20 µs e 4/10 µs.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

A tensão de rádio interferência deve ser medida a uma frequência de 1 MHz, ou o mais próximo possível. Nos casos em que é verificado um decréscimo na RIV após a aplicação da tensão por no mínimo 10 s, o para-raios deve ser pré-energizado por um período não superior a 5 min.

Para determinar a RIV, aplica-se nos terminais do para-raios uma tensão de 1,05 vezes a MCOV do para-raios.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Este ensaio se aplica a para-raios de uso externo com tensão nominal maior ou igual a 77 kV. O ensaio deve ser realizado no para-raios de maior comprimento, com a maior tensão nominal utilizada por um tipo particular de para-raios. O seguinte procedimento de ensaio deve ser seguido:

- limpar a superfície do invólucro;
- registrar as condições atmosféricas;
- elevar a tensão até  $1,15 U_C$ ;
- reduzir a tensão até  $1,05 U_C$  e manter nesse nível por 5 min;
- reduzir a tensão em degraus até  $0,5 U_C$ ;
- elevar a tensão em degraus até  $1,05 U_C$  e manter nesse nível por 5 min;
- reduzir a tensão em degraus até  $0,5 U_C$ .

A amplitude dos degraus de tensão deve ser aproximadamente  $0,1 U_C$ , onde  $U_C$  é tensão de operação contínua do para-raios. A cada degrau deve ser medido o nível de radio interferência e os valores registrados durante a última série de redução da tensão devem ser plotados em função da tensão aplicada. A curva obtida é a característica de rádio interferência do para-raios. O para-raios é considerado aprovado se o nível de radio interferência medido a  $1,05 U_C$  e em todos os degraus não exceder  $2500 \mu V$ .

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### **3.1.6 - Ensaio de Corrente Suportável**

Estes ensaios têm por finalidade verificar a capacidade dos para-raios de escoar as correntes de descarga de longa e curta duração.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

No ensaio de corrente suportável de longa duração o corpo-de-prova é submetido a vinte impulsos (três grupos de seis impulsos seguidos de um grupo de dois impulsos). Os intervalos entre as aplicações devem ser de 50 s a 60 s, e entre grupos devem ser tais que permitam o resfriamento do corpo-de-prova até próximo da temperatura ambiente. Após 5 minutos do vigésimo impulso, deve-se aplicar no para-raios  $K_C \times MCOV$  durante 30 minutos.

Os para-raios de 5 kA devem ser ensaiados com uma corrente mínima de 75 A (valor de crista) e tempo mínimo de duração de 2000  $\mu$ s.

No ensaio de corrente suportável de curta duração os ensaios são realizados em para-raios completos ou seções de para-raios. O ensaio consiste na aplicação de dois impulsos com forma 4/10  $\mu$ s. Nos para-raios de 5 kA a amplitude do impulso pode ser de 40 kA (para-raios classificados como serviço leve) ou de 65 kA (para-raios classificados como serviço normal). Após 5 minutos do segundo impulso deve-se aplicar no para-raios  $K_C \times MCOV$  durante 30 minutos.

O valor de  $K_C$  é determinado no ensaio de envelhecimento acelerado.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

O ensaio de corrente suportável de baixa amplitude e longa duração deve ser efetuado em três corpos-de-prova novos, constituídos de para-raios completos, seções representativas de para-raios ou resistores que não tenham sido submetidos previamente a qualquer ensaio, exceto aqueles especificados para fins de avaliação.

A tensão nominal dos corpos-de-prova deve ser de no mínimo 3 kV, não necessitando ultrapassar os 6 kV. Se um desligador automático estiver incluído no projeto do para-raios, esse ensaio deve ser efetuado com o desligador automático em condições de operar.

Durante os ensaios, os resistores podem ser expostos ao ar livre em temperaturas de 5°C a 40°C. Cada ensaio de corrente de longa duração consiste de dezoito aplicações, divididas em seis grupos de três. Os intervalos entre aplicações devem ser de 50 s a 60 s, e entre grupos devem ser tais que permitam o resfriamento do corpo-de-prova até próximo da temperatura ambiente. O gerador utilizado neste ensaio deve fornecer um impulso de corrente com os seguintes requisitos:

- A duração virtual de crista da corrente deve estar entre 100% a 120% do valor especificado na Tabela 3.3;
- A duração virtual total do impulso de corrente não deve exceder de 150% da duração virtual de crista do impulso de corrente;
- As oscilações e sobrelevação inicial na forma de onda não devem ser superiores a 10% do valor de crista da corrente. Caso ocorram oscilações, uma curva média deve ser definida para a determinação do valor de crista da corrente;
- O valor de crista da corrente deve estar entre 90% e 110% do valor especificado na Tabela 3.3 para o primeiro impulso e entre 100% e 110% desse valor para os demais impulsos.

Tabela 3.3 - Requisitos para o ensaio de impulso de corrente de longa duração em para-raios de 5 kA

<i>Classe do para-raios [kA]</i>	<i>Valor de crista da corrente [A]</i>	<i>Duração da crista do impulso de corrente [μs]</i>
5,0	75	1000

O ensaio de corrente suportável de curta duração, corrente elevada, é tratado no ensaio de ciclo de operação.

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### **3.1.7 - Ensaio de Ciclo de Operação**

A finalidade do ensaio é 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.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

O ensaio pode ser realizado no para-raios completo ou seção de para-raios. Antes da realização do ensaio é preciso medir a tensão residual aplicando uma corrente de 5 kA na temperatura de  $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ . São aplicados 20 impulsos de corrente, com um intervalo de tempo de 50-60s para cada aplicação, na forma de onda 8/20  $\mu\text{s}$  e valor de crista de 5 kA. A tensão de aplicação nos corpos-de-prova é  $K_R$  vezes a tensão de ciclo de operação e deve ser mantida durante a aplicação dos 20 impulsos. Após a aplicação dos impulsos deve-se aquecer todos os corpos-de-prova até uma temperatura de  $60\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$ . Estando os corpos-de-prova no equilíbrio térmico especificado, serão aplicados mais 2 impulsos com magnitude de 5 kA, com um intervalo de tempo de 50-60s para cada aplicação, submetidos à tensão de  $K_C$  vezes a MCOV. Após 5 minutos das 20 aplicações dos impulsos, os corpos-de-prova serão submetidos a uma tensão de recuperação (corrigida) durante 30 minutos. Tratando-se de para-raios completos, a tensão de recuperação é  $K_C$  vezes a MCOV.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

O ensaio deve ser efetuado em três corpos-de-prova (novos, limpos e completamente montados) constituídos de para-raios completos, ou seções representativas, na temperatura de  $20\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$ . A tensão nominal das amostras de ensaio deve ser maior ou igual a 3 kV, se a tensão nominal do para-raios não for inferior a este valor, e não deve ser superior a 12 kV. A tensão de frequência industrial deve ser medida com incerteza de medição de até 1% e o seu valor de

crista não deve variar mais de 1% da condição em vazio para a de plena carga. A relação entre o valor de crista dividido por  $\sqrt{2}$  e o valor eficaz não deve diferir em mais de 2%. Durante o ensaio de ciclo de operação a tensão de frequência industrial não deve variar de mais de 1% em relação ao valor especificado.

Este ensaio é composto de cinco etapas (envelhecimento acelerado, comportamento da dissipação de calor, impulso de corrente elevada e avaliação da estabilidade térmica) que compreendem:

**- Medições iniciais**

- Medição da tensão de referência e medição da tensão residual com corrente de descarga nominal com impulso na forma 8/20  $\mu$ s;
- Intervalo de tempo não especificado.

**- Ensaio de condicionamento**

- 4 grupos de 5 impulsos de corrente de descarga nominal, 8/20  $\mu$ s, superposto em 20% acima da tensão de operação contínua corrigida;
- Intervalo de tempo não especificado na temperatura de 20 °C  $\pm$  15°C.

**- Aplicação de impulsos**

- Um impulso de corrente elevada, 65 kA, na forma 4/10  $\mu$ s;
- Pré aquecer até 60 °C  $\pm$  3°C;
- Um impulso de corrente elevada, 65 kA, na forma 4/10  $\mu$ s;
- Intervalo de tempo não superior a 100 ms;
- Aplicação da tensão nominal do para-raios corrigida por 10 segundos;
- Aplicação da tensão de operação contínua corrigida durante 30 minutos;
- Resfriar a temperatura ambiente entre 20 °C  $\pm$  15°C.

**- Medições finais e inspeção visual**

- Medição da tensão residual com corrente de descarga nominal com impulso na forma 8/20  $\mu$ s;
- Inspeção visual da amostra.

O corpo-de-prova é considerado aprovado no ensaio se:

- A estabilidade térmica for comprovada;

- A variação dos valores da tensão residual, medidos antes e depois do ciclo de operação, não for superior a  $\pm 5\%$ .

Para-raios com invólucro em material polimérico, no qual o processo de desmontagem para inspeção visual possa danificar os resistores não lineares, deve ser realizado, para fins de avaliação, um ensaio adicional para garantir que não houve danos aparentes aos corpos-de-prova durante o ensaio:

- Após o ensaio de ciclo de operação, devem ser aplicados dois impulsos com valor nominal da corrente ( $I_n$ ) em cada corpo-de-prova. O primeiro dos impulsos deve ser aplicado depois de um intervalo de tempo suficiente para que os corpos-de-prova tenham resfriado após o ensaio de ciclo, e o segundo impulso, após 50 a 60 s da aplicação do primeiro;
  - Durante os dois impulsos, os oscilogramas de tensão e de corrente não devem evidenciar nenhum dano aos resistores não lineares. A variação da tensão residual entre as medições iniciais, pré-condicionamento, e o último impulso não deve ser superior a 5 %;
  - Nesse caso, a inspeção visual se aplica apenas às partes externas.
- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

Semelhante à IEC.

### 3.1.8 - Ensaio de Curto-circuito

O ensaio é executado para demonstrar que a falha de um para-raios não resulta em fragmentação violenta do invólucro e que ocorre a auto-extinção das chamas, dentro de um período de tempo definido.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

Os ensaios são realizados em três níveis de corrente de acordo com a Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 – Parâmetros do modo de falha referentes à para-raios com encapsulamento polimérico – classe distribuição

<i>Ensaio</i>	<i>Corrente alta</i>		<i>Corrente intermediária</i>	<i>Corrente baixa</i>
<i>Método de preparação</i>	<i>Fio fusível</i>	<i>Sobretensão</i>	<i>Sobretensão</i>	<i>Sobretensão</i>
<i>Número de amostras</i>	2	2	2	2
<i>Corrente simétrica (rms)</i>	Não pode ser inferior ao máximo declarado	Não pode ser inferior ao máximo declarado	0,5 ± 0,05 vezes o máximo declarado	600 ± 200 A
<i>Mínima duração de corrente (s)</i>	0,2	0,2	0,2	1,0

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

O projeto de para-raios é ensaiado com quatro valores de correntes de curto-circuito. As tabelas 3.5 e 3.6 apresentam as condições para a realização dos ensaios.

Tabela 3.5 - Correntes de curto-circuito requeridas para os ensaios curto-circuito

<i>Classe do Para-raios</i>		<i>Alta Corrente</i>			<i>Baixa corrente</i>
<i>Corrente de descarga nominal [kA]</i>	<i>Corrente de alívio de sobrepressão / suportabilidade a correntes de falta [kA]</i>	<i>Corrente de curto-circuito nominal [A]</i>	<i>Correntes reduzidas de curto-circuito [A]</i>		<i>Corrente de curto-circuito com duração de 1s [A]</i>
20; 10 ou 5	20	20.000	12.000	6.000	600 ± 200
10 ou 5	16	16.000	6.000	3.000	
10 ou 5	10	10.000	6.000	3.000	
10 ou 5	5	5.000	3.000	1.500	

Tabela 3. 6 - Exigências do ensaio

	N° de corpos -de-prova de Ensaio	Inicialização do curto-circuito	Proporção entre o primeiro valor de pico da corrente e o valor eficaz das correntes de curto-circuito requeridas					
			Tensão de ensaio: 77 % a 107 % da $U_n$			Tensão de ensaio: < 77 % da $U_n$		
			Corrente nominal de curto-circuito	Corrente de curto-circuito reduzida	Baixa corrente de curto-circuito	Corrente nominal de curto-circuito	Corrente de curto-circuito reduzida	Baixa corrente de curto-circuito
<i>Invólucro polimérico</i>	4	Pré-falha pelo método da fonte de tensão ou fonte de corrente constante	Presumida: $\geq \sqrt{2}$ Efetivo: sem exigência	Presumida: $\geq \sqrt{2}$ Efetivo: sem exigência	Efetivo: $\geq \sqrt{2}$	Efetivo: $\geq \sqrt{2}$	Efetivo: $\geq \sqrt{2}$	Efetivo: $\geq \sqrt{2}$

▪ Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002

Semelhante à IEC.

### **3.1.9 - Ensaio do Desligador Automático**

O objetivo do ensaio é verificar se o desligador automático provoca a separação do condutor de terra do para-raios quando este não consegue executar o seu ciclo de operação.

- **Procedimento de ensaio sugerido pela ANSI C62-11**

O ensaio deve ser realizado em cada tipo e projeto de desligador. Três amostras de desligadores, para cada tipo e projeto, devem suportar, sem operar, aos ensaios de alta corrente, baixa corrente e ciclo de operação, utilizando novas amostras para cada ensaio.

Deve ser realizado o ensaio de atuação do desligador e levantada a curva característica “tempo versus corrente” para quatro valores de corrente: 20 A, 80 A, 200 A e 800 A, com tolerância de  $\pm 20\%$ . Pelo menos cinco novas amostras que não tenham sido previamente submetidas a qualquer outro ensaio devem ser testadas em cada um dos quatro níveis de corrente.

Caso não fique evidenciada a separação do condutor de terra do para-raios submetido ao ensaio, uma tensão na frequência industrial de 1,2 vezes a MCOV da maior classe de para-raios no qual o desligador é projetado para operar deve ser aplicada durante 1 minuto, sem que haja fluxo de corrente superior a 1 mA (rms).

- **Procedimento de ensaio sugerido pela IEC 60099-4**

Devem ser ensaiados no mínimo cinco corpos-de-prova novos, constituídos por para-raios completos ou somente pelos desligadores. As amostras devem ser submetidas, sem operar, aos ensaios de impulso de corrente e ciclo de operação. A tensão de ensaio deve ser suficiente para manter, pelo tempo necessário, a plena corrente de arco que curto-circuita os elementos do para-raios. Além disso, a tensão de ensaio não deve exceder a tensão do para-raios de menor tensão nominal para o qual o desligador automático foi projetado.

Para verificar os parâmetros nos quais o desligador atua, é levantada a curva característica “tempo versus corrente” para três valores de corrente: 20 A, 200 A e 800 A, com tolerância de  $\pm 10\%$ . Caso não fique evidenciada a separação do

condutor de terra do para-raios submetido ao ensaio, uma tensão na frequência industrial de 1,2 vezes a MCOV da maior classe de para-raios no qual o desligador é projetado para operar deve ser aplicada durante 1 minuto, sem que haja fluxo de corrente superior a 1 mA (rms).

- **Procedimento de ensaio sugerido pelo projeto de norma da ABNT 03037.07-002**

O desligador deve ser submetido a ensaios que demonstrem que ele não é afetado pelas solicitações térmicas causadas pelas correntes de impulso elevada e de longa duração, bem como pelo ensaio de ciclo de operação.

Devem ser ensaiados no mínimo cinco corpos-de-prova novos, constituídos por para-raios completos ou somente pelos desligadores. Usualmente utiliza-se a tensão de ensaio igual a 3 kV. É levantada a curva característica “tempo versus corrente” para quatro valores de corrente: 20 A, 80 A, 200 A e 800 A,  $\pm 10\%$ .

Se o desligador não fizer parte integrante do para-raios e não tiver sido submetido aos ensaios de corrente suportável de longa duração e ciclo de operação, estes devem ser executados no desligador automático com as seguintes condições:

- Ensaio de corrente suportável de longa duração: o valor de crista da corrente e a duração devem corresponder ao para-raios de classe mais elevada para o qual o desligador em ensaio possa ser acoplado.
- Ensaio de ciclo de operação: o valor de crista do impulso de corrente deve ser igual à maior corrente de todos os para-raios com os quais o desligador em ensaio possa ser acoplado.

### 3.2- Comparativo entre as normas

Após a análise das normas supracitadas, verificou-se que há ensaios exclusivos referente a cada uma delas. Estes ensaios são citados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Ensaios Exclusivos da ANSI e da IEC/ABNT

<i>ANSI C62-11</i>	<i>IEC 60099-4/ Projeto de norma da ABNT 03037.07-002</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envelhecimento acelerado da região externa do invólucro polimérico;</li> <li>• Ensaios de poluição (a norma não deixa claro se o ensaio é aplicado em para-raios de estação ou distribuição;</li> <li>• Tensão de ionização interna;</li> <li>• TOV (Sobretensão temporária).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medição da tensão de referência;</li> <li>• Ensaio de tensão residual a impulso de corrente íngreme;</li> <li>• Característica da tensão suportável de frequência industrial em função do tempo;</li> <li>• Ensaio de envelhecimento sob tensão de operação simulando condições ambientais;</li> <li>• Descargas parciais.</li> </ul>

### 3.3- Sequência reduzida

A partir da análise realizada nas três normas, foi sugerido um modelo reduzido de ensaios denominado de Sequência Reduzida. Os ensaios foram realizados no LAT-EFEI.

Este modelo foi aplicado em duas etapas do projeto: Inicialmente foi aplicado nos varistores (Tabela 3.8) visando avaliá-los de modo a fornecer subsídios necessários para escolha de um ou mais fabricantes cujos varistores foram utilizados na construção dos protótipos de para-raios. Em seguida a sequência reduzida, sofrendo uma modificação, foi aplicada nos módulos dos para-raios (Tabela 3.9) visando avaliar a suportabilidade destes protótipos frente aos impulsos aplicados na sequência reduzida de ensaios.

Esta sequência teve por base discussões mantidas com dois especialistas na área, um dos quais é editor de uma revista especializada no tema nos USA e ex

*convener da ANSI C62 – IEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits.* A finalidade da Sequência Reduzida é trabalhar com uma quantidade reduzida de amostras sem solicitá-las em demasiado e mantendo padrões de tempo de avaliação e custos adequados as solicitações aplicadas de forma sequencial em cada amostra e não um ensaio por amostra. Esta sequência de ensaios pretende verificar e qualificar os para-raios ou varistores após a sequência de ensaios através da variação da corrente de fuga (não prevista em norma brasileira). A princípio, a sequência reduzida apresenta solicitações semelhantes aos conjuntos de ensaios de tipo sugeridos pela norma, sendo, em alguns casos, até mesmo um pouco mais rigorosa.

O método utilizado busca avaliar o modelo de para-raios utilizando inicialmente 05 amostras. Caso haja alguma falha, sugere-se a repetição dos ensaios utilizando um conjunto de amostras duas vezes maior. Caso ocorram novas falhas na segunda sequência, devem ser realizados os ensaios de tipo conforme previstos pela IEC 60099-4 e/ou ANSI C62-11.

A Tabela 3.8 apresenta a sequência reduzida de ensaios aplicada nos varistores de óxido metálico. Os ensaios foram realizados em dez modelos de varistores de quatro fabricantes. A finalidade dos ensaios era avaliar os varistores de modo a selecionar as melhores opções em termos de desempenho e custo para montagem dos para-raios.

Tabela 3.8 – Sequência reduzida de ensaios nos varistores de ZnO.

<i>Ensaio</i>	<i>Procedimento</i>
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, a 80 °C.
Impulsos 8 x 20 µs	Cinco impulsos para cada um dos seguintes níveis de corrente: 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA.
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.
Impulsos 4 x 10 µs	Dois impulsos de 40 kA.
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.
Impulsos de longa duração (2 ms)	Aplicação de 5 impulsos para cada um dos seguintes níveis de corrente: 75 A e 150 A.
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.
Impulso 4 x 10 µs	Dois impulsos de 65 kA.
Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.

A aplicação dos dois impulsos de 65 kA na forma de onda 4 x 10 µs, verificado na Tabela 3.8, trata-se de um ensaio adicional da sequência reduzida e tem a finalidade de se avaliar a capacidade dos varistores de resistirem a solicitações além do seu limite de suportabilidade.

A Tabela 3.9 apresenta a sequência reduzida de ensaios aplicados nos módulos dos para-raios. Verifica-se que não foram realizados os impulsos de 65 kA, devido a capacidade do gerador de impulsos, e os impulsos de longa duração apresentaram valores máximos de corrente de 150 A e 250 A.

Tabela 3.9 – Sequência reduzida de ensaios aplicada nos módulos/parte ativa dos para-raios projetados.

<i>Ensaio</i>	<i>Procedimento</i>
Medição de tensão de referência e potência dissipada	Medição de valores de tensão referência e potência dissipada para correntes de 1 mA e 2 mA.
Ensaio de RIV	Considerando tensões aplicadas de 1,0 e 1,1 pu.
Impulsos de curta duração	Aplicação de 5 impulsos de descargas atmosféricas de 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA.
Medição de tensão de referência e potência dissipada	Medição de valores de tensão referência e potência dissipada para correntes de 1 mA e 2 mA.
Ensaio de RIV	Considerando tensões aplicadas de 1,0 e 1,1 pu.
Impulsos de curta duração	Aplicação de 2 impulsos de descargas atmosféricas de 40 kA.
Medição de tensão de referência e potência dissipada	Medição de valores de tensão referência e potência dissipada para correntes de 1 mA e 2 mA.
Ensaio de RIV	Considerando tensões aplicadas de 1,0 e 1,1 pu.
Impulsos de longa duração	Aplicação de 5 impulsos de 150 A e 250 A, 2 ms, com intervalos de 1 minuto entre eles.
Medição de tensão de referência e potência dissipada	Medição de valores de tensão referência e potência dissipada para correntes de 1 mA e 2 mA.
Ensaio de RIV	Considerando tensões aplicadas de 1,0 e 1,1 pu.

Com a definição dos ensaios que compõem a sequência reduzida, foram realizados ensaios nos varistores e nos módulos/parte ativa dos para-raios onde em seguida é realizada a análise da taxa de falhas dos para-raios (capítulo 4).e complementarmente são analisados os resultados obtidos dos ensaios para o desenvolvimento do projeto de para-raios proposto neste trabalho (capítulo 5).

### 3.4– Referências bibliográficas do capítulo 3

- [1] IEC 60099-4 – “*Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*”. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.
- [2] Projeto de norma da ABNT 03037.07-002 – “*Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaio*”.
- [3] ANSI Std. C62-11 – IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Ac Power Circuits (>1kV). Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA, 1999.

# 4

## Estimativa do risco de falha

O projeto de para-raios envolve a necessidade da determinação da capacidade de absorção de energia, a qual está relacionada à tensão de operação e principalmente a corrente de descarga nominal – amplitude e duração. Normalmente, define-se a suportabilidade do para-raios como a capacidade que o mesmo apresenta em suportar determinados níveis de corrente de descarga sem falhar. A suportabilidade está associada a sua capacidade de dissipar a energia produzida pelo surto. Dessa forma, para aplicação em campo, é importante conhecer os prováveis níveis das correntes que são descarregadas nas regiões onde estes equipamentos serão instalados.

Neste capítulo será apresentada uma análise feita em relação ao perfil das correntes de descarga reais em uma área de concessão da AES Sul no Brasil. Também será visto como estas correntes podem ser utilizadas para estimar o risco de falha do para-raios.

O risco de falha pode ser expresso numericamente conhecendo-se as distribuições da suportabilidade de corrente (capacidade do equipamento) e das correntes de descarga.

Normalmente, ao dimensionar um projeto de para-raios não se considera a caracterização do risco de falha. No Brasil, por exemplo, costuma-se utilizar na rede de distribuição (por padronização) para-raios de 10 kA sem considerar as características das descargas nas regiões onde estes equipamentos são instalados.

Através do perfil das correntes foi possível direcionar esta pesquisa para um projeto de para-raios com corrente nominal de 5 kA.

A partir do risco falha será possível estimar o número de para-raios instalados em uma determinada rede de energia elétrica que apresentam probabilidade de falhar. Isso permite um melhor planejamento por parte das concessionárias em termos da necessidade de intervenção/manutenção, estoque e especificação dos para-raios.

#### **4.1 - Análise estatística dos níveis das correntes de descarga**

Através de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado em parceria entre o LAT-EFEI e a AES Sul, foi feito um levantamento estatístico das intensidades das correntes associadas às descargas atmosféricas na área de concessão da AES Sul [1].

O levantamento estatístico das correntes foi realizado através da análise de cerca de 9.000 para-raios de carboneto de silício (usam centelhador) retirados de campo. Os para-raios foram cadastrados de acordo com a região em que estavam operando e as marcas nos centelhadores (resultantes das correntes de descarga) foram analisadas. A análise destas marcas foi realizada selecionando-se a marca de descarga mais evidente e calculando a sua área através do software AUTOCAD®. As Figuras 4.1 e 4.2 exemplificam a menor e a maior área, respectivamente, resultante da ocorrência de descargas atmosféricas em um para-raios retirado de campo.



Área = 1,33 mm<sup>2</sup>

Fig. 4.1 – Marcas de campo, menor área.



Área = 42,17 mm<sup>2</sup>

Fig. 4.2 – Marcas de campo, maior área.

Através da técnica de “etchings comparisons” – “comparação de marcas”, foram confrontadas as marcas presentes nos centelhadores dos para-raios retirados de campo com marcas geradas (por meio de impulsos de corrente aplicados no LAT-EFEI) em centelhadores novos. Como os impulsos aplicados no Laboratório eram de intensidades conhecidas, foi possível estimar o perfil das descargas em toda a área de concessão da AES Sul.

Os para-raios analisados foram separados de acordo com o fabricante e a região na qual estavam instalados. Trata-se de um total de 15 sub-regiões considerando áreas rurais e urbanas. Cada uma das sub-regiões foi analisada separadamente, em relação às descargas positivas e negativas. A Tabela 4.1 apresenta o perfil das descargas nas regiões de Novo Hamburgo e Lajeado.

Tabela 4.1 - Distribuição de probabilidade de descargas de acordo com a sua intensidade para as regiões de Novo Hamburgo e Lajeado.

Distribuição de Probabilidade de Descarga							
Região	Área	Impulso	Probabilidade [%]				
			≤ 5 kA	≤ 10 kA	≤ 40 kA	≤ 65 kA	≤ 100 kA
Novo Hamburgo	Urbana	Positivo	85,0	94,0	99,0	-	-
	Urbana	Negativo	81,0	91,0	98,0	99,0	-
	Rural	Positivo	80,0	92,0	99,0	-	-
	Rural	Negativo	84,0	92,0	99,0	-	-
Lajeado	Urbana	Positivo	74,0	86,0	98,0	98,5	-
	Urbana	Negativo	72,0	86,0	97,0	98,5	-
	Rural	Positivo	68,0	82,0	97,0	98,5	-
	Rural	Negativo	64,0	80,0	95,5	97,5	98,5

Foi realizado um tratamento estatístico com o conjunto de dados oriundo das 15 sub-regiões. Esta análise resultou no perfil das correntes de descarga pertencente a toda área de concessão da AES Sul, como apresentado na Figura 4.3.

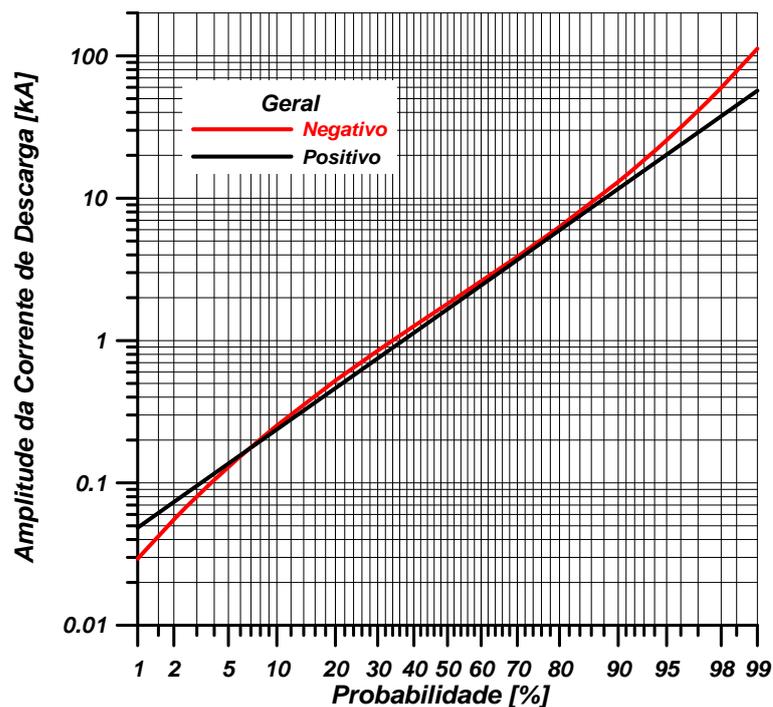


Fig. 4.3 - Probabilidade cumulativa das descargas atmosféricas na região de concessão da AES Sul <sup>[1]</sup>.

No gráfico apresentado na Figura 4.3 é possível observar que, para a área sob análise, existe uma probabilidade de 76% de que as descargas sejam inferiores a 5 kA e de 12% que elas sejam superiores a 10 kA. Conforme se pode observar, não existe diferenças significativas entre as intensidades das descargas positivas e negativas no intervalo entre 5 kA e 10 kA, o qual representa cerca de 88% da probabilidade de descarga.

O tratamento estatístico foi realizado através do software MINITAB 14<sup>®</sup>. Os dados apresentaram maior adequação à distribuição lognormal. A Figura 4.4 apresenta o resultado gerado pelo MINITAB 14<sup>®</sup> referente à sub-região 1.

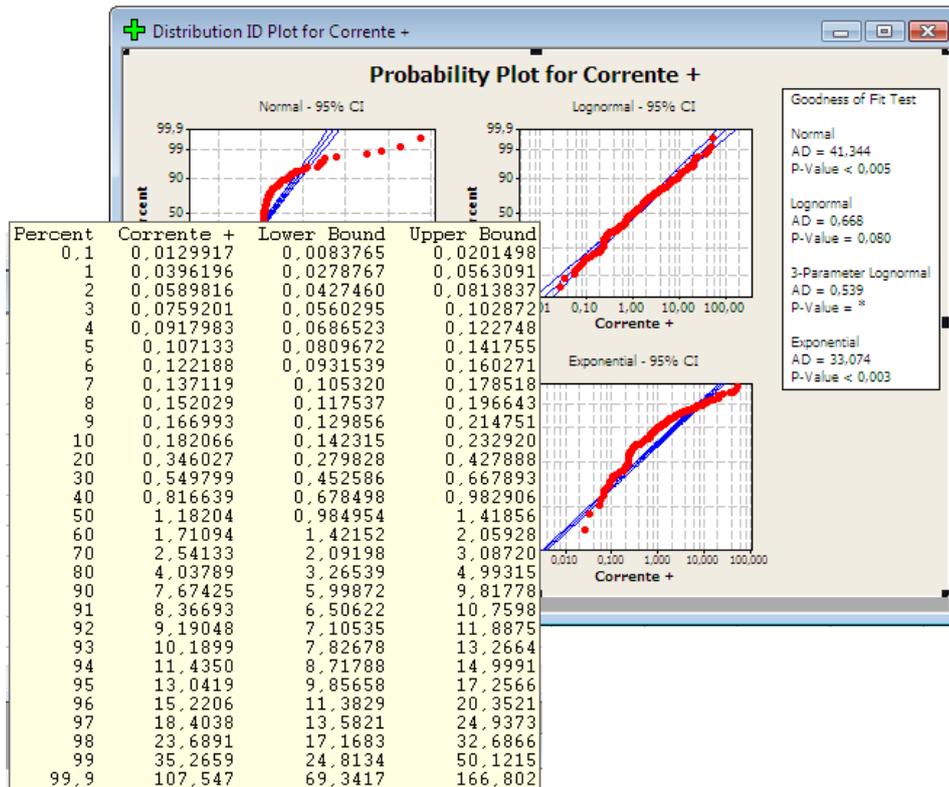


Fig. 4.4 - Obtenção dos valores da distribuição Lognormal para a corrente positiva da sub-região 1<sup>[1]</sup>.

A partir dos resultados das distribuições de probabilidade foi possível levantar uma curva de densidade de probabilidade (Figura 4.5). Para isso, foram considerados todos os valores das descargas atendendo as polaridades positivas e negativas. Os fatores de forma ( $\sigma$ ) e de escala ( $\mu$ ) utilizados são respectivamente 0,53 kA e 1,57 kA. A equação 4.1 apresenta o modelo matemático da função densidade de probabilidade da distribuição lognormal.

$$P(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (4.1)$$

Onde:

$P(x)$ : função densidade de probabilidade;

$x$ : grandeza sob análise;

$\mu$ : fator de forma;

$\sigma$ : fator de escala.

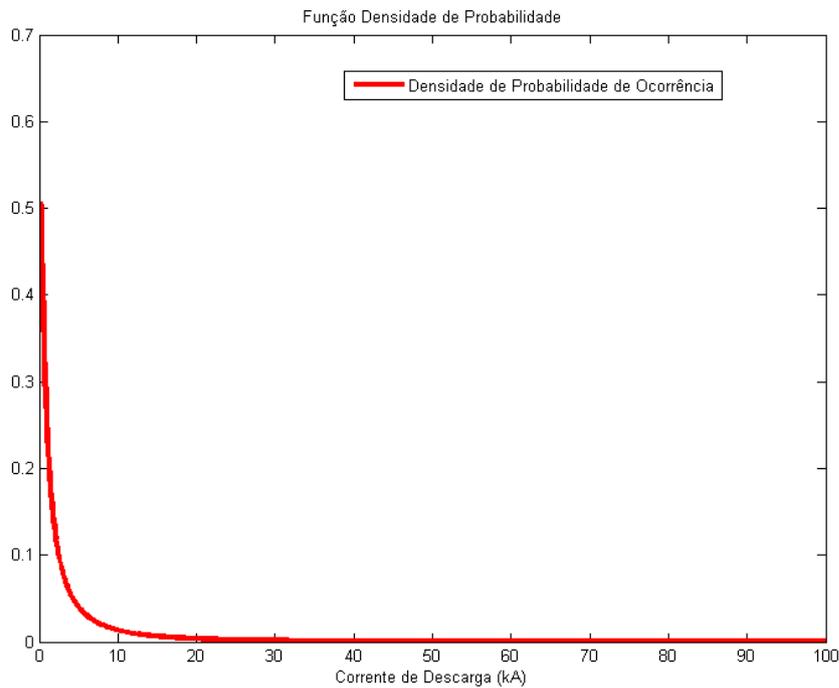


Fig. 4.5 – Gráfico da função densidade da distribuição lognormal referente às amplitudes das correntes de descarga.<sup>[2]</sup>

Após a análise estatística dos níveis das correntes, a próxima etapa para o cálculo do risco de falha do para-raios refere-se à suportabilidade dos módulos frente à ocorrência de correntes elevadas. A determinação desse parâmetro será discutida no tópico 4.2 a seguir.

#### 4.2 - Suportabilidade de corrente

O modelo estatístico segundo Weibull é amplamente utilizado para análise de suportabilidade de sistemas elétricos, bem como é também usualmente adotado para análise da suportabilidade frente à absorção de energia de varistores de óxido metálico [3]. Dessa forma, o modelo estatístico adotado para a determinação da suportabilidade dos módulos frente à corrente de descarga segue a seguinte função de probabilidade:

$$p = 1 - 0,5 \left( 1 + \frac{x - x_{50\%}}{\eta\sigma} \right)^{\frac{1,39}{\ln \frac{\eta}{\eta-1}}} \quad (4.2)$$

Onde:

$p$ : função distribuição acumulada (Weibull);

$x$ : grandeza sob análise, neste caso, a corrente de descarga;

$x_{50\%}$ : Valor crítico da grandeza sob análise;

$\sigma$ : Desvio padrão da grandeza sob análise;

$\eta$ : Constante da distribuição de Weibull simétrica.

De acordo com a ANSI [4], o para-raios de 5 kA deve suportar dois impulsos de 40 kA ou dois impulsos de 65 kA sem falhar. Em relação ao para-raios de 10 kA a ANSI estabelece dois impulsos de 100 kA sem que haja falha. Esta norma faz uma relação entre a condição de serviço do equipamento e o nível de corrente que este é capaz de suportar. Esta relação é feita da seguinte forma:

- Serviço leve: o para-raios deve suportar dois impulsos de 40 kA na forma 4/10  $\mu$ s;
- Serviço normal: o para-raios deve suportar dois impulsos de 65 kA na forma 4/10  $\mu$ s;
- Serviço pesado: o para-raios deve suportar dois impulsos de 100 kA na forma 4/10  $\mu$ s.

De acordo com a IEC [5], o para-raios de 5 kA deve suportar dois impulsos de 65 kA e o para-raios de 10 kA deve suportar dois impulsos de 100 kA. Entretanto, também é estabelecido que de acordo com a condição de serviço esses níveis de corrente podem ser maiores ou menores.

A Figura 4.6 apresenta uma curva de probabilidade cumulativa da distribuição de Weibull. Esta curva foi levantada utilizando-se a Equação 4.2 com base em um para-raios de 5 kA e suportabilidade de 40 kA. O desvio padrão adotado para a corrente suportável foi de 2 kA.

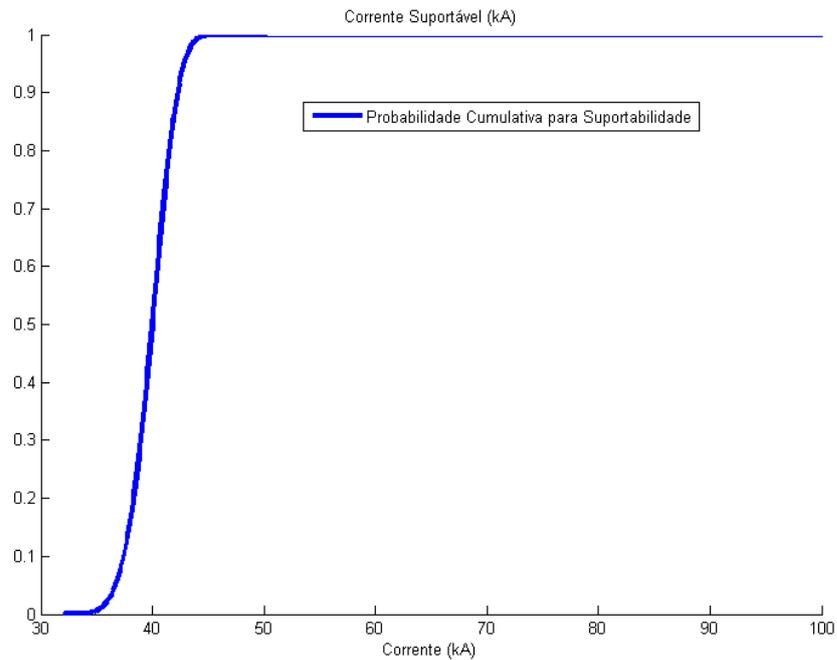


Fig. 4.6 - Curva de probabilidade cumulativa para a suportabilidade de para-raios de 5 kA<sup>[2]</sup>.

A escolha deste modelo se justifica pelo fato de que o modelo de Weibull permite trabalhar com o conceito de suportabilidade ou falha absoluta, ou seja, dotada de falha unitária, fato que pode ser confirmado através de resultados de ensaios em laboratório [3]. Não são observadas, em laboratório, falhas na região superior a 4 vezes o desvio padrão, sugerindo a adoção de uma distribuição de probabilidade limitada, como é o caso da distribuição Weibull.

De posse dos resultados relacionados à análise estatística das correntes e da suportabilidade de corrente, é possível estimar o risco de falha dos para-raios.

### 4.3 - Estimativa do risco de falha

A estimativa do risco de falha do para-raios pode ser calculada a partir da Equação 4.3:

$$R_{falha} = \int D_{PS}(I) \cdot S_{PR}(I) \cdot dI \quad (4.3)$$

Onde:

$R_{falha}$ : Risco de falha do para-raios;

$D_{PS}(I)$ : Função densidade de probabilidade das descargas elétricas;

$S_{PR}(I)$ : Função cumulativa de probabilidade relacionada à suportabilidade do para-raios.

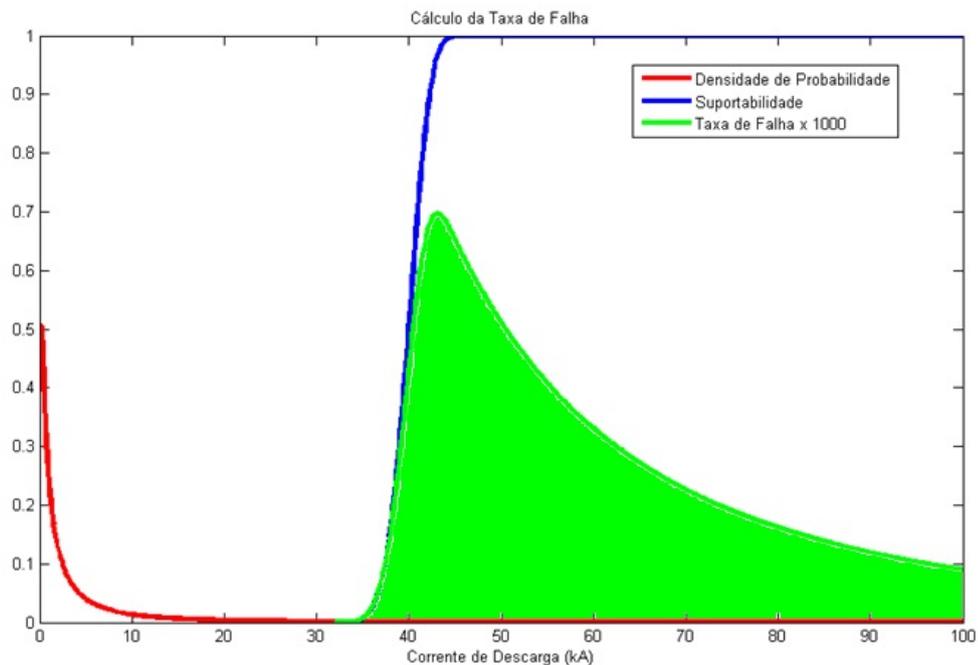


Fig. 4.7 – Sobreposição das curvas de probabilidade e curva correspondente para o cálculo do risco de falha.

Na Figura 4.7 é possível verificar o comportamento da curva que representa o risco de falha do para-raios conjuntamente com as curvas que representam a probabilidade de ocorrência das descargas e a suportabilidade de corrente.

O risco de falha de acordo com o nível de corrente apresenta os seguintes valores:

- Para raios de 5 kA → Suportabilidade de 40 kA: 1,56 %;
- Para-raios de 5 kA → Suportabilidade de 65 kA: 0,67 %;
- Para-raios de 10 kA → Suportabilidade de 100 kA: 0,23 %.

De acordo com o perfil das correntes (ver Figura 4.3) a probabilidade para a ocorrência de correntes superiores a 40 kA é de aproximadamente 2,5 %. Visto que o risco de falha acima de 40 kA é relativamente pequeno, a instalação de para-raios de 5 kA com suportabilidade de 40 kA garante de forma segura a proteção dos equipamentos instalados no sistema de distribuição. A princípio, diante de algumas ocorrências de descargas nestes valores, não deveria haver falha no para-raios. Entretanto, em alguns casos, é possível afirmar que é melhor que haja falha do para-raios. Pois, para correntes de descarga muito elevadas, a tensão residual pode se aproximar ou ultrapassar perigosamente o NBI dos transformadores que devem ser protegidos.

Para que estes resultados apresentem um valor mais real, a análise da suportabilidade de corrente deve ser realizada com base em ensaios com as amostras utilizadas no projeto, onde provavelmente resultaria em valores inferiores aos obtidos.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos varistores e nos módulos, bem como a análise destes resultados.

#### **4.4 – Referências bibliográficas do capítulo 4**

- [1] MARTINEZ, M. L. B.; PIKANÇO, A. F.; LEFORT, C.; SALLES, C.; SILVA, P. O.; CARVALHO, R. B. B.; FAVERI, R.; CERQUEIRA JÚNIOR, T.; COELHO JÚNIOR, V. A. C: Relatório AES Sul R-AES-05 – “*Análises Comparativas – Correntes Descarregadas pelos Para-Raios*”. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento AES Sul/UNIFEI/FUPAI. Itajubá, 2008.
- [2] WANDERLEY NETO, E. T.; MARTINEZ, M. L. B.; DINIZ, A. M. M.; SALLES, C. de.; OLIVEIRA, H. R. P. M. de; UCHÔA, J.; “*Análise da Taxa de Falhas em Para-raios de Distribuição de Acordo com Estimativas de Correntes de Descarga*”, XIV ERIAC, Maio, 2011.
- [3] MARTINEZ, M. L. B., “*Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação*”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

- [4] ANSI Std. C62-11 – IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Ac Power Circuits (>1kV). Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA, 1999.
- [5] IEC 60099-4 – “*Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*”. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.

# 5

## Desenvolvimento e ensaios

O presente capítulo trata dos procedimentos realizados para o desenvolvimento do projeto de para-raios de 5 kA e de seus respectivos resultados. Inicialmente, será apresentada uma descrição dos ensaios realizados abordando os equipamentos e arranjos utilizados na execução de cada um destes. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos varistores e nos módulos do para-raios. Após a descrição e apresentação dos resultados de todos os ensaios será realizada a análise dos resultados obtidos.

Para os varistores, foram apresentadas as medições das tensões de referência e potência dissipada, bem como as médias das tensões residuais obtidas quando submetidos às aplicações dos impulsos. As amostras analisadas apresentam dez modelos, cinco varistores para cada modelo, distribuídos em quatro fabricantes de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Fabricantes e modelos dos varistores

<i>Fabricantes</i>	<i>Modelos dos varistores</i>
Fabricante 1	A1, A2 e A3
Fabricante 2	B1 e B2
Fabricante 3	C1 e C2
Fabricante 4	D1, D2 e D3

No que se referem aos módulos, foram produzidas 5 unidades de 15 kV e 5 unidades de 25 kV referente à cada fabricante.

Os ensaios que compreendem as medições de tensão de referência e potência dissipada, assim como os que se referem às medições de tensão de rádio interferência, apresentaram seus resultados distribuídos em quatro etapas. A primeira delas, denominada de Etapa 1, agrega os resultados oriundos das medições nas condições iniciais, ou seja, considera às medições realizadas antes da aplicação dos impulsos (módulos novos). A Etapa 2 apresenta os resultados das medições realizadas após a aplicação dos impulsos de curta duração (1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA) cuja forma de onda é 8/20  $\mu$ s. A Etapa 3 apresenta os resultados após a aplicação dos impulsos de 40 kA na forma 4/10  $\mu$ s. Por fim, foram apresentados os resultados da Etapa 4 os quais se referem às medições realizadas após a aplicação dos impulsos de longa duração, 150 A e 250 A apresentando um tempo de duração de 2 ms.

Os ensaios foram executados segundo uma sequência que consiste na medição de seus parâmetros (corrente de fuga, potência dissipada e tensão de rádio interferência) nas condições iniciais e a evolução destes parâmetros após a aplicação de uma sequência de impulsos de curta duração e de longa duração. Estes ensaios seguem a seguinte sequência, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Sequência de ensaios

<b>Ordem</b>	<b>Medição</b>	<b>Características</b>
01	Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, em temperatura ambiente.
02 <sup>(i)</sup>	Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1 mA e 2 mA assim como valores correspondentes a 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão de referência medida, a 80 °C.
03 <sup>(ii)</sup>	Tensão de Rádio Interferência	Considerando os ruídos da amostra ensaiada em condições ambientes e submetidas a 1,0 p.u. e 1,1 p.u. de tensão.
04 <sup>(iii)</sup>	Impulsos 8 x 20 µs	Cinco impulsos para cada um dos seguintes níveis de corrente: 1,5 kA, 2,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA.
05	Repetição dos Itens 1 e 3	-
06	Impulsos 4 x 10 µs	Dois impulsos de 40 kA.
07	Repetição dos Itens 1 e 3	-
08 <sup>(iv)</sup>	Impulsos de longa duração (2 ms)	Cinco impulsos para cada um dos seguintes níveis de corrente: 75 A, 150 A e 250 A.
09	Repetição dos Itens 1 e 3	-
10 <sup>(v)</sup>	Impulso 4 x 10 µs	Dois impulsos de 65 kA.

<sup>(i)</sup>Ensaio realizado apenas nos varistores.

<sup>(ii)</sup>Ensaio realizado apenas nos módulos.

<sup>(iii)</sup>Aplicação nos varistores: 1,5 kA, 2,5 kA, 5,0 kA e 10 kA. Aplicação nos módulos: 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA.

<sup>(iv)</sup>Nos varistores os impulsos foram de 75 A e 150 A; nos módulos 150 A e 250 A.

<sup>(v)</sup>Ensaio realizado apenas nos varistores.

Todos os resultados apresentados e discutidos neste capítulo relacionados aos módulos tratam apenas dos ensaios realizados nos módulos de 15 kV do fabricante que apresentou melhor adequação a sequência de ensaios, foram realizados ensaios em módulos de 3 (três) fabricantes.

As amostras (módulos) citadas neste capítulo foram identificadas por 15 A, 15 B, 15 C, 15 D e 15 E. Todos os resultados dos ensaios realizados nos módulos dos demais fabricantes, assim como dos ensaios realizados nos módulos de 24 kV do fabricante selecionado, estão apresentados no Anexo II.

## **5.1 - Equipamentos e montagens dos ensaios**

A seguir serão apresentados os equipamentos e as montagens relacionados aos ensaios realizados nos varistores e nos módulos do para-raios de 5 kA. Todos os ensaios foram realizados no LAT-EFEI.

### **5.1.1 - Ensaio de tensão de referência e potência dissipada**

Para a determinação da tensão de referência e potência dissipada, é necessária uma forma de onda senoidal pura, com o mínimo possível de harmônicos. A Norma NBR 6936 especifica, para a realização de ensaios, uma onda de tensão alternada com distorção máxima de 5% [1]. Isto pode ser obtido com a utilização de uma fonte geradora de sinais com frequência controlada e um amplificador de potência para alimentação de um transformador de alta tensão.

O sistema utilizado é monitorado por uma unidade de medição na qual foi desenvolvida para aquisição dos valores de tensão, corrente e potência dissipada, mostrado na Figura 5.1. O sistema de aquisição de dados é alimentado através de cabos blindados conectados a unidade secundária de um divisor resistivo e um shunt, como mostrado na Figura 5.2. O transformador de alta tensão é mostrado na Figura 5.3 e o diagrama esquemático do circuito de ensaio pode ser visto na Figura 5.4.



Fig. 5.1 - Fonte de tensão senoidal de 60 Hz e Painel de controle e sistema de aquisição



Fig. 5.2 - Divisor resistivo e shunt para medição de tensão e corrente



Fig. 5.3 - Transformador de alta tensão alimentado pela fonte de 60 Hz

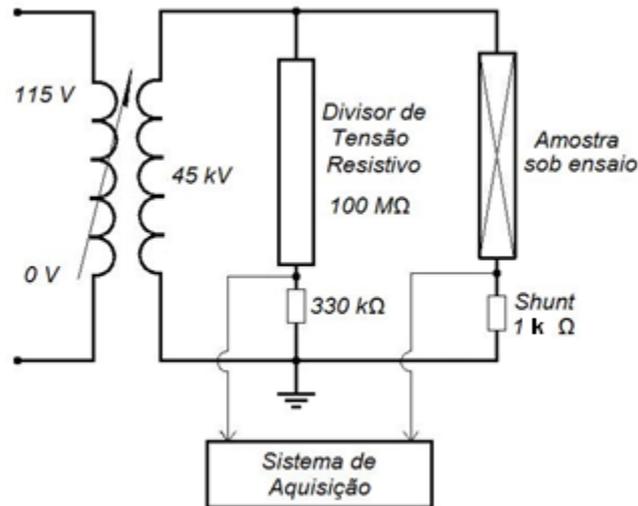


Fig. 5.4 – Diagrama esquemático da fonte de tensão senoidal de 60 Hz

Neste ensaio foram feitas medições da tensão de referência (tensão necessária para fazer com que uma corrente de 1 mA RMS percorra o para-raios) e potência dissipada nesta condição. Também foram medidas as tensões e as potências dissipadas quando se faz uma corrente de 2 mA percorrer o varistor/módulo do para-raios. Em seguida a tensão aplicada sobre o varistor/módulo foi ajustada para 75%, 80% e 85% da tensão de referência, medindo-se a corrente de fuga nestas condições.

### 5.1.2 - Ensaio de tensão de rádio interferência

Este ensaio é realizado com a aplicação de dois níveis de tensão, Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV e  $1,1 \times \text{MCOV}$ , onde, para os módulos com tensão nominal de 15 kV é atribuída uma MCOV igual a 12,7 kV.

A medição da tensão de rádio interferência tem por objetivo avaliar os ruídos em alta frequência produzidos pelo para-raios energizado comparando-os com os valores obtidos nas condições ambientais normais. Os resultados destes ensaios são indicativos da qualidade do projeto do para-raios e servem como base para verificação de degradação mecânica estrutural após solicitações de corrente de descarga com formas padronizadas  $8/20 \mu\text{s}$  e  $4/10 \mu\text{s}$ , conforme requisitos expostos na referência [2].

A Figura 5.5 mostra o diagrama de ensaio utilizado para medir a tensão de rádio interferência. Este sistema é o recomendado pela *Norma NEMA 107 – Methods of Measurement of Radio Influence Voltage (RIV) of High Voltage Apparatus* e, neste caso, a indutância de bloqueio tem por objetivo impedir o retorno dos sinais de alta frequência para a fonte aumentando o ganho do sistema de medição, composto pela *Impedância de Acoplamento* e o *Detector de RIV*. O diagrama esquemático do circuito de ensaio pode ser visto na Figura 5.6.



Fig. 5.5 – Arranjo para medição de tensão de rádio interferência

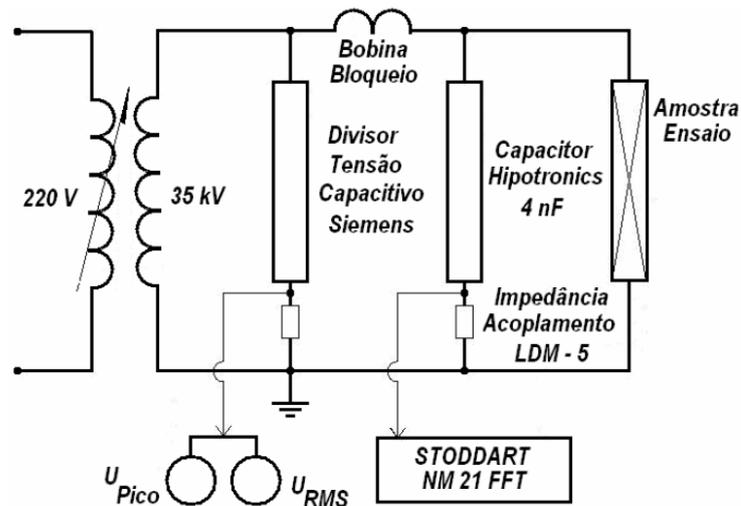


Fig. 5.6 – Diagrama esquemático do arranjo para medição de tensão de rádio interferência.

### 5.1.3 - Ensaio de impulso de corrente de curta duração

Os ensaios de impulso de corrente de curta duração utilizados nesta dissertação compreendem impulsos com amplitudes de 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA, na forma 8/20  $\mu$ s, e amplitude de 40 kA e 65 kA na forma 4/10  $\mu$ s.

Este ensaio é realizado no gerador de impulsos de curta duração, no qual é formado por um conjunto de capacitores que, após serem carregados em paralelo, através de um diodo retificador, são descarregados em um indutor através de um centelhador. O sistema é monitorado através de um osciloscópio digital adaptado para a aquisição dos sinais de corrente e tensão. Estes sinais de corrente e tensão são alimentados através de cabos blindados, conectados à unidade secundária de um divisor capacitivo e a um transformador de impulso.

A Figura 5.7 apresenta uma fotografia do gerador de impulsos de corrente de curta duração utilizado no LAT-EFEI.



Fig. 5.7 – Gerador de impulsos de corrente de curta duração<sup>[3]</sup>

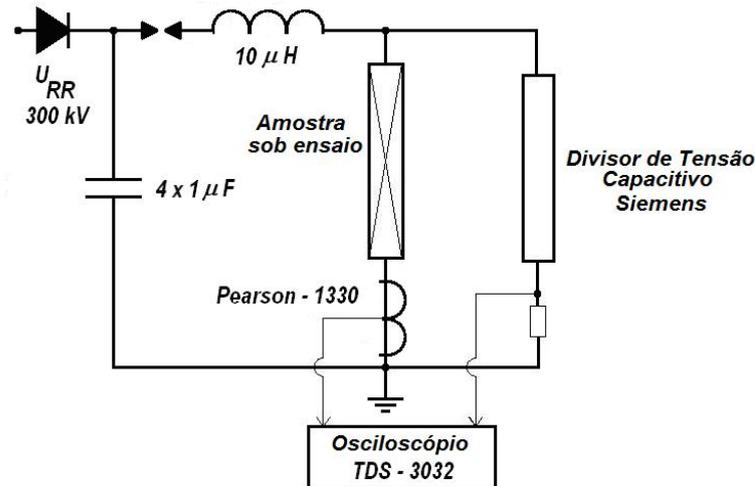


Fig. 5.8 - Gerador de impulsos de corrente de curta duração – Diagrama esquemático

#### 5.1.4 - Ensaio de impulso de corrente de longa duração

Neste ensaio foram utilizados três tipos de impulso de corrente, 75 A, 150 A e 250 A com duração de 2 ms. Para a geração destes impulsos, os capacitores do gerador são carregados em paralelo através de um diodo retificador, e descarregados por um centelhador através de uma série de indutâncias, conforme visto na Figura 5.9. Este circuito apresenta um comportamento semelhante ao de uma linha de transmissão. O sistema é monitorado através de um osciloscópio digital para a medição da tensão e corrente na bancada mostrada na Figura 5.10. Cabos blindados são utilizados para alimentação dos sinais de tensão e corrente, provenientes da unidade secundária de um divisor capacitivo e de um transformador de impulsos de corrente especial.

A Figura 5.11 apresenta o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente de curta duração.



Fig. 5.9 – Gerador de impulso de corrente de longa duração

A Figura 5.10 apresenta o painel de controle do gerador. Este tipo de painel é utilizado para controlar todos os tipos de geradores de impulso de corrente e tensão.



Fig. 5.10 – Gerador de impulso de corrente de longa duração – Painel de controle

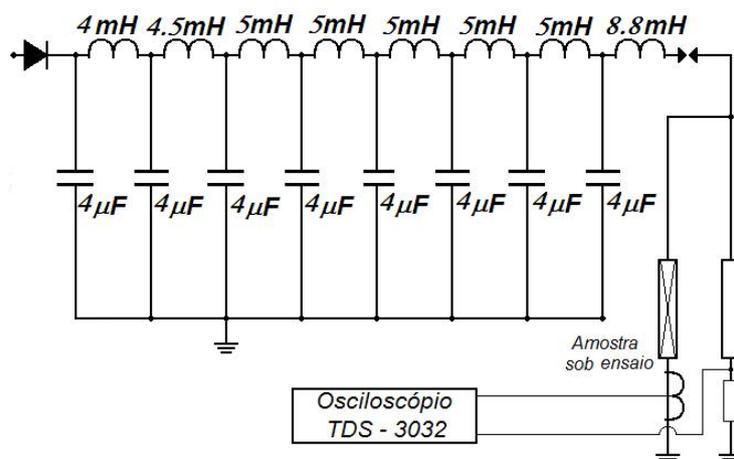


Fig. 5.11 – Diagrama esquemático do Gerador de impulso de corrente de longa duração

## 5.2 - Resultados obtidos dos ensaios realizados nos varistores

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nos varistores.

### 5.2.1 - Tensão de referência e potência dissipada

A Tabela 5.3 apresenta os valores das tensões de referência, tensões necessárias para se fazer percorrer uma corrente de 1 mA através do varistor, bem como os valores das potências dissipadas nestas condições. As medições foram realizadas com os varistores novos e após a sequência de impulsos.

Tabela 5.3 – Valores das tensões de referência e potências dissipadas.

Amostras	Novo		Curta duração		Corrente elevada		Longa duração	
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U1 [kV]	Potência [W]
A1	3,34	2,00	3,31	1,99	3,27	2,07	3,45	2,22
A2	4,71	2,76	4,65	2,67	4,46	2,66	4,76	2,80
A3	5,13	3,22	5,12	3,17	4,95	3,23	5,35	3,47
B1	3,67	2,16	3,67	2,19	3,51	2,24	3,92	2,52
B2	6,46	3,97	6,41	3,84	6,25	3,76	6,86	4,17
C1	3,42	2,10	3,45	2,11	3,19	2,10	3,42	2,22
C2	6,91	4,15	6,72	3,97	5,95	3,59	6,76	3,84
D1	5,19	2,97	5,25	3,02	5,45	3,15	5,83	3,31
D2	3,55	2,10	3,60	2,16	3,75	2,26	3,92	2,31
D3	5,65	3,29	5,73	3,33	5,67	3,48	6,19	3,51

No Anexo I estão apresentados os resultados das medições de tensão e potência dissipada para o valor de corrente igual a 2 mA, bem como valores de corrente de fuga e potência dissipada para 0,70, 0,8 e 0,85 do valor da tensão de referência.

### 5.2.2 - Tensão residual

Os valores médios de tensão residual para cada modelo de varistor podem ser vistos na Tabela 5.4. Convém lembrar que alguns varistores falharam durante a aplicação de alguns impulsos. Neste caso, os valores médios foram calculados com base nos varistores remanescentes (valores em itálico).

Tabela 5.4 - Valores médios de tensão residual de acordo com a corrente aplicada.

Corrente	Tensão Residual (kV)									
	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	J2	J3	K5
1,5 kA	6,91	9,63	10,68	7,48	12,90	7,15	14,67	10,92	7,61	11,95
2,5 kA	7,41	10,11	11,05	7,83	13,63	7,58	15,37	11,46	7,98	12,45
5,0 kA	8,16	10,93	11,97	8,59	14,65	8,29	16,61	12,48	8,67	13,46
10 kA	9,39	12,20	13,22	9,54	16,36	9,34	18,58	13,95	9,82	15,04
40 kA	<b>16,88</b>	19,70	21,20	<b>16,90</b>	24,64	16,82	<b>27,72</b>	22,88	18,02	<b>23,98</b>
75 A	<b>6,15</b>	8,80	9,44	<b>6,65</b>	11,60	6,28	<b>13,03</b>	8,62	6,16	<b>9,45</b>
150 A	<b>6,50</b>	9,26	9,94	<b>7,03</b>	12,50	6,64	<b>13,73</b>	9,22	6,52	<b>10,28</b>
65 kA	<b>21,98</b>	25,42	27,24	<b>22,20</b>	<b>30,48</b>	22,28	<b>32,80</b>	<b>28,26</b>	<b>23,48</b>	<b>29,40</b>

Alguns dos varistores ensaiados não suportaram a sequência principal de ensaios, enquanto que outros modelos suportaram a sequência principal e a sequência adicional, composta da aplicação de dois impulsos de 65 kA. A Tabela 5.5 indica a quantidade de varistores que falharam durante a sequência de ensaios.

Tabela 5.5 – Falhas dos varistores de acordo com a aplicação de impulsos.

Modelo	Número de amostras	Número de Falhas				
		10 kA (8 x 20 $\mu$ s)	40 kA (4 x 10 $\mu$ s)	75 A (2 ms)	150 A (2 ms)	65 kA (4 x 10 $\mu$ s)
A1	05	0	1	0	0	0
A2	05	0	0	0	0	0
A3	05	0	0	0	0	0
B1	05	0	1	0	0	3
B2	05	0	0	0	0	1
C1	05	0	0	0	0	0
C2	05	0	1	0	3	0
D1	05	0	0	0	0	1
D2	05	0	0	0	0	1
D3	05	0	1	0	0	0

Considerando as falhas dos varistores de acordo com o fabricante, em vez de por grupos, verifica-se na Tabela 5.6 que nenhum dos fabricantes apresentou suportabilidade para todas as suas amostras, seguindo a sequência principal.

Tabela 5.6 – Falhas dos varistores de acordo com o fabricante.

Fabricante	Número de amostras	Número de amostras que falharam	
		Sequência principal	Sequência adicional
Fabricante 1	15	01	-
Fabricante 2	10	01	04
Fabricante 3	10	04	-
Fabricante 4	15	01	02

A Figura 5.12 apresenta o varistor A1 após ter sido submetido ao impulso de corrente de longa duração, observa-se que a descarga perfurou o varistor na região central cuja característica é típica desta forma de impulso.



Fig. 5.12 – Falha apresentada no varistor A1 após a aplicação do impulso de corrente de longa duração.

### 5.2.3 - Seleção dos varistores

Com base nos resultados dos ensaios realizados nos varistores, foi decidido que as amostras do fabricante 3 não seriam utilizadas para a composição dos módulos dos para-raios. Esta decisão foi tomada após ter sido verificado que os resultados dos impulsos realizados nos dois modelos pertencentes ao fabricante 3 foram contraditórios, visto que o modelo C1 suportou até as aplicações de 65 kA (sequência adicional) sem falhar, entretanto, o modelo C2 apresentou falhas em quatro das cinco amostras ensaiadas durante a sequência principal de ensaios. Portanto, foram fabricados módulos de para-raios apenas com os varistores pertencentes aos fabricantes 1, 2 e 4.

### 5.3 - Resultados obtidos dos ensaios realizados nos módulos

A partir dos resultados obtidos nos ensaios com os varistores, foram montados módulos para ensaio com os fabricantes selecionados. Os módulos foram submetidos à sequência reduzida de ensaios. Isto permitiu realizar avaliações que não seriam possíveis apenas com os varistores, tais como a interação entre as superfícies dos varistores e a dissipação ao se considerar o conjunto.

Neste capítulo serão apresentados apenas os resultados dos ensaios realizados nos módulos de 15 kV (15A, 15B, 15C, 15D e 15E) do fabricante 4. Os

resultados dos ensaios realizados nos módulos dos demais fabricantes, bem como nos módulos de 25 kV do fabricante 4, estão apresentados no Anexo II.

### Etapa 1: Condição inicial

Tabela 5.7 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga.

Amostras	1 mA		2 mA		Corrente de fuga		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
15 A	15,45	8,54	15,74	18,22	239,73	259,08	280,71
15 B	15,45	8,67	15,77	18,42	239,26	258,44	277,87
15 C	15,48	8,55	15,79	18,04	239,94	260,31	281,41
15 D	15,49	8,40	15,82	18,34	240,39	261,85	281,07
15 E	15,45	8,62	15,78	18,12	238,89	260,58	282,22

### Etapa 2: Medições realizadas após impulsos de curta duração – 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA na forma 8/20 μs.

Tabela 5.8 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga.

Amostras	1 mA		2 mA		Corrente de fuga		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
15 A	15,04	7,66	15,32	17,04	232,2	251,6	274,4
15 B	15,08	8,16	15,31	17,6	231,6	250,8	272,6
15 C	15,1	8,21	15,45	17,31	234,7	254	275,4
15 D	15,11	8,07	15,4	17,43	236,7	255,7	277
15 E	15,13	8,18	15,39	18,78	235,2	255,8	277,6

**Etapa 3: Medições realizadas após impulsos de curta duração, 40 kA na forma 4/10  $\mu$ s.**

Tabela 5.9 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga.

Amostras	1 mA		2 mA		Corrente de fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U1	0,80 U1	0,85 U1
	U1 [kV]	[W]	U2 [kV]	[W]	[ $\mu$ A]	[ $\mu$ A]	[ $\mu$ A]
15 A	15,55	8,59	15,88	18,06	235,5	255,9	278,8
15 B	15,6	8,62	15,95	18,07	235,9	255,8	278,2
15 C	15,6	8,71	15,98	18,14	237,1	256,9	279,8
15 D	15,68	8,81	16,02	18,27	240,6	259,5	282,5
15 E	15,59	8,53	15,98	18,02	237,6	257,9	280,7

**Etapa 4: Medições realizadas após impulsos de longa duração, 150 A e 250 A com duração de 2 ms.**

Tabela 5.10 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga.

Amostras	1 mA		2 mA		Corrente de fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U1	0,80 U1	0,85 U1
	U1 [kV]	[W]	U2 [kV]	[W]	[ $\mu$ A]	[ $\mu$ A]	[ $\mu$ A]
15 A	15,78	8,16	16,08	16,85	240,71	261,75	283,57
15 B	15,79	8,58	16,08	17,36	240,83	262,22	284,96
15 C	15,70	8,44	16,04	17,33	239,02	260,40	283,53
15 D	15,71	8,44	16,05	17,52	240,23	260,49	284,12
15 E	15,67	8,13	16,02	17,03	241,75	260,97	283,16

A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tensão de rádio interferência para as quatro etapas que compõem a sequência reduzida de ensaios.

Tabela 5.11 – Tensão de rádio interferência

Amostras	Valor da tensão de rádio interferência em $\mu V$			
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
15 A	1,53	7,53	7,53	4,24
15 B	1,36	7,53	7,53	5,98
15 C	1,53	7,53	7,53	4,24
15 D	1,36	7,53	7,53	4,24
15 E	1,53	7,53	7,53	4,24

Os resultados oriundos da aplicação dos impulsos de 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA estão apresentados nas Tabelas 5.12 – 5.15 e os resultados provenientes dos impulsos de 40 kA podem ser vistos na Tabela 5.16.

Tabela 5.12 - Tensão residual obtida após a aplicação dos impulsos de 1,5 kA

	Tensão Residual (kV)					
	1	2	3	4	5	Média
15 A	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38
15 B	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38
15 C	32,38	32,38	32,38	33,00	32,38	32,50
15 D	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38	32,38
15 E	32,38	32,38	32,38	32,38	33,00	32,50
Média	32,38	32,38	32,38	32,50	32,50	32,43
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,28	0,28	0,07

Tabela 5.13 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 3,0 kA

	<i>Tensão Residual (kV)</i>					
	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
15 A	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24	34,24
15 B	34,24	34,24	34,24	34,87	34,87	34,49
15 C	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87
15 D	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87
15 E	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87	34,87
Média	34,62	34,62	34,62	34,74	34,74	34,67
Desvio Padrão	0,31	0,31	0,31	0,25	0,25	0,26

Tabela 5.14 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 5,0 kA

	<i>Tensão Residual (kV)</i>					
	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
15 A	36,11	36,11	36,11	36,11	36,73	36,24
15 B	36,11	36,11	36,11	36,73	36,73	36,36
15 C	36,73	36,73	36,73	36,73	36,73	36,73
15 D	36,11	36,73	36,73	36,73	36,73	36,61
15 E	36,73	36,73	36,73	36,73	36,73	36,73
Média	36,36	36,48	36,48	36,61	36,73	36,53
Desvio Padrão	0,34	0,34	0,34	0,28	0,00	0,23

Tabela 5.15 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 10 kA

	<i>Tensão Residual (kV)</i>					<i>Média</i>
	1	2	3	4	5	
15 A	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
15 B	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
15 C	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
15 D	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
15 E	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
Média	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.16 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 40 kA

<i>Amostras</i>	<i>Tensão Residual (kV)</i>		<i>Média</i>
	1	2	
15 A	51,47	59,11	55,29
15 B	51,47	60,13	55,80
15 C	52,49	59,62	56,06
15 D	51,98	60,13	56,06
15 E	49,94	59,11	54,53
Média	51,47	59,62	55,55
Desvio Padrão	0,95	0,51	0,65

Os resultados provenientes dos impulsos de corrente de longa duração estão apresentados nas Tabelas 5.17 e 5.18. Estes ensaios foram realizados após a aplicação dos impulsos de corrente de curta duração seguidos das medições das

tensões de referência e potência consumida, assim como as medições de tensão de rádio interferência.

Tabela 5.17 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 150 A

<i>Amostras</i>	<i>Tensão Residual (kV)</i>					
	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
15 A	28,03	28,54	24,97	25,99	28,54	27,21
15 B	29,56	23,44	25,99	27,52	29,05	27,11
15 C	30,58	24,97	25,99	28,54	30,07	28,03
15 D	30,07	23,95	23,95	28,03	30,07	27,21
15 E	30,07	24,97	26,50	28,54	30,07	28,03
Média	29,66	25,17	25,48	27,72	29,56	27,52
Desvio Padrão	0,98	1,99	1,02	1,06	0,72	0,47

Tabela 5.18 - Resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de 250 A

<i>Amostras</i>	<i>Tensão Residual (kV)</i>					
	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
15 A	31,60	31,09	29,56	31,60	32,10	31,19
15 B	27,01	30,58	31,60	32,10	32,10	30,68
15 C	31,60	28,03	31,09	32,10	32,61	31,09
15 D	31,09	28,03	30,58	32,10	32,61	30,88
15 E	30,07	31,09	31,09	32,10	32,61	31,39
Média	30,27	29,76	30,78	32,00	32,41	31,04
Desvio Padrão	1,93	1,60	0,77	0,23	0,28	0,28

### 5.3.1 - Seleção dos módulos

Após a realização dos ensaios nos módulos dos fabricantes 1, 2 e 4, foi observado que os módulos montados com os varistores do fabricante 4 apresentaram melhor adequação a sequência de ensaios. Isto resultou na escolha dos varistores deste fabricante para compor o projeto do para-raios de 5 kA.

A seguir serão analisados os resultados dos ensaios desempenhados nos módulos do fabricante 4 para cada etapa da sequência de ensaios.

#### 5.3.1.1 - Tensão de referência e potência dissipada

Analisando a Tabela 5.19 observa-se uma tendência de incremento tanto das tensões de referência quanto das potências dissipadas. Esta tabela se refere às medições realizadas nos varistores do fabricante 4. Esperava-se uma redução da tensão de referência no decorrer da sequência de ensaios. Com exceção da medição realizada na Etapa 2, comportamento semelhante também é observado nas tensões de referência obtidas nos módulos (Tabela 5.20). Uma possível explicação para este comportamento se refere à modificação da estrutura cristalina do ZnO após a aplicação dos impulsos. Isso resultaria em caminhos alternativos para a passagem de corrente. Caminhos estes de maior impedância que os caminhos preferenciais, existentes no varistor em menor estado de degradação.

Tabela 5.19 - Valores médios de tensão de referência e potência dissipada para os varistores do fabricante 4.

<i>Ensaio</i>	<i>D1</i>		<i>D2</i>		<i>D3</i>	
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	Tensão	Potência
	U1 [kV]	[W]	U1 [kV]	[W]	U1 [kV]	[W]
Novo	5,19	2,97	3,55	2,10	5,65	3,29
Curta duração	5,25	3,02	3,60	2,16	5,73	3,33
Corrente elevada	5,45	3,15	3,75	2,26	5,67	3,48
Longa duração	5,83	3,31	3,92	2,31	6,19	3,51

Tabela 5.20 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para as quatro etapas da sequência reduzida de ensaios.

	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
Etapa 1	15,46	8,56	15,78	18,23	239,64	260,05	280,66
Etapa 2	15,09	8,06	15,37	17,63	234,08	253,58	275,40
Etapa 3	15,60	8,65	15,96	18,11	237,34	257,20	280,00
Etapa 4	15,73	8,35	16,05	17,22	240,51	261,17	283,87

No gráfico da Figura 5.13 é possível verificar o comportamento da corrente de fuga em função da tensão aplicada nos módulos. Nota-se que a corrente de fuga atinge um valor máximo na Etapa 2 e nas Etapas 3 e 4 ela apresenta uma tendência de um comportamento estável.

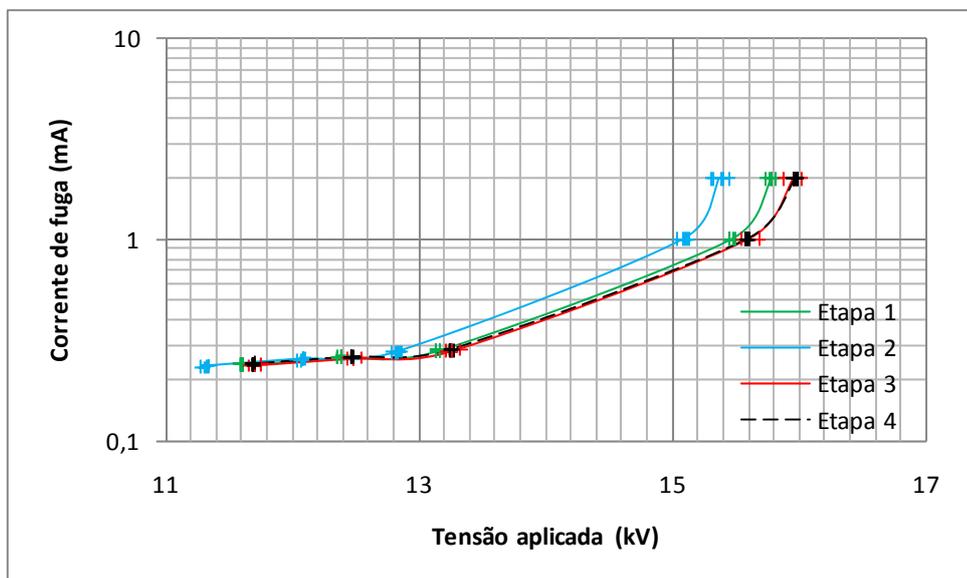


Fig. 5.13 – Corrente de fuga referente às quatro etapas da sequência reduzida.

### 5.3.1.2 - Tensão de rádio interferência

A medição da tensão de rádio interferência tem a finalidade de avaliar através de uma comparação entre o equipamento energizado e desenergizado a variação

dos ruídos produzidos em alta frequência. De acordo com a referência [2], o para-raios está aprovado no ensaio apenas se a tensão de rádio interferência apresentar valor inferior a 2500  $\mu\text{V}$ . Verificou-se nas Tabelas 5.6 que os valores máximos obtidos das tensões de rádio interferência nos ensaios foram de 7,53  $\mu\text{V}$ . Portanto, estes resultados asseguram a qualidade do projeto do para-raios a ser desenvolvido e servem de indicativos da suportabilidade no que se refere à degradação mecânica estrutural dos módulos ensaiados.

### **5.3.1.3 - Tensão residual**

A análise dos resultados oriundos dos impulsos aplicados nas Etapas 3 e 4 será realizada com base na Tabela 5.21 e na Figura 5.14. A Tabela 5.21 apresenta os valores médios das tensões residuais nos quais compreendem os impulsos de curta e longa duração. Estes resultados agregam informações relacionadas ao nível de proteção do para-raios submetido a impulsos de manobra e a impulsos atmosféricos.

Verifica-se, a princípio, que o nível de proteção a impulso de manobra do projeto do para-raios, sob as correntes de 150 A e 250 A, seria definido em 28,03 kV e 31,39 kV respectivamente, pois se tratam dos maiores valores de tensão residual medidas no ensaio.

No que se refere às tensões residuais obtidas dos impulsos de curta duração, verifica-se que, a princípio, o nível de proteção contra impulso atmosférico do projeto do para-raios é de 36,53 kV, pois se trata do valor da tensão residual obtida da curva característica (Figura 5.14) quando no módulo está percorrendo a corrente de descarga nominal, 5 kA.

Tabela 5.21 – Valores médios de tensão residual obtidos a partir dos impulsos aplicados nas Etapas 3 e 4 da sequência reduzida de ensaios.

Corrente	Tensão Residual (kV)				
	15 A	15 B	15 C	15 D	15 E
150 A	27,21	27,11	28,03	27,21	28,03
250 A	31,19	30,68	31,09	30,88	31,39
1,5 kA	32,38	32,38	32,50	32,38	32,50
3,0 kA	34,24	34,49	34,87	34,87	34,87
5,0 kA	36,24	36,36	36,73	36,61	36,73
10 kA	40,47	40,47	40,47	40,47	40,47
40 kA	55,29	55,8	56,06	56,06	54,53

A Figura 5.14 apresenta a característica Tensão versus Corrente dos módulos de para-raios ensaiados. Esta curva foi construída com as médias das tensões residuais e as correntes (Tabela 5.21) estabelecidas nas Etapas 3 e 4 deste estudo. Verifica-se que a tensão residual está variando entre 27,21 kV e 55,29 kV para correntes entre 150 A e 40 kA. A partir desta curva é possível extrair os níveis de proteção do projeto do para-raios a ser elaborado.

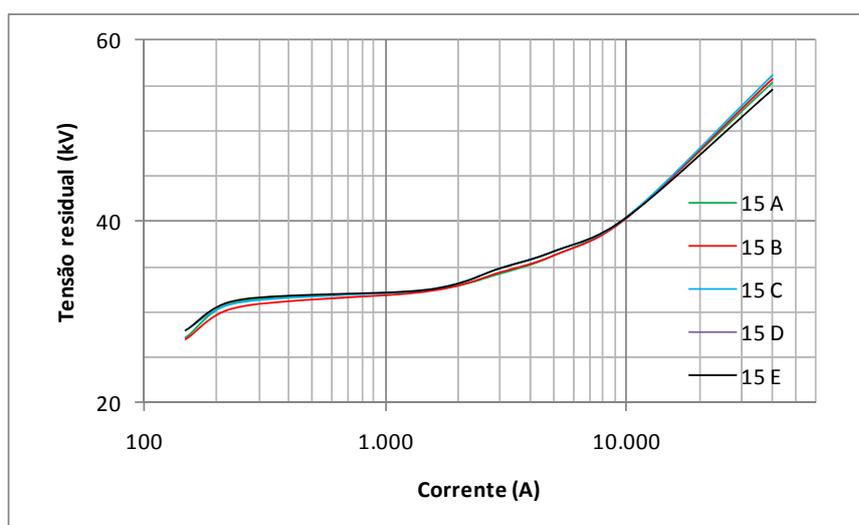


Fig. 5.14 – Característica Tensão versus Corrente em módulos de para-raios a óxido metálico

Após a aplicação dos impulsos realizados nas Etapas 3 e 4 foram verificadas variações da tensão residual inferior a 2% nos impulsos de 1,5 kA, 3,0 kA, 5 kA e 10kA. Com relação aos impulsos de 40 kA foi verificada uma variação na tensão residual de 15,51% referente ao módulo 15 E.

Tratando-se dos impulsos de corrente de longa duração, para a corrente de 150 A, verificou-se uma variação da tensão residual inferior a 2 % e para a corrente de 250 A foi registrada uma variação de 15,87% referente ao módulo 15 B.

Após a aplicação dos impulsos e a partir de uma inspeção visual nos módulos, não foram encontrados indícios de descarga disruptiva externa, trincas ou perfuração nos resistores.

No próximo capítulo serão apresentadas as considerações finais bem como as proposições de estudos posteriores.

#### **5.4 – Referências bibliográficas do capítulo 5**

[1] NBR 6936, “*Técnicas de Ensaio em Alta Tensão*”, Procedimentos.

[2] IEC 60099-4 – “*Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*”. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.

# 6

# Considerações finais

## 6.1 - Conclusões

O projeto de para-raios descrito neste trabalho possibilitou abordar o tema referente à instalação destes equipamentos no sistema de distribuição apresentando correntes de descarga nominal de 5 kA. Para tanto, o estudo teve como base os resultados oriundos de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento [8], o qual contemplou os possíveis níveis de corrente associados às descargas atmosféricas em áreas de concessão da AES Sul – Distribuidora Gaúcha de Energia.

Os resultados deste projeto puderam ser usados como justificativa para desenvolver de forma adequada um projeto de para-raios de 5 kA e avaliá-lo através de uma sequência adaptada de ensaios, baseada em ensaios de tipo e definidos por normas internacionais. Estes ensaios contemplaram a aplicação de impulsos e o acompanhamento da evolução de características do para-raios como a corrente de fuga, a potência dissipada e a tensão de rádio interferência.

Os impulsos de curta duração avaliaram a suportabilidade dos varistores, de modo que os mesmos não deveriam apresentar descargas externas, assim como o nível de proteção contra impulsos atmosféricos. No que se refere ao nível de proteção do para-raios em desenvolvimento, os resultados das medições das tensões residuais indicaram que a tensão residual após as quatro etapas da sequência de ensaios apresentou variação entre 27 kV e 56 kV. Estes valores estão coerentes com o NBI dos transformadores de distribuição que devem ser protegidos.

Para os ensaios de impulso de longa duração, associados à capacidade de dissipação de energia, os varistores deveriam apresentar a capacidade de dissipar a energia associada ao impulso, sem apresentar quebra. Foram obtidas tensões residuais iguais a 28,03 kV e 31,39 kV para as correntes de 150 A e 250 A respectivamente. Os resultados obtidos após a aplicação dos impulsos de corrente de curta duração, os quais se referem à suportabilidade dos varistores, permitiu obter um nível de proteção contra descargas atmosféricas igual a 36,53 kV.

A sequência de ensaios foi realizada em varistores/módulos de 4 (quatro) fabricantes para os varistores e 3 (três) para os módulos, onde foi observado um número superior de amostras que falharam após a realização dos ensaios de longa duração quando comparado com os resultados obtidos após os impulsos de curta duração. A princípio, espera-se uma redução na falha dos varistores submetidos aos impulsos de curta duração após a montagem completa do para-raios devido ao aumento da isolação com a colocação do invólucro.

Em relação ao acompanhamento das características dos varistores, os valores obtidos encontraram-se dentro do esperado, resultando em variações médias de 1,75% para a tensão de referência, -2,45% para a potência dissipada, enquanto que a tensão de rádio interferência permaneceu a baixo do valor máximo admitido por norma. Isto permite avaliar a estabilidade do varistor, apresentando relação direta com o material utilizado. As variações observadas indicam uma boa qualidade dos varistores selecionados. Com relação à variação da potência dissipada, não há estudos relacionados ao envelhecimento dos varistores quando submetidos a impulsos de longa duração.

Os resultados apresentados no presente trabalho (Capítulo 5) são referentes às unidades do fabricante que melhor se adequou a sequência de ensaios realizada, tanto em relação aos varistores, individualmente, como aos módulos prontos. Não foram verificados indícios de descarga disruptiva externa, trincas ou perfuração nos resistores após a realização dos ensaios realizados nos módulos do fabricante selecionado.

Em complemento a sequência de ensaios, foi realizada uma estimativa do risco de falha dos para-raios. Para isso foi feita uma análise estatística com base em dados referentes a intensidade de corrente das descargas atmosféricas e à suportabilidade dos varistores. Como resultado, observou-se para os para-raios de

5kA o risco de falha estimado de 1,56% (suportabilidade de 40 kA) e 0,67% (suportabilidade de 65 kA). Com relação aos para-raios de 10 kA o risco de falha foi 0,5%.

O aumento no risco, observado ao se utilizar um para-raios de 5 kA é compensado pelo custo associado ao investimento na compra dos para-raios, assim como no grande número de substituição de para-raios de 10 kA retirados do sistema por operação do desligador automático, mas ainda em boas condições operacionais.

Além disso, esse risco é significativo apenas para correntes de descarga elevadas, em torno de 40 kA. Para valores menores de corrente, a degradação do para-raios ocorre de maneira contínua, levando à atuação do desligador antes da sua falha completa. Valores superiores de corrente de descarga encontram-se na região de alta corrente do para-raios, não havendo garantia de que os valores de tensão residual sejam adequados ao NBI do transformador. Dessa forma, em alguns casos, a destruição do para-raios frente a ocorrência de uma descarga de corrente elevada poderia vir a ser uma situação preferencial, evitando que o transformador seja submetido a tensões residuais muito elevadas.

Estes resultados são indicativos da suportabilidade do projeto que está sendo desenvolvido e, portanto, garante a viabilidade da instalação de para-raios de 5 kA no sistema de distribuição do Brasil.

## **6.2 - Trabalhos futuros**

Complementarmente ao desenvolvimento deste trabalho surge a necessidade de uma avaliação relacionada à suportabilidade e envelhecimento dos para-raios de óxido metálico sem centelhadores. Com isso, seriam verificadas metodologias existentes para avaliação do desempenho e envelhecimento dos varistores a óxido metálico considerando a sua capacidade de absorção de energia, confrontando-as com resultados experimentais.

Outra necessidade seria o acompanhamento dos protótipos verificando seu desempenho após a instalação no sistema de distribuição.

# 7

## Referências bibliográficas

- [1] HINRICHSEN, V, *Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals*, 1<sup>st</sup> Edition. Siemens – Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.
- [2] SAKSHAUG, E. C.: “*A Brief History of AC Surge Arresters*”. IEEE Power Engineering Review, August, 1991.
- [3] FRANCO, J. L. Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, São Paulo, 174., 2001.
- [4] COSTA, E. G.: “*Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco*”. Tese de Doutorado, COPELE/UFPB, Campina Grande, Abril, 1999.
- [5] ABB Switchgear: “*Physical properties of zinc oxide varistors*”. ABB Power Technology Products AB, 2001.
- [6] WANDERLEY NETO, E. T., “*Monitoramento e Diagnóstico de Pára-Raios a ZnO através de Redes Neurais Artificiais*”. Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Agosto, 2007.
- [7] GUPTA, T. K.: “*Application of zinc oxide varistors*”. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, N° 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [8] MARTINEZ, M. L. B., “*Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico – Considerações Teóricas e Métodos de Avaliação*”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

- [9] CARLSON, W. G.; GUPTA, T. K; SWEETANA, A.: “*A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters*”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, N° 2, pp. 67-73, April 1986.
- [10] LAT, M. V.: “*Thermal properties of metal oxide surge arresters*”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, N° 7, pp. 2194-2202, July 1983.
- [11] Lahti K., “*Effects of Internal Moisture on the Durability and Electrical Behaviour of Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters*”, PhD Thesis Publication 437, Tampere University of Technology, Finland, 2003.
- [12] IEC 60099-4 – “*Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*”. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.
- [13] Salles, C. “*Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta Duração*”, Qualificação de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Fevereiro, 2011.
- [14] ANSI Std. C62-11 – IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Ac Power Circuits (>1kV). Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA, 1999.
- [15] Projeto de norma da ABNT 03037.07-002 – “*Para-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada – Método de Ensaio*”.
- [16] NBR 6936, “*Técnicas de Ensaio em Alta Tensão*”, Procedimentos.
- [17] JÚNIOR, R. G. de O., JÚNIOR, I.G.C., da Cruz, S.H.A., “*Gerador de Impulso de Corrente*”, Trabalho de Diploma, UNIFEI, Dezembro, 2005
- [18] TOMINAGA, S., “*Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters*”; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; IEEE – F79-637-07 – SUMMER MEETING, 1979.

## **ANEXO I**

## - ENSAIOS REALIZADOS NOS VARISTORES -

No anexo I estão apresentados os valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga resultantes dos ensaios realizados nos varistores.

### Tensão de tensão de referência e potência dissipada

Tabela AI. 1 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo A1.

A2	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	3,34	2,00	3,41	4,28	249	2	272	24	296	75
80°C	3,25	2,07	3,34	4,42	293	104	339	211	394	375
Curta	3,31	1,99	3,40	4,27	250	8	273	36	301	97
Elevado	3,27	2,07	3,38	4,43	264	53	294	109	335	214
Longa	3,45	2,22	3,56	4,69	273	79	300	139	337	236

Tabela AI. 2 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo A2.

A2	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	4,71	2,76	4,80	5,93	259	11	282	35	309	109
80°C	4,53	2,90	4,65	6,19	308	167	333	241	377	407
Curta	4,65	2,67	4,77	5,66	261	13	286	60	315	151
Elevado	4,46	2,66	4,63	5,59	274	86	305	164	344	304
Longa	4,76	2,80	4,94	5,91	278	101	305	177	341	312

Tabela AI. 3 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo A3.

A3	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	5,13	3,22	5,27	6,85	271	96	301	188	339	340
80°C	5,83	4,09	6,14	9,03	343	486	384	686	449	1033
Curta	5,12	3,17	5,26	6,75	266	78	294	155	331	302
Elevado	4,95	3,23	5,15	6,90	284	163	317	271	360	452
Longa	5,35	3,47	5,53	7,23	276	142	306	247	346	428

Tabela Al. 4 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo B1.

B1	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	3,67	2,16	3,75	4,68	271	4	294	49	318	110
80°C	3,58	2,18	3,69	4,74	341	93	367	147	389	210
Curta	3,67	2,19	3,77	4,63	264	11	288	44	319	110
Elevado	3,51	2,24	3,64	4,86	272	55	299	109	335	214
Longa	3,92	2,52	4,06	5,23	293	139	318	199	347	292

Tabela Al. 5 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo B2.

B2	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	6,46	3,97	6,61	8,52	276	12	298	65	325	186
80°C	6,30	3,89	6,50	8,63	331	146	360	253	396	410
Curta	6,41	3,84	6,60	8,21	277	34	301	98	331	235
Elevado	6,25	3,76	6,49	8,10	286	102	314	192	348	362
Longa	6,86	4,17	7,11	8,85	289	135	312	227	343	396

Tabela Al. 6 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo C1.

C1	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	3,42	2,10	3,48	4,34	198	33	213	51	231	90
80°C	3,69	2,47	3,80	5,12	274	188	297	251	331	362
Curta	3,45	2,11	3,53	4,40	196	38	216	64	238	118
Elevado	3,19	2,10	3,32	4,37	210	86	237	142	275	249
Longa	3,42	2,22	3,55	4,64	214	105	239	163	272	263

Tabela Al. 7 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo C2.

C2	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	6,91	4,15	7,02	8,51	200	26	219	66	237	146
80°C	8,64	5,67	8,85	11,81	267	355	289	489	321	734
Curta	6,72	3,97	6,90	8,07	210	96	231	168	256	310
Elevado	5,95	3,59	6,26	7,64	214	171	241	284	280	486
Longa	6,76	3,84	7,14	8,92	211	191	233	301	268	513

Tabela AI. 8 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo J2.

J2	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	5,19	2,97	5,29	6,26	228	-	245	-	267	38
80°C	5,11	3,24	5,23	6,57	267	77	289	141	318	246
Curta	5,25	3,02	5,35	6,30	230	-	250	-	272	62
Elevado	5,45	3,15	5,56	6,56	232	-	250	-	272	56
Longa	5,83	3,31	5,95	6,71	237	-	256	-	278	140

Tabela AI. 9 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo J3.

J3	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	3,55	2,10	3,63	4,44	226	-	246	-	267	42
80°C	3,48	2,24	3,58	4,67	283	84	306	134	338	227
Curta	3,60	2,16	3,68	4,55	235	-	255	-	281	83
Elevado	3,75	2,26	3,82	4,71	232	-	251	-	273	62
Longa	3,92	2,31	3,99	4,79	233	-	253	-	276	89

Tabela AI. 10 - Valores médios de tensão de referência, potência e corrente de fuga para o modelo K5.

K5	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência					
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	Potência [mW]	0,80 U1 [μA]	Potência [mW]	0,85 U1 [μA]	Potência [mW]
Novo	5,65	3,29	5,75	6,81	231	-	249	-	270	45
80°C	5,55	3,49	5,68	7,22	279	112	302	184	332	317
Curta	5,73	3,33	5,84	6,94	237	-	257	-	280	103
Elevado	5,67	3,48	5,82	7,20	231	-	250	-	272	83
Longa	6,19	3,51	6,29	7,09	236	-	256	-	279	112

## **ANEXO II**



Tabela All. 3 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga – fabricante 2 – 15 kV

	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
Etapa 1	19,05	10,89	19,45	22,89	274,86	298,82	325,48
Etapa 2	19,06	10,89	19,50	23,23	286,08	309,49	339,32
Etapa 3	-	-	-	-	-	-	-
Etapa 4	-	-	-	-	-	-	-

Tabela All. 4 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga – fabricante 2 – 24 kV

	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
Etapa 1	29,95	16,98	30,54	35,55	279,38	303,70	330,52
Etapa 2	29,88	17,03	30,55	35,71	287,76	311,78	339,14
Etapa 3	-	-	-	-	-	-	-
Etapa 4	-	-	-	-	-	-	-

Tabela All. 5 – Valores de tensão de referência, potência dissipada e corrente de fuga – fabricante 4 – 24 kV

	1 mA		2 mA		Corrente de fuga / Potência		
	Tensão U1 [kV]	Potência [W]	Tensão U2 [kV]	Potência [W]	0,75 U1 [μA]	0,80 U1 [μA]	0,85 U1 [μA]
Etapa 1	27,27	15,25	27,73	31,73	249,07	270,27	292,86
Etapa 2	27,51	15,60	27,99	31,67	250,91	271,07	292,77
Etapa 3	-	-	-	-	-	-	-
Etapa 4	-	-	-	-	-	-	-

## Tensão residual

Os valores não preenchidos nas Tabelas AII. 6 e AII.7 indicam que não foram calculadas as tensões residuais devido a limitações do gerador de impulsos.

Tabela AII. 6 – Valores médios das tensões residuais em kV para os fabricantes 1 e 2 – 15 kV.

<i>Corrente</i>	<i>Fabricante 1</i>	<i>Fabricante 2</i>
150 A	31,40	36,30
250 A	30,70	38,43
1,5 kA	32,72	38,36
3,0 kA	34,44	40,38
5,0 kA	36,43	42,52
10 kA	40,47	47,45
40 kA	54,15	-

Tabela AII. 7 – Valores médios das tensões residuais em kV para os fabricantes 1, 2 e 4 – 24 kV.

<i>Corrente</i>	<i>Fabricante 1</i>	<i>Fabricante 2</i>	<i>Fabricante 4</i>
150 A	46,40	55,50	48,30
250 A	47,00	56,16	49,70
1,5 kA	49,44	59,77	55,49
3,0 kA	51,79	62,60	58,56
5,0 kA	55,19	-	60,48
10 kA	-	-	-
40 kA	-	-	-