

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

Juliano Albino Pallaro

Proposta para Projeto de Para-raios de Distribuição em Média
Tensão.

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de
Potência**

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez

Itajubá, Junho de 2013

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

Juliano Albino Pallaro

Proposta para Projeto de Para-raios de Distribuição em Média Tensão.

Dissertação aprovada por banca examinadora em 27 de Junho de 2013, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Credson de Salles

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez
(Orientador)

Itajubá, Junho de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

P164p

Pallaro, Juliano Albino

Proposta para projeto de para-raios de distribuição em média
tensão / Juliano Albino Pallaro. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.
100 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Para-raios. 2. Supressor de surto. 3. Varistores. I. Martinez,
Manuel Luís Barreira, orient. II. Wanderley Neto, Estácio Tava_
res, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo; ou se faz uma coisa bem feita ou não se faz”.

Ayrton Senna

Agradecimentos

A Deus que me atendeu nos momentos mais difíceis da minha jornada para concluir esta nova etapa da minha vida profissional e pessoal. A Ele que foi os meus olhos nas noites em que partia de minha casa em Jundiaí e viajava para Itajubá quilômetros para assistir as aulas e aprender; A Ele que foi os meus sentidos nos momentos de cansaço em que após o retorno das aulas para casa e no dia seguinte acordava cedo para ir ao trabalho; A Ele que foi minha sabedoria que me iluminava nos meus momentos de escuridão. A minha gratidão eterna a Ele por fazer-me atravessar cada obstáculo sem questionar, reclamar ou até mesmo abandonar a tarefa de me tornar mestre em engenharia elétrica.

À minha amada esposa que não me abandonou e me compreendeu a cada noite fora de casa. À ela que me apoiou e me ergueu com palavras doces, quando o meu corpo e mente não agüentava mais o longo percurso e a jornada de aulas. Com certeza, sem ela, hoje eu não poderia ter a honra de ter concluído com satisfação cada etapa deste curso e trabalho. Por tudo que passou ao meu lado sem reclamar dos meus momentos de cansaço e loucura quando, em alguma matéria do curso, eu estudava sem parar para compreender e aplicar o conhecimento no meu dia a dia. O meu obrigado em especial e o meu amor eterno.

Aos meus pais, que representaram uma torcida em pensamentos a todos os momentos com sábias palavras, oferecendo conforto e segurança nesta jornada. A eles dedico este trabalho que, por terem deixado de lado muito de seus desejos pessoais para criarem seus 3 filhos e devido à classe social, acreditaram e ajudaram infinitas vezes com o apoio, amor e dedicação.

Quero agradecer em especial esta pessoa, profissional que cujo nome escreverei no final deste parágrafo, para que entendam a gratidão e quão está pessoa foi importante para este trabalho, para este título e para este profissional. Esta pessoa que acreditou em um garoto que, apesar de falar muito, queria mostrar a imensa vontade de aprender e se tornar um profissional de respeito e que fez o convite para fazer o curso de mestrado após ler pequenas anotações detalhadas do projeto que se tornaria um produto novo para um conceituada empresa do setor de energia elétrica. Esta pessoa que, com comportamentos

diferenciados, apresenta um coração que não se cabe no peito, quero expor a minha eterna gratidão e lealdade ao Professor Doutor Manuel Martinez.

Quero agradecer ao Professor Doutor Estácio Wanderley pela contribuição, apoio, confiança e ajuda para que tudo isso se tornasse possível.

A todos os professores que, durante os módulos, transmitiram-me os conhecimento e apoio úteis e necessários.

Agradeço à empresa PLP do Brasil que aprovou de forma inédita que um funcionário pudesse se ausentar 1 dia na semana para cursar matérias necessárias para cumprir a carga horária necessária exigida para o curso de mestrado. Às empresas Santana e Electrovidro que me apoiaram e ajudaram a adquirir mais conhecimento úteis para acrescentar neste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que, não foram citados aqui e que contribuíram, direta ou indiretamente, para concretização deste curso e dissertação.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de supressores de surto, conhecidos no mercado nacional como para-raios para média tensão, com o objetivo de avaliar seu correto funcionamento e abrir uma frente de estudos para se construir um produto eficiente a baixo custo. Para isto, serão utilizadas tecnologias em materiais, associados aos ensaios elétricos fundamentais para a avaliação dos componentes e do conjunto.

Com este trabalho, pretende-se direcionar o conhecimento contido aqui em para-raios para setores fundamentais das concessionárias e demais consumidores, que devem estar cientes dos princípios de operação do para-raios e com isso, adquirir um produto que possa efetivamente proteger os equipamentos e também auxiliar na proteção correta e eficaz das linhas de distribuição.

O trabalho demonstra também a importância em analisar o desempenho de um produto em sua natureza de aplicação, considerando as solicitações que definirão a proteção exata do sistema de distribuição de energia elétrica, após a observação de resultados insatisfatórios em para-raios de fabricantes nacionais. Para isto, conta-se com a experiência de uma parceria desenvolvida com a concessionária AES Sul, durante as solicitações de corrente levantada em campo e também a uma narração por parte das outras concessionárias de energia elétrica, na qual, contribuíram com os pontos positivos e negativo na utilização de para-raios nacionais ao longo de mais de 3 décadas.

Finalmente uma análise mais completa do varistor que é o principal componente deste produto, avaliando deste a forma física (visual) até a definição dos ensaios elétricos que são conclusivos na escolha do fabricante com uma quantidade de amostra reduzidas. O que agiliza e garante a utilização do varistor de novos fabricantes.

O resultado mostrado aqui, expõe que não se pode ter atenção exclusiva no varistor, pois, o produto não é composto somente dele, assim, é demonstrado os cuidados em cada etapa da construção de um para-raios. Outro ponto importante na execução deste trabalho foi a abertura para aplicar novas idéias de componentes que auxiliarão a eficiência e a segurança do produto. E desta forma abrir novas frentes de estudos que irá marcar os mais de 100 anos de existência deste produto.

Palavras Chaves: para-raios, varistores, resistores não lineares, supressor de surtos, isolador, invólucro, saias.

Abstract

This work presents a study about surge arrester for medium voltages, evaluating its correct operation, as though, opening a new front of studies that defines the details to build a capable product with low cost, using material technologies, associate with fundamental electrical test to the assessment of components and assemblage.

The know-how contained here about surge arrester is directed to power supply companies and general consumers, increasing their knowledge about the main function of the surge arrester and quality criteria that must be observed, so that it can actuate correctly to protect the equipments and also auxiliary in the right protection and performance of distribution networks.

It is possible to show the importance to analyze the performance of the product in your natural application, considering electrical solicitations that will define the exact protection of the distribution network. To aid with that, it is considered the experience accumulated with projects in partnership with AES Sul and also to reports from other Brazilian energy companies.

Finally, it is made, by means of electrical tests, an analysis of the varistor, the main component this product, evaluating since the physical form (visual) until the definition of electrical tests which are conclusive in the choice of manufacturer with a low quantity of samples. The results showed here expose that the analysis of the arrester performance depends not only on the varistor, requiring careful in each step of the construction of the surge arrester. Finally, new ideas of components are presented, enriching the quality of product that is already in the market for more than 100 years.

Keywords: surge arrester, lightning, varistor, non linear resistor, insulator, housing, sheds.

Sumário

1	Apresentação	16
1.1	Introdução.....	16
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivos.....	22
2	Aspectos Tecnológicos.....	23
2.1	Resistores não Lineares - Varistores.....	23
2.1.1	Características Físicas.....	23
2.1.2	Características Elétricas	24
2.1.3	Características Térmicas.....	27
2.1.4	Capacidade de Absorção de Energia.....	28
2.1.5	Degradação.....	29
2.1.6	Processo de Manufatura	30
2.2	Terminal de Contato	33
2.3	Disco de Alumínio.....	34
2.4	Fita de Vedação das Junções.....	34
2.5	Invólucro	35
2.6	Isolador Suporte	35
2.7	Desligador Automático.....	36
3	Requisitos de Projeto.....	38
3.1	Varistores	38
3.2	Construção dos Módulos do Para-raios.....	42
3.2.1	Montagem por Roving ou Fios de Fibra de Vidro.....	43
3.2.2	Montagem por Injeção de Plásticos	43
3.2.3	Módulos com Tubos Rígidos de Fibra de Vidro e Resina ÉPOXI	45
3.2.4	Sistema de Hastes ou Gaiola.....	46
3.3	Invólucro	47
3.3.1	Invólucros em Porcelana.....	48

3.3.2	Invólucros Poliméricos em Silicone.....	49
3.3.3	Invólucros em PEAD	51
4	Avaliação Tecnológica.....	53
4.1	Ensaio em Para-raios de Fabricantes Nacionais.....	53
4.2	Ensaio em Resistores Não Lineares.....	67
4.3	Ensaio nos Módulos de Resistores Não Lineares - Parte Ativa dos Para-raios..	76
5	Procedimentos e Recomendações para Projeto	84
5.1	Ensaio nos Varistores	84
5.1.1	Ensaio Não Elétrico	84
5.1.2	Ensaio Elétrico.....	84
5.1.3	Ensaio Elétrico Extras - Complementares	88
5.2	Ensaio no Módulo	90
5.3	Ensaio nos Materiais dos Invólucros.....	93
6	Resultados Gerais & Projeto Selecionado.....	94
6.1	Varistores	94
6.1.1	Invólucro do Módulo.....	94
6.1.2	Invólucro Externo	95
6.1.3	Terminal em Alumínio	95
6.1.4	Suporte Isolador.....	95
7	Comentários Finais.....	96
7.1	Conclusões.....	96
7.2	Trabalhos Futuros.....	97
8	Referências Bibliográficas	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo de para-raios desenvolvido em 1892	16
Figura 2 - Keystone Expulsion, modelo de para-raios de 1916.....	17
Figura 3 - Cristal Valve Arrester - para-raios de 1926.....	17
Figura 4 - Resistores não lineares a óxido de zinco (ZnO)	19
Figura 5 - Modelo de para-raios atuais a óxido metálico oferecidos ao mercado de distribuição...19	
Figura 6 - Para-raios para sistema de subestação polimérico com resistores à óxido metálico.....	20
Figura 7 - Representação do campo elétrico versus densidade de corrente, característico de sistemas varistores.....	24
Figura 8 - Circuito eletrônico mostrando um varistor aplicado à proteção de um equipamento eletrônico.	27
Figura 9 - Terminal em alumínio	33
Figura 10 - Suporte isolador do para-raios	36
Figura 11 - Desligador - estrutura interna.	37
Figura 12 - Varistor do fabricante	39
Figura 13 - Varistor do fabricante II	38
Figura 14 - Paralelismo nos varistores - faces de contato.	40
Figura 15 - Ângulo entre base e faces laterais dos varistores.	40
Figura 16 - Alinhamento vertical de um coluna de varistores.....	41
Figura 17 - Alinhamento horizontal - permitido com restrições.	41
Figura 18 - "Abaulamento" mínimo	42
Figura 19 - Roving - trama de fio de fibra de vidro impregnada em "Resina EPOXI"	43
Figura 20 - Alívio de material no módulo elemento varistor.....	45
Figura 21 - Montagem em estrutura tipo hastes ou gaiola.	47
Figura 22 - Para-raios com invólucro em porcelana.	49
Figura 23 - Para-raios vendidos no mercado brasileiro.	56
Figura 24 - Tensão Residual para Impulso de Corrente de 10 kA.....	62
Figura 25 - Tensão Residual para Impulso de Corrente de 250 A.....	62
Figura 26 - Oscilograma obtido durante falha da amostra A03.	64
Figura 27 - Evidência de falha da amostra A03.....	64
Figura 28 - Evidência de falha da amostra B02.....	64
Figura 29 - Oscilograma obtido durante falha da mostra C04.....	65

Figura 30 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C05.....	65
Figura 31 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C06.....	65
Figura 32 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C09.....	65
Figura 33 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C10.....	65
Figura 34 - Tensão Residual para Corrente de Descarga de 10 kA e Forma 8 x 20 μ s.....	72
Figura 35 - Tensão Residual para Corrente de Descarga com 150 A e Forma 2.000 μ s.....	72
Figura 36 - Varistor A1 - 03 - Falha 40 kA.....	74
Figura 37 - Varistor B1-05 - Falha 40 kA.....	74
Figura 38 - Varistor C2-02 - Falha 40 kA.....	74
Figura 39 - Varistor K5-05 - Falha 40 kA.....	74
Figura 40 - Varistor C2-01 - Falha 150 A.	74
Figura 41 - Varistor C2-04 - Falha 150 A.	74
Figura 42 - Varistor C2-05 - Falha 150 A.	74
Figura 43 - Varistor B1-01 - Falha 65 kA.....	75
Figura 44 - Varistor B1-02 - Falha 65 kA.....	75
Figura 45 - Varistor B1-03 - Falha 65 kA.....	75
Figura 46 - Varistor B2-02 - Falha 65 kA.....	75
Figura 47 - Varistor J2-02 - Falha 65 kA.	75
Figura 48 - Varistor J3-03 - Falha 65 kA.	75
Figura 49 - Módulo de 15 e 24 kV Construídos pelo Método de Roving - Montagem com Fio de Fibra de Vidro com Resina Epóxi.....	78
Figura 50 - Ensaio de Ciclo de Operação em Para-raios de 10 kA. Classe 1 de Descarga de Linha, 5 kA, 2,5 kA, e 1,5 kA.....	91
Figura 51 - Ensaio de Ciclo de Operação em Para-raios de 10 kA. Classes 2 e 3 de Descarga de Linha e 20 kA Classes 4 e 5 de Descarga de Linha.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência de Ensaios Realizados nos Para-raios de Fabricantes Nacionais.....	54
Tabela 2 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo A de Para-raios.....	57
Tabela 3 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo B de Para-raios.....	57
Tabela 4 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo C de Para-raios.....	58
Tabela 5 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo D de Para-raios.....	58
Tabela 6 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo A de Para-raios.....	59
Tabela 7 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo B de Para-raios.....	59
Tabela 8 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo C de Para-raios.....	60
Tabela 9 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo D de Para-raios.....	61
Tabela 10 - Valores de Tensão Residual para o Modelo A de Para-raios.	62
Tabela 11 - Valores de Tensão Residual para o Modelo B de Para-raios.	62
Tabela 12 - Valores de Tensão Residual para o Modelo C de Para-raios.	63
Tabela 13 - Valores de Tensão Residual para o Modelo D de Para-raios.	63
Tabela 14 - Número de Unidades que Falharam nos Ensaios.	64
Tabela 15 - Variação nos Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada.....	66
Tabela 16 - Valores de Tensão Residual para os Para-raios Ensaados.	66
Tabela 17 - Resultado dos Ensaios em Para-raios de Fabricação Nacional 24 kV.....	67
Tabela 18 - Sequência de ensaios realizados nos varistores.	68
Tabela 19 - Características dos Físicas e Nominais dos Varistores Ensaados.....	68
Tabela 20 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A1.	69
Tabela 21 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A2.	69

Tabela 22 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A3.	70
Tabela 23 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor B1.....	70
Tabela 24 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor B2.....	70
Tabela 25 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor C1.....	70
Tabela 26 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor C2.....	71
Tabela 27 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor J2.....	71
Tabela 28 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor J3.....	71
Tabela 29 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor K5.....	71
Tabela 30 - Resultados para os Variação da Tensão de Referência dos Varistores Analisados.	72
Tabela 31 - Valores Médios de Tensão Residual de Acordo com a Corrente Aplicada.	73
Tabela 32 - Falhas dos Varistores de Acordo com a Sequência de Aplicação dos Impulsos.	73
Tabela 33 - Resultados dos Ensaios por Grupo - Fabricante.	76
Tabela 34 - Sequência de Ensaios nos Conjuntos de Módulos.....	79
Tabela 35 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 1 - Conjunto 1 & 15 kV.....	79
Tabela 36 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 1 - Conjunto 1 & 24 kV.....	80
Tabela 37 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 2 - Conjunto 2 & 15 kV.....	80
Tabela 38 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 2 - Conjunto 2 & 24 kV.....	80
Tabela 39 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 4 - Conjunto 4 & 15 kV.....	80
Tabela 40 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 4 - Conjunto 4 & 24 kV.....	80
Tabela 41 - Medição de RIV - Condição Inicial e Final	81
Tabela 42 - Módulos de Para-raios de 15 kV	82
Tabela 43 - Módulos de Para-raios de 24 kV	82
Tabela 44 - Ensaios de Tipo Conforme IEC 60099-4	85
Tabela 45 - Sequência de Ensaios Elétricos utilizada em Laboratório.....	85
Tabela 46 - Ensaios Pertinentes aos Materiais - Invólucros em PEAD.....	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

SÍMBOLO	UNIDADE	SIGNIFICADO
SiC		Carboneto de Silício
ZnO		Óxido de Zinco
ANSI		American National Standard Institute
IEEE		Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC		International Electrotechnical Commission
NBR		Norma Brasileira
ABNT		Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE		Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
PEAD		Polietileno de Alta Densidade
Ur	kV	Tensão de ruptura
Ir	mA	Corrente de fuga
U	V	Diferença de potencial - tensão elétrica
K	Ω	Constante da resistência não linear
α		Coeficiente de não linearidade
Uc	kV	Tensão de operação contínua
ND		Não disponível
NR		Não realizado
MCOV	kV	Máxima tensão de operação contínua
SMC		Sheet Molding Compound
BMC		Bulk Molding Compound
NYLON		Poliamida
MOV		Varistor de Óxido Metálico
PRFV		Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
RIV		Tensão de Rádio Interferência

1 Apresentação

1.1 Introdução

Um dos primeiros supressores de surtos, comumente conhecido como para-raios, foi apresentado ao mundo pela companhia norte americana *ESSCo*, em 1892, como um produto para a proteção contra descargas atmosféricas para os sistemas elétricos [1].

Os primeiros para-raios foram desenvolvidos para sistemas de 50 volts a 3500 volts, e até 2000 ampères. Estas unidades possuíam dois centelhadores e uma bobina limitadora de corrente. Um dos centelhadores, o principal, é conectado em série com a bobina limitadora que, por sua vez, é conectada em paralelo com um segundo centelhador, o secundário, conforme mostrado na Figura 1.

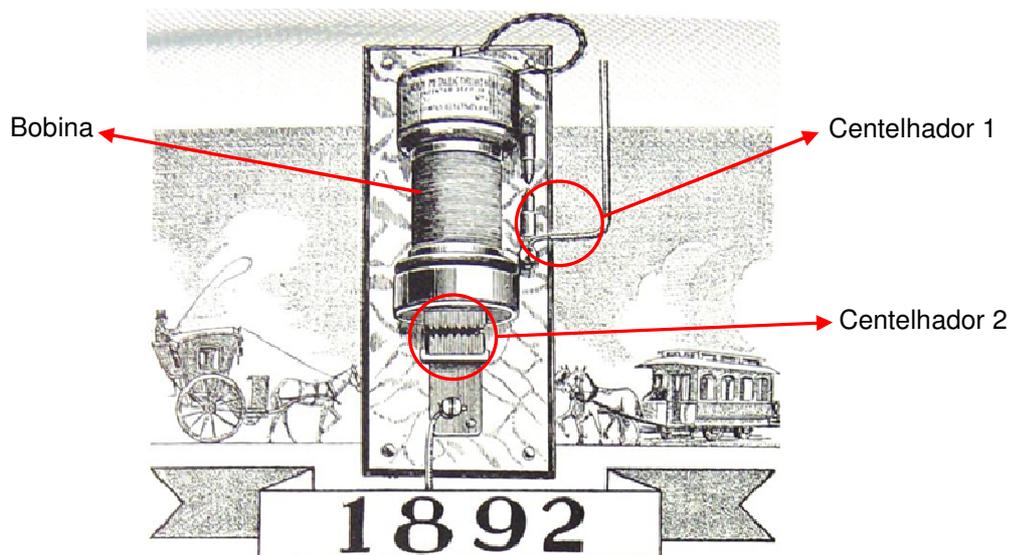


Figura 1 - Protótipo de para-raios desenvolvido em 1892 [1].

Em 1902 a 1909 os modelos fabricados e disponíveis no mercado possuíam componentes similares, mas com características elétricas melhoradas. Sendo, em 1906, desenvolvido uma unidade para classe de tensão de 20 kV [1].

Em 1916 a *ESSCo* coloca à disposição do mercado um novo para-raios com um moderno modelo de desligador utilizado para desconectar o para-raios das redes, evitando o desenvolvimento de faltas fase - terra, chamado "*Keystone Expulsion Type Arrester*" (Para-raios do Tipo Expulsão). Essas unidades possuíam um tubo com capacidade de expulsão conectada ao terminal aterrado. Quando de sua atuação, este tubo explodia, desconectando o para-raios do seu ponto de aterramento, durante o evento

da passagem de altas correntes provenientes de descargas atmosféricas, ou de elevadas correntes subsequentes. A Figura 2 mostra este dispositivo.

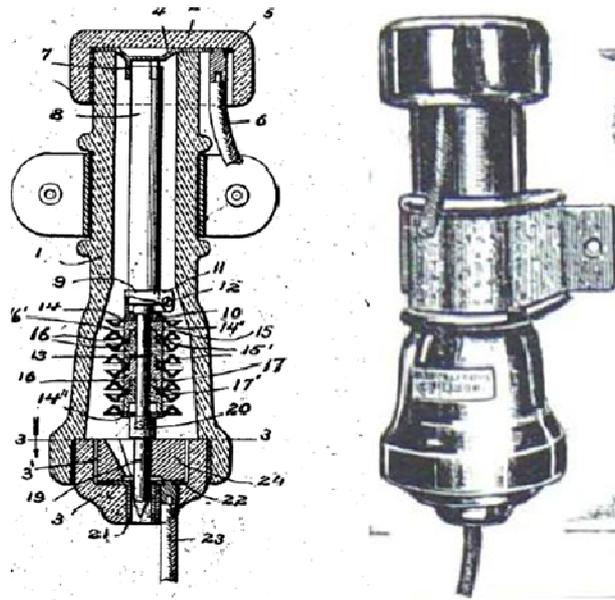


Figura 2 - Keystone Expulsion, modelo de para-raios de 1916 [1].

Em 1926 um novo tipo de para-raios surge, também desenvolvido pela *ESSCo*, utilizando os recursos dos recém descobertos cristais refratários do grupo do carbono. Os para-raios do tipo "*Crystal Valve Arrester Line*" (Para-raios Tipo Válvula), desenvolvido por John Robert McFarlin, um importante engenheiro da época, pode ser visto na Figura 3.

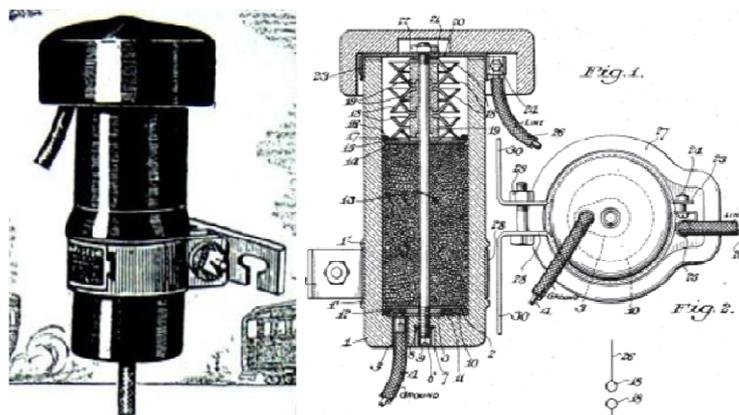


Figura 3 - Cristal Valve Arrester - para-raios de 1926 [1].

A patente do para-raios tipo válvula foi publicada em 1930. Deste modo, nasce o primeiro para-raios de carboneto de silício, SiC . Este novo projeto de para-raios foi inovador, com a adição de novos materiais substituindo-se componentes de seus antecessores, como, por exemplo, madeira e o indutor. Com isso, era possível o controle mais eficaz da magnitude da corrente que seguia às descargas de impulsos atmosféricos

além de, adicionalmente, melhorar o fator de potência do circuito formado pela fonte de tensão em frequência industrial, impedância equivalente no ponto de instalação e o para-raios o que, por sua vez, tem por resultado um melhor comportamento do processo de extinção de arco nos centelhadores em série com os componentes resistivos não linear.

Muitas das mudanças feitas tinham por principal objetivo melhorar a capacidade de descarga de correntes de impulso atmosférico por meio da redução dos níveis de proteção existentes em muitas dessas operações. Com a utilização de resistores a carboneto de silício, a amplitude da queda de tensão associada às correntes de descarga nas linhas de transmissão e distribuição diminuiu em cerca de 40%, portanto, um grande avanço tecnológico para época [1].

O próximo grande passo na evolução dos para-raios ocorreu em 1967, quando o *Doutor Michio Matsuoka* e equipe desenvolveram os resistores a óxido metálico, mostrados na Figura 4, com base em um material *Semicondutor Tipo N - "óxido de zinco"* (ZnO), na *Matsushita Eletric Co.* Inicialmente, os resistores a ZnO foram desenvolvidos para aplicação em sistemas eletrônicos [2].

Estes resistores não lineares podem ser considerados como elementos tipo válvula aperfeiçoados, pois são capazes de suportar tensões mais elevadas com a circulação de correntes de baixa intensidade, associadas com alta não linearidade, portanto, a princípio, permitindo a construção de unidades sem a necessidade de uso centelhadores [1].

A ausência de centelhadores, em tese é uma grande vantagem construtiva, uma vez que os centelhadores limitam a construção e subsequente aplicação dos para-raios quando de sistemas com tensões mais elevadas [1].

Dependendo do modo de construção, de modo complementar, incorre-se em problemas associados com elevados níveis de tensão de rádio interferência e degradação acelerada por problemas de vedação e penetração de umidade. Além disso, os resistores não lineares a óxido metálico possuem maior densidade o que resulta em maior capacidade térmica e de absorção de energia, o que permite a redução do volume dos para-raios assim construídos [1].

O primeiro para-raios construído com resistores a óxido de zinco (ZnO) foi disponibilizado ao mercado em 1976 [1].

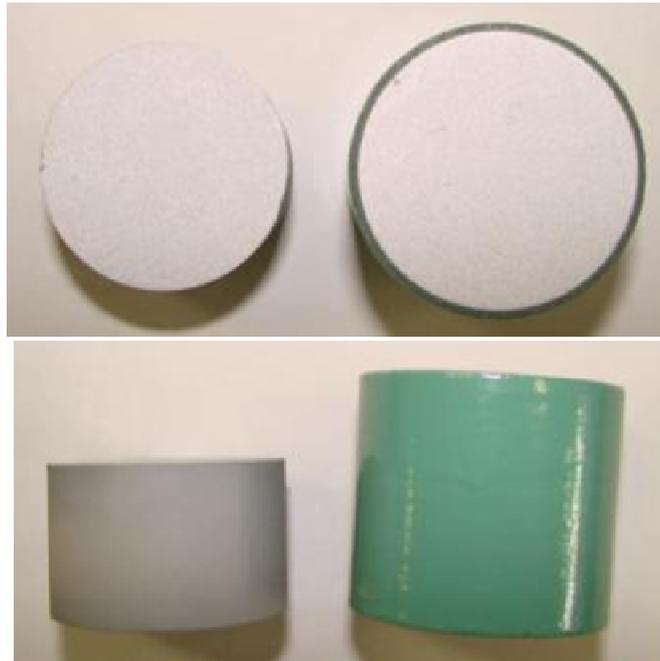


Figura 4 - Resistores não lineares a óxido de zinco (ZnO).

Os passos evolutivos seguintes se deram no sentido de aprimorar as características dos resistores não lineares a ZnO, como a utilização de aditivos na forma de outros óxidos, razão pela qual estes elementos são normalmente denominados genericamente de resistores a óxido metálico. Além disso, a estrutura externa destes tipos de para-raios sofreu significativas modificações [1].

Em 1987 o primeiro para-raios polimérico foi introduzido no mercado norte americano. A Figura 5 mostra a estrutura dos para-raios atuais disponíveis ao mercado para aplicação nas redes de distribuição de energia elétrica [1].

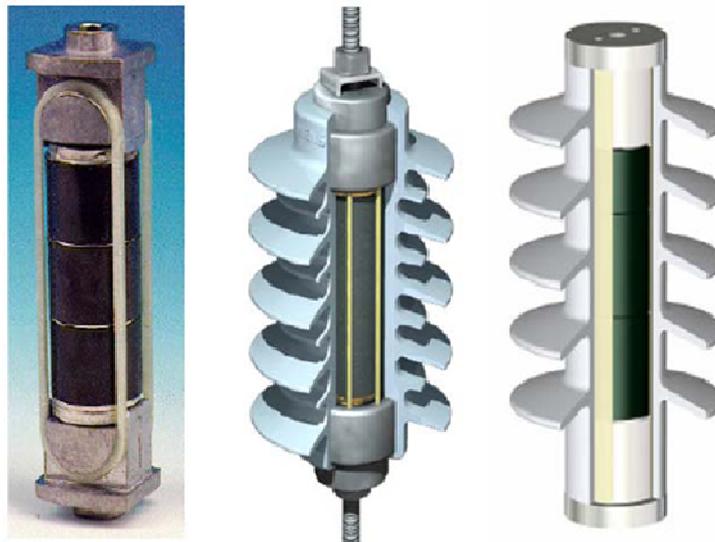


Figura 5 - Modelo de para-raios atuais a óxido metálico oferecidos ao mercado de distribuição [4].

A Figura 6 mostra dois exemplos de para-raios para sistemas de subestações de alta tensão.



Figura 6 - Para-raios para sistema de subestação polimérico com resistores à óxido metálico [4].

1.2 Motivação

Como visto, o produto - equipamento para-raios já soma mais de 100 anos de utilização e evolução. Desta forma, surge toda uma pesquisa voltada ao seu aperfeiçoamento, como o desenvolvimento de novos métodos de construção e manuseio, assim como a utilização de novos materiais para sua fabricação, melhorando a confiabilidade e desempenho das unidades.

Dentro deste contexto, fazem-se sempre necessárias novas modificações para que se possa atender as novas tendências de mercado, ambiente, segurança pessoal, das redes de distribuição, transmissão e valores econômicos.

No caso do cenário nacional, devido ao aumento da concorrência, principalmente proveniente do mercado externo - Índia e China, as empresas devem buscar melhorias em qualidade, matéria-prima, processos de fabricação e automação da área fabril para serem competitivas e com isso trazer mais confiabilidade e segurança aos consumidores do produto, no caso, indústrias e concessionárias de energia elétrica.

A força motriz para a realização deste estudo foi a conveniência e necessidade de analisar o mercado nas suas formas manufatura e consumo, associado à baixa eficiência observada em campo e ao longo dos processos de fabricação, pontos fundamentais para o bom desempenho do produto na proteção dos equipamentos elétricos instalados, especificamente nas linhas de distribuição de energia elétrica.

Como verificado, é comum observar fabricantes e comerciantes montando/comprando para-raios contendo materiais inadequados para a obtenção de um produto confiável. Nestes casos objetiva-se somente manter um certo nível de custo de manufatura e preço de venda. Chega-se ao ponto extremo de já terem sido encontrados para-raios de porcelana que continham em seu interior areia e papelão, um engodo aos consumidores em nome do lucro. Fatos como este prejudicam toda a indústria e comprometem a proteção necessária para dar segurança a todos que utilizam as linhas de distribuição e as concessionárias de energia elétrica que assim passam a ter o seu principal ativo, o transformador, submetido à elevados potenciais de risco.

Outra motivação associada a este trabalho relaciona-se com a utilização de novas tecnologias e métodos para a fabricação e seleção dos componentes utilizados na montagem dos para-raios.

O desenvolvimento e montagem de um para-raios envolve cuidados com relação a escolha do melhor resistor não linear, montagem, tipo de invólucro, terminais externos de conexão, matéria-prima para o invólucro, ensaios para definir melhor os componentes e também para a proteção do invólucro.

Com a ajuda de softwares específicos, de elementos finitos eletromagnéticos e mecânicos, é possível definir a melhor maneira para a fabricação destes tipos de para-raios, considerando a atenção e cuidados necessários para que se tenha uma produção uniforme e confiável.

Além disso, o processo de fabricação envolve também o desenvolvimento dos desligadores, acessórios integrantes dos para-raios, assim como as tecnologias em resistores não lineares e ensaios aplicados ao produto e seus componentes. Para isto, é usual, porém, não suficiente, seguir as orientações descritas nas normas, sendo as mais importantes a ANSI C62-11 [8] de origem Norte-americana e a IEC 60099-4 [7] de origem Europeia. No Brasil, está em processo de elaboração de uma norma NBR ABNT que além da experiência nacional em termos de para-raios, toma como principal referência a norma IEC60099-4, que de momento se encontra em revisão.

Nesta dissertação é possível acompanhar as fases de desenvolvimento do produto e a justificativa para cada etapa do projeto, gerando conhecimento necessário para a obtenção de um produto eficiente para um mercado que não para de crescer. Além disso, este documento também é útil para as concessionárias intensificarem e treinarem seus funcionários do setor de compra a serem capazes de entender a importância que este produto traz a concessionária e ao sistema elétrico.

1.3 Objetivos

Com base nos estudos dos resistores não lineares e nas falhas dos para-raios em campo a partir da intensidade de descargas em uma região específica, pretende-se, com este trabalho, direcionar as devidas necessidades de proteção contra surtos e desenvolver guias para um projeto de para-raios com base em novas técnicas de construção, qualidade, produção e de novos materiais para serem aplicados, por exemplo, nos invólucros, tal como o PEAD. Dessa forma, é objetivo apresentar os requisitos para a produção de um equipamento que seja eficiente e com o preço reduzido, mantendo a proteção das linhas de distribuição e a confiabilidade do sistema.

Sendo parte de um guia para projeto de desenvolvimento de um novo para-raios, esta dissertação apresenta os requisitos mínimos desejados, sugere modificações a serem implementadas nos projetos convencionais e métodos de avaliação e seleção de componentes.

Outros pontos levados em consideração são as deficiências de alguns componentes que compõem o conjunto do para-raios, como, por exemplo, o suporte de fixação e o desligador automático. Este último requerendo uma atenção especial, pois utiliza em sua construção um cartucho em pólvora, o que requer mais cuidado em seu manuseio e aplicação, além de possibilitar devido ao envelhecimento e projeto na atuação errática, desconectando unidades sãs do sistema elétrico.

2 Aspectos Tecnológicos

Este capítulo trata dos elementos que compõem os para-raios, em particular os componentes que são objetivos do projeto descrito:

- a. Resistores não lineares;
- b. Terminais de alumínio;
- c. Estrutura mecânica isolante para manter os blocos alinhados e sob pressão;
- d. Invólucro isolante do para-raios;
- e. Suporte isolante;
- f. Desligador automático.

2.1 Resistores Não Lineares - Varistores

2.1.1 Características Físicas

Os varistores são também conhecidos como resistores não lineares ou limitadores de tensão [3]. São corpos cerâmicos altamente densos, com características específicas que os tornam aptos para absorver e dissipar a energia associada aos surtos de tensão nas redes e sistemas elétricos. A sua característica mais importante é a relação "tensão x corrente", que define suas propriedades não lineares. Depois da não linearidade, a capacidade de absorção de energia, medida em J/cm^3 , é a segunda mais importante característica dos varistores. Outros parâmetros usados para caracterizar os varistores são a tensão de ruptura (U_r), corrente de fuga (I_f) e modos de envelhecimento ou degradação. Um varistor adequado ou ideal deve possuir um alto valor para o expoente de não linearidade, um valor de tensão residual compatível com a suportabilidade do isolamento a ser protegido, uma amplitude reduzida de corrente de fuga, uma longa expectativa de vida, bom grau de uniformidade, que se refletem em uma grande capacidade de absorção/dissipação de energia[3].

Considerando a sua origem, a principal função dos varistores é atuar como dispositivo de proteção dos equipamentos eletroeletrônicos, restringindo a amplitude de sobretensões transitórias, ou seja, limitando o valor da diferença de potencial em seus terminais quando ocorre um grande aumento na intensidade do campo elétrico aplicado (sobretensão) através da descarga de corrente[3].

Uma vez que são corpos policristalinos os varistores possuem alta concentração de defeitos estruturais, superficiais e eletrônicos (intrínsecos e extrínsecos, quando dopados). O tipo e quantidade destes defeitos estão diretamente relacionados com as diversas etapas de processamento empregado para a obtenção das peças. Portanto, estes sistemas têm como característica principal a presença de grãos, os quais estão interligados por uma interface responsável de forma determinante para as propriedades elétricas desejadas.[3]

2.1.2 Características Elétricas

A Figura 7 apresenta a curva característica de um varistor. Nessa figura, é possível identificar três regiões distintas com relação ao comportamento do campo elétrico aplicado em função da densidade de corrente escoada pela amostra. Nesta curva são obtidos os valores de campo elétrico de ruptura - "ThresholdVoltage" e o coeficiente de não linearidade[3].

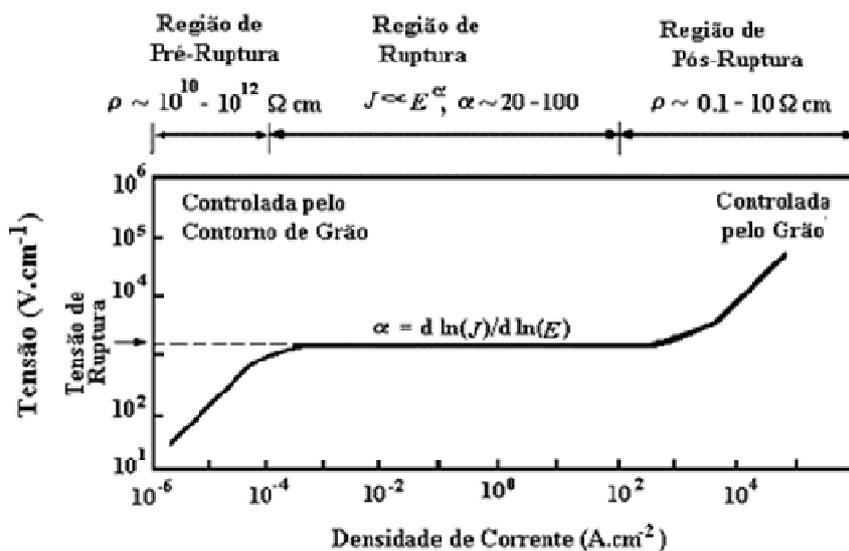


Figura 7 - Representação do campo elétrico versus densidade de corrente, característico de varistores[3].

Como se observa na Figura 7, os varistores caracterizam-se por apresentar uma resistência elétrica que diminui com o aumento do campo elétrico aplicado, ou seja, são materiais que não obedecem a Lei de Ohm na sua forma linear [3].

$$I = \left(\frac{U}{K} \right)^\alpha \quad (1)$$

Equação 1 - Relação tensão versus corrente simplificada para os varistores.

Na equação (1), U é o campo elétrico, I é a corrente (Densidade) que circula pelo circuito, K é uma constante usualmente denominada de resistência não ôhmica e α , o coeficiente de não linearidade. Quanto maior o valor de α , mais sensíveis são os varistores com respeito a pequenas mudanças no campo elétrico aplicado e, portanto, melhor é considerado o varistor [3].

A primeira região característica dos varistores é a região de pré-ruptura ou região linear para baixa corrente caracterizada por um comportamento aproximadamente linear, dependente da temperatura. Neste caso, as principais propriedades elétricas são determinadas pelas características dos contornos dos grãos [3].

A corrente total que circula pelos varistores, apresenta componentes resistivas e capacitivas, sendo esta última predominante para amplitudes de tensão (ou campo elétrico) próximas da tensão de ruptura. A componente resistiva é responsável pelas perdas Joule e, portanto, deve ser monitorada para que não comprometa a estabilidade térmica dos varistores e dos dispositivos construídos [3].

Os varistores de ZnO apresentam um coeficiente negativo de variação de resistência com a temperatura, ou seja, o aumento da temperatura causa um aumento da corrente que circula pela unidade. A componente resistiva da corrente tende a aumentar com o tempo, sob regime contínuo de tensão aplicada em frequência industrial ou abruptamente, após a descarga de surtos ou impulsos de corrente [3].

A segunda região, região de ruptura ou região de alta não linearidade que se inicia quando o campo elétrico aplicado ao varistor atinge um valor crítico, denominado de campo elétrico de ruptura ou ainda tensão de referência. Para valores de tensão superiores ao nível de ruptura, a corrente de condução se eleva drasticamente devido à acentuada não-linearidade dos varistores. Nesta região um grande aumento de corrente implica em uma pequena variação de tensão, fenômeno que por sua vez independe da temperatura. Esta é considerada a região mais importante da característica não linear, pois está relacionada à capacidade de proteção dos varistores e, por conseguinte dos para-raios [3].

Como a tensão de ruptura - tensão de referência está associada ao tamanho de grão e homogeneidade das fases intergranulares. Para o correto funcionamento dos varistores é importante que todos os caminhos de corrente apresentem um mesmo número de barreiras, pois, caso contrário, a queda de tensão de um caminho para outro pode ser diferentes acarretando em uma distribuição não uniforme de corrente. O valor de α , também está relacionado à contribuição de cada contorno de grão eletricamente ativo e pode ser alterado de duas maneiras: modificando o número de contornos de grãos e/ou controlando sua natureza físico-química [3].

Nesta região, os aspectos de interesse a serem destacados são:

- Elevado coeficiente de não-linearidade;
- Corrente predominantemente resistiva;
- Dependência não significativa da corrente com a temperatura.

A terceira região, região de pós-ruptura ou região linear de alta corrente, é caracterizada pela descarga de correntes de amplitude elevada, maiores que 1 A/mm². Apresenta uma elevação drástica da tensão e a relação entre a tensão e a corrente volta a ser linear. Inicia-se com a predominância da resistência dos grãos de ZnO sobre a resistência da camada intergranular e, deste modo o comportamento dos varistores passa a ser definido pela resistividade intrínseca dos grãos da matriz de ZnO nova e ligeiramente dependente da temperatura [3].

A região de alta corrente é caracterizada por uma diminuição da não linearidade associada à queda de tensão através da resistência própria (finita) dos grãos de ZnO. O coeficiente de não linearidade α da terceira região é inferior ao da região não linear, tendendo, no extremo, à linearidade. Isto se deve à queda de tensão e à predominância da resistência nos grãos de ZnO. Para que os varistores - para-raios atuem satisfatoriamente, esta região não deve ser alcançada, pois não se garante os limites de tensão residual necessários para a proteção do isolamento dos equipamentos instalados nas redes [3].

Um circuito elétrico simples, que representa a aplicação deste tipo de cerâmica não linear como dispositivo eletrônico, é ilustrado na Figura 8, onde se observa o varistor em paralelo como sistema de alimentação de energia e o equipamento. O mesmo circuito pode ser construído quando do estudo da aplicação de um para-raios às redes de transmissão - distribuição de energia onde a fonte é modelada pelo "*Equivalent de Thevenin*" da rede no ponto [3].

Quando de amplitudes de tensão superiores ao nível de proteção das unidades e inferiores à máxima suportabilidade do equipamento protegido, o varistor - para-raios é acionado, de modo que um surto de corrente associado é descarregado na direção do sistema de conexão ao terra. Deste modo, a atuação dos varistores - para-raios evitam que o isolamento entre fase e terra do equipamento protegido seja exposto à níveis de sobretensão potencialmente perigosos à sua integridade[3].

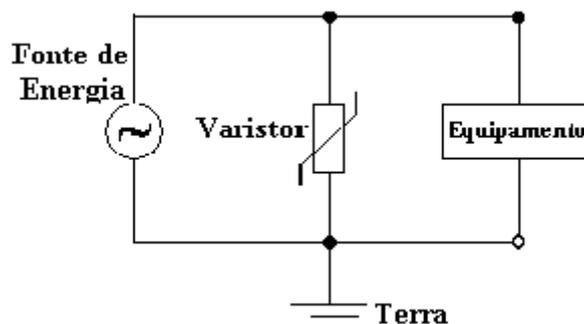


Figura 8 - Circuito eletrônico mostrando um varistor aplicado à proteção de um equipamento eletrônico[3].

2.1.3 Características Térmicas

Os varistores a óxido metálicos utilizados nos para-raios sem centelhadores são os elementos responsáveis pelo controle da corrente de fuga e, portanto, devido principalmente a sua natureza semicondutora é necessário que exista o equilíbrio entre o consumo e a dissipação de potência. Assim, se faz necessário conhecer e determinar as características térmicas da associação formada pelos varistores, invólucro e meio ambiente, fatores responsáveis pelo comportamento térmico dos para-raios.

Na operação dos para-raios sob tensão em frequência industrial a temperatura dos varistores a óxido metálico pode variar em função da absorção prévia de surtos atmosféricos ou de manobra. Deste modo, é usual representar a relação existente entre os valores de pico da tensão aplicada e da componente resistiva da corrente de fuga na forma de um conjunto de características que venha a explicitar a relação entre a potência consumida com a temperatura de operação, para vários valores de tensão aplicada, em p.u, do valor da tensão de referência ou da tensão de operação contínua, U_c [4].

A influência da temperatura é fácil de ser entendida, pois, de acordo com a teoria básica de semicondutores, a elevação da temperatura causa o aumento do número de portadores de carga intrínsecos, através do aumento da atividade térmica e da subsequente formação de pares elétron-lacuna[5].

2.1.4 Capacidade de Absorção de Energia

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

A capacidade de absorção de energia intrínseca é relacionada com a energia imposta pela descarga de um único impulso de corrente “*Single impulse energy absorption capability*”, com duração de poucos micro ou milissegundos que, por sua vez, não pode exceder um valor limite para o qual os resistores não-lineares podem sofrer uma severa solicitação termo-mecânica. Desta forma, solicitações com elevadas densidades de corrente e de energia podem acarretar uma variação súbita de temperatura em regiões dos resistores não-lineares, associados com severos esforços de tração e de compressão atuando de forma interna a esses elementos. Estas solicitações podem provocar fraturas, perfuração ou falha da isolação dos resistores não-lineares.

A capacidade de absorção térmica de energia “*Thermal energy absorption capability*” está associada com a capacidade de um determinado projeto de para-raios de absorver uma máxima quantidade de energia. É determinada para uma dada forma e amplitude de corrente, e ser capaz de dissipar 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 MCOV), e está associada a um impulso de corrente com forma e amplitude de corrente definidas [4].

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 dependência com as características da corrente de descarga .

Além de suportarem as energias provenientes das sobretensões temporárias, os para-raios a óxido metálico devem ser capazes de absorver as energias provenientes das sobretensões transitórias que ocorrem nos sistemas, causadas por [4]:

- Energização ou religamento de linhas longas;
- Abertura de bancos de capacitores ou cabos, através de disjuntores que permitam o reacendimento (“*restrike*”);

- Descargas atmosféricas diretas sobre os condutores fase das redes aéreas de distribuição;
- Descargas sobre as estruturas ou sobre os cabos para-raios de linhas e redes, provocando descargas disruptivas de retorno "*back flashover*" nos isoladores;
- Descargas sobre as estruturas próximas às redes, linhas e subestações.

Para uma especificação adequada dos para-raios, ou em casos de sistemas mais críticos, estudos específicos envolvendo simulações computacionais devem ser realizados, de modo a obter valores para as máximas energias a serem absorvidas pelos para-raios. A partir desses estudos, é definida a capacidade mínima de absorção de energia dos para-raios, que deve ser maior do que as energias máximas obtidas nos estudos.

2.1.5 Degradação [3]

A degradação dos varistores - para-raios normalmente se encontra associada à aumentos cíclicos da corrente de fuga inicial quando:

- Ocorre aumento da potência dissipada após a aplicação de impulsos de corrente com elevada amplitude ou de longa duração;
- Ocorre o aumento da potência dissipada com envelhecimento o para-raios é continuamente solicitado por tensões em frequência industrial.

O fenômeno da degradação é explicado pela migração de íons na região de contorno, conforme seguem:

- a) A degradação é um fenômeno dos contornos dos grãos;
- b) A degradação é resultante da migração de íons na camada de depleção;
- c) O íon que se desloca é predominantemente o zinco intersticial.

Quando o varistor é submetido a impulsos elevados de corrente, a degradação acarreta a destruição física dos varistores, por fratura ou por perfuração. A destruição por fratura é atribuída à expansão térmica diferencial gerada por gradientes de temperatura resultantes dos impulsos de corrente com elevada amplitude. A expansão térmica diferencial no bloco cerâmico ocasiona a falha mecânica em pontos frágeis, como por exemplo, poros não eliminados na sinterização.

A destruição por perfuração ocorre devido à concentração de corrente ao longo da secção do varistor, ou seja, surgimento de canais preferenciais de condução durante a

atuação. Como visto, a região de alta corrente a resistividade do varistor é dependente da temperatura e o aumento simultâneo de temperatura e corrente podem ocasionar uma avalanche térmica e provocar fusão localizada.

Também se pode observar o desenvolvimento de falhas associadas com o balanço de energia gerada e dissipada pelo varistor após a aplicação de um impulso de corrente, ou seja, se a energia absorvida pelo varistor para uma determinada temperatura de operação for maior do que a sua capacidade de dissipação pode ocorrer o fenômeno de instabilidade térmica. Assim, aumentos de temperatura no varistor acarretam aumentos subsequentes de corrente de fuga que podem resultar em um desbalanço positivo entre a energia consumida - gerada e a capacidade de dissipação da unidade, iniciando um processo cíclico retroalimentado, devido ao coeficiente negativo de temperatura na região de baixa corrente, que, por fim, resulta em instabilidade térmica e subsequente falha do varistor - para-raios.

Por fim, a aplicação contínua de tensão sobre os varistores e o comportamento quanto ao balanço entre energia consumida - gerada e a capacidade de dissipação da unidade pode resultar no desenvolvimento de falhas. Novamente pode ocorrer um processo de instabilidade como o descrito anteriormente devido a ausência de equilíbrio entre a energia consumida - gerada e a dissipada.

Para avaliar o desempenho dos varistores quanto à vida útil e degradação vários ensaios elétricos são propostos nas normas técnicas com o intuito de simular condições de degradação a que o varistor está sujeito em condições de operação. Apesar de os diferentes tipos de degradação dos varistores serem apresentados separadamente, na prática ocorre uma ação conjunta destes fenômenos.

Mais a frente são mencionados no item 5.1.3 uma série de ensaios não normalizados úteis no processo de seleção de varistores. Esta série de ensaios, simplificada em relação aos requisitos da IEC 60099-4 [7], pode inclusive ser considerada para um ensaio de recebimento de baixo custo por parte do comprador.

2.1.6 Processo de Manufatura

Mistura e formação do corpo verde

Os resistores a óxido metálico são obtidos a partir de uma mistura de uma série de óxidos de materiais metálicos. O principal elemento constituinte desta mistura é o óxido

de zinco, na proporção, em peso, de 90% a 97%. Os restantes 10% a 3% da mistura, são constituídos por óxidos de outros metais, tais como, bismuto, antimônio, manganês, cobalto, cromo e alumínio, em pequena proporção percentual, a exemplo do bismuto e do manganês, ou mesmo traços, em partes por milhão, a exemplo do alumínio. Estes óxidos são encontrados na forma de pó, com granulometria uniforme, porém, em alguns casos, não adequada ao processamento direto, fato que implica, principalmente, com respeito ao óxido de zinco, na necessidade de um tratamento térmico prévio para controle do crescimento dos grãos [5].

Os óxidos de bismuto e antimônio são os elementos mais importantes desta mistura visto que, a fase líquida dos mesmos, durante o processo de sinterização é responsável pela formação das barreiras físicas e elétricas entre os grãos adjacentes de óxido de zinco, responsável pelas propriedades elétricas destes resistores.

O processo de manufatura dos resistores a óxido metálico é bastante elaborado, dotado de uma série de etapas que se inicia com o tratamento térmico de algumas de suas matérias primas. Após a adequação das matérias primas, é processada uma pré-mistura, sinterizada em uma faixa de temperatura entre 700° C e 900° C, para que ocorra uma primeira difusão dos óxidos dentro da matriz formada pelos grãos de óxido de zinco. A pré-mistura assim formada e complementada, sofrendo um processo de mistura, moagem, via úmida, secagem e adição de plastificantes, idealmente com o auxílio de um ciclone ou atomizador, "spray drier system", que além de processar diretamente as duas últimas etapas, evita os resultados indesejáveis do fenômeno de decantação que se manifesta devido à diferença de densidade entre os óxidos que constituem a mistura. O pó, assim obtido, e prensado, na forma cilíndrica, idealmente, com o auxílio da técnica de dupla ação, por exemplo, utilizando-se uma prensa, equipada com mesa flutuante, a pressões da ordem de 3.5 kgf/cm² a 21.0 kgf/cm².

Sinterização

Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinados materiais, inicialmente em contato mútuo, adquira principalmente resistência mecânica. Este processo é utilizado para se fabricar peças metálicas, cerâmicas e compósitos metal-cerâmica, sendo parte integrante e principal de técnicas denominadas "*Metalurgia do pó e cerâmica*". Sua força motora é o decréscimo da energia superficial livre do conjunto de partículas, obtido pela diminuição da superfície total do sistema. Via de regra, isto traz como consequência a

eliminação do espaço vazio existente entre as partículas - poros, resultando em um corpo rígido e completa ou parcialmente denso e, deste modo, é conferida à massa de pó aglomerada as propriedades físicas e mecânicas desejadas [3].

Em resumo, a sinterização pode ser definida como um processo físico - químico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinados materiais, inicialmente em contato mútuo, adquiram resistência mecânica e outras propriedades específicas de interesse na manufatura. Durante a sinterização, a porosidade da estrutura é fechada. Para isto, o material deve ser deslocado para preencher os espaços vazios, a maneira que ocorre este processo identifica os mecanismos para acelerar a sinterização que são: A sinterização por fase sólida, fase líquida e viscosa. A sinterização em forno resistivo, de longe, amais empregada na rotina industrial e de pesquisa em laboratório é a sinterização com auxílio de pressão e a sinterização reativa [3].

No caso dos varistores, o usual é adotar uma técnica assistida por fase líquida que pode ser definida como sendo um processo que envolve a coexistência de uma fase líquida e de partículas sólidas durante uma determinada etapa do ciclo térmico de sinterização. A fase líquida pode ser formada pela fusão de um aditivo ou pela formação de um líquido eutético obtido pela reação química entre os aditivos do sistema.

Metalização [3]

A metalização das superfícies superior e inferior do varistor é usualmente feita com alumínio por aspensão térmica ("*Wire flame spray*"). O processo de aspensão utiliza como fonte de calor uma chama oxiacetilênica e um arame como metal base utilizado na deposição. Este, ao passar através da chama, é fundido e atomizado por um jato de ar comprimido que tem por função complementar projetar as partículas metálicas sobre a superfície do varistor sem que a temperatura superficial seja significativamente elevada.

A espessura do eletrodo depositado é da ordem de micrometros de modo a evitar que a diferença entre os coeficientes de dilatação do eletrodo e cerâmica comprometam a adesão. A composição química do arame depende das propriedades esperadas do material depositado como, por exemplo, resistência à abrasão, resistência ao desgaste ou resistência ao calor. No caso do varistor busca-se uma boa condutividade elétrica.

Colar Isolante

O colar, aplicado sobre a lateral do varistor, pode ser composto por uma camada de material vidrado, tanto para proteção, como atuando como um impermeabilizante frente a umidade e ao fluxo de oxigênio, bem como para melhorar as características dielétricas frente a impulsos de corrente elevada dos varistores [3].

2.2 Terminal de Contato

Os terminais de contato são construídos em alumínio injetado, usinado ou sinterizado e suas principais finalidades estão descritas abaixo:

- Permitir o contato entre os varistores e os cabos para conexão em campo;
- Alinhar e garantir a compressão de contato entre os varistores;
- Facilitar a ancoragem do invólucro de modo a manter o sistema de varistores sob compressão e evitar que, em uma eventual falha explosiva devido ao colapso dielétrico ou aquecimento por absorção de energia, haja o lançamento de estilhaços e partes dos varistores que possam causar danos;
- Auxiliar na montagem do módulo e da injeção do material dos invólucros;
- Auxiliar na vedação.

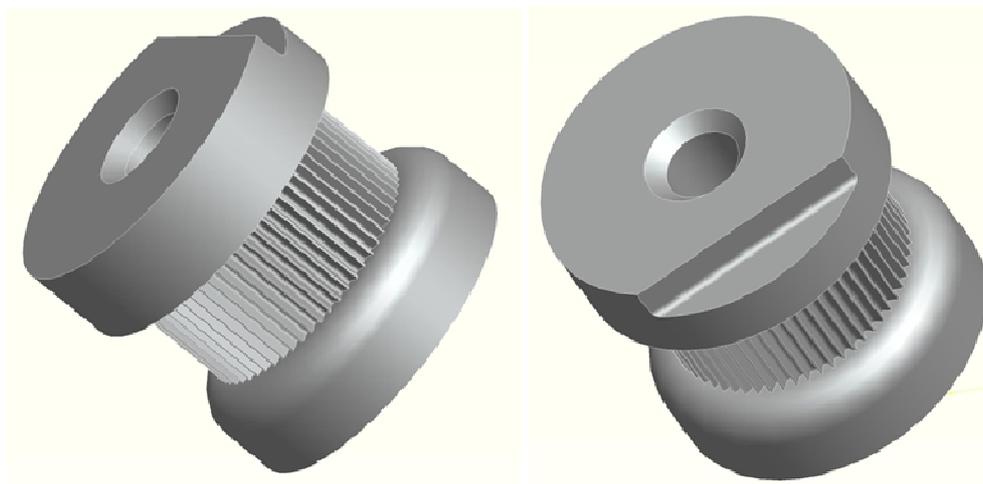


Figura 9 - Terminal em alumínio

O terminal deve possuir a face a ser utilizada para conexão com o varistor com paralelismo com tolerâncias bem severas, próximo entre 1 a 5 centésimo de milímetro. Isto é necessário para garantir a perfeita junção do terminal e o varistor, já que este último

possui uma camada de metalização adequada para conexões sem a utilização de discos de alumínio ou outro material para corrigir as imperfeições do varistor ou do terminal.

2.3 Disco de Alumínio

A utilização dos discos de alumínio nas junções da associação de varistores se faz necessária para melhorar a área de contato elétrico. Estes discos evitam, caso necessário, os efeitos da irregularidade das faces de contato dos varistores ou a pobre aplicação do alumínio pelo processo de metalização das faces do varistor.

Devem possuir uma boa condutividade elétrica e serem maleáveis. A boa condutividade elétrica evita a existência de resistência elétrica nas junções da associação dos varistores, dificultando assim o aquecimento localizado. A maleabilidade, assim como o formato da superfície, é importante para ajudar no contato elétrico entre os varistores. No momento que a força de compressão é aplicada no processo de montagem, os discos se moldam às superfícies dos varistores, suprimindo qualquer deficiência do paralelismo entre suas faces.

Com o avanço da tecnologia do processo de metalização e também a diminuição do seu custo, os fabricantes aperfeiçoaram e garantem o paralelismo das faces dos varistores com uma camada suficiente para que não seja necessária a utilização destes discos de interface em alumínio.

Motivos para se evitar a utilização dos discos de alumínio são o custo e a possibilidade de se prejudicar o desempenho final do produto. Isto porque, ao exercer a força de compressão, os discos podem ser esmagados e o material (alumínio) tende a escoar pelas laterais. Ocorrendo isso, pode haver formação de pontas, favorecendo a ocorrência de descargas parciais e completas, levando o sistema a falha por curto-circuito subsequente às descargas.

2.4 Fita de Vedação das Junções

A fabricação de para-raios de diferentes classes de tensão é feita a partir do empilhamento de uma quantidade adequada de varistores. Neste processo de empilhamento surgem lacunas entre os varistores, assim, como entre os varistores e terminais. Dessa forma, é preciso proteger estas lacunas para que seja evitada a mínima penetração de materiais isolantes nessas regiões, durante o processo de aplicação dos materiais da estrutura para suporte mecânico e do invólucro. Assim, a aplicação desta fita

tem por função ajudar na isolação elétrica das lacunas, pois, durante o processo de descarga de correntes de alta intensidade, pode-se incorrerem centelhamento entre junções, levando o para-raios a falha por curto-circuito.

2.5 Invólucro

O invólucro compõe o revestimento externo da coluna de varistores. Seu material deve ser isolante e resistir a esforços mecânicos, tais como, a compressão exercida na associação dos varistores para manter o alinhamento e o contato elétrico entre os componentes.

Assim, caso haja uma expansão dos varistores por causa de um alto aquecimento, evita-se que o conjunto venha a falhar de forma explosiva. Neste caso, reduz-se a probabilidade de haver lançamento violento de fragmentos dos materiais que compõem os para-raios.

O material do invólucro deve ainda auxiliar no processo de isolação dos varistores, evitando assim a possibilidade da passagem de uma corrente pela superfície lateral da coluna ativa do para-raios, evitando o desenvolvimento de arco de potência e subsequente curto-circuito da unidade.

A forma do invólucro com projeções denominadas saias tem a função de fornecer maior resistência efetiva ao trilhamento elétrico, auxiliando na isolação externa através do aumento da distância de escoamento, evitando a formação de "*flashover*" sob condições adversas, como poluição e chuva, protegendo a unidade quando de sua aplicação em ambientes agressivos/contaminados.

Esta parte dos para-raios tem a mesma função da área externa de um isolador, portanto, segue os mesmos princípios construtivos, pois é importante considerar que quando o para-raios não é solicitado, é necessário que venha atuar como um isolador.

Os tipos de materiais e processos para criar este invólucro são vários e comentados mais a frente neste trabalho.

2.6 Isolador Suporte

O isolador suporte tem a finalidade de sustentar o para-raios na posição vertical possibilitando sua instalação em campo. Ao instalar um para-raios em uma cruzeta ou na carcaça do transformador, o suporte deve, dependendo de sua posição no invólucro, ser isolante, evitando o escoamento da corrente de fuga do para-raios para o ponto aterrado

e a ocorrência de "*flashover*" para a cruzeta ou carcaça. O suporte também deve atender a valores específicos de suportabilidade dielétrica, função da classe de tensão da unidade, entre o centro dos seus dois pontos de conexão. Por isso, no projeto destes isoladores, há a necessidade de atender uma distância de escoamento mínima garantida pela coordenação de isolamento.

O isolador suporte, no caso, polimérico, também precisa ter uma resistência à força de tração vertical de aproximadamente 100 kgf [7]. Isso porque quando se realizam ensaios elétricos que resultam em forças de impacto, este deve suportar e garantir que o para-raios não venha a ser deslocado de sua posição de instalação, ocasionando outros problemas às redes elétricas. A Figura 10 mostra o projeto de um suporte de forma a garantir a distância de escoamento e a distância entre fase e terra.



Figura 10 - Suporte isolador do para-raios

2.7 Desligador Automático.

O desligador automático tem a finalidade de proteger o sistema, desconectando das redes os para-raios que se encontram em modo de falha por curto-circuito, evitando que venham a desenvolver falhas explosivas, sinalizando falhas no para-raios e que este necessita ser substituído. Esta sinalização se dá por meio da explosão da peça e desligamento do cabo de conexão à terra, impossibilitando qualquer contato elétrico entre o ponto de aterramento e o terminal inferior do para-raios.

O desligador é conectado em série com o para-raios, sendo composto por partes metálicas e invólucro isolante, geralmente em material polimérico, contendo um cartucho

calibre 22, responsável pela sua detonação. Sua operação segue o princípio básico de operação de um elo fusível, para o qual o aumento de corrente leva ao aumento de temperatura. Neste caso, o aumento de temperatura gera a ignição da pólvora. Porém, este tipo de conceito não garante se, de fato, o para-raios sofreu ou não danos de monta, exceto quando de falhas visíveis aos invólucros. Desta forma, o conjunto para-raios/desligador deve ser substituído por inteiro, evitando assim futuros danos aos equipamentos protegidos.

De modo complementar, os desligadores não devem ser os geradores do fenômeno de rádio interferência, prejudicando assim toda a operação da rede elétrica. O desligador automático também deve suportar o torque contínuo em seus terminais de no mínimo 3,0 daN.m [7] [8], sem quebra ou trincas e evitar ao máximo que sua parte interior sofra alguma modificação que prejudique seu funcionamento por causa do torque exercido em seus terminais. A Figura 11 mostra um projeto de um desligador com pólvora utilizando um cartucho de calibre 22.

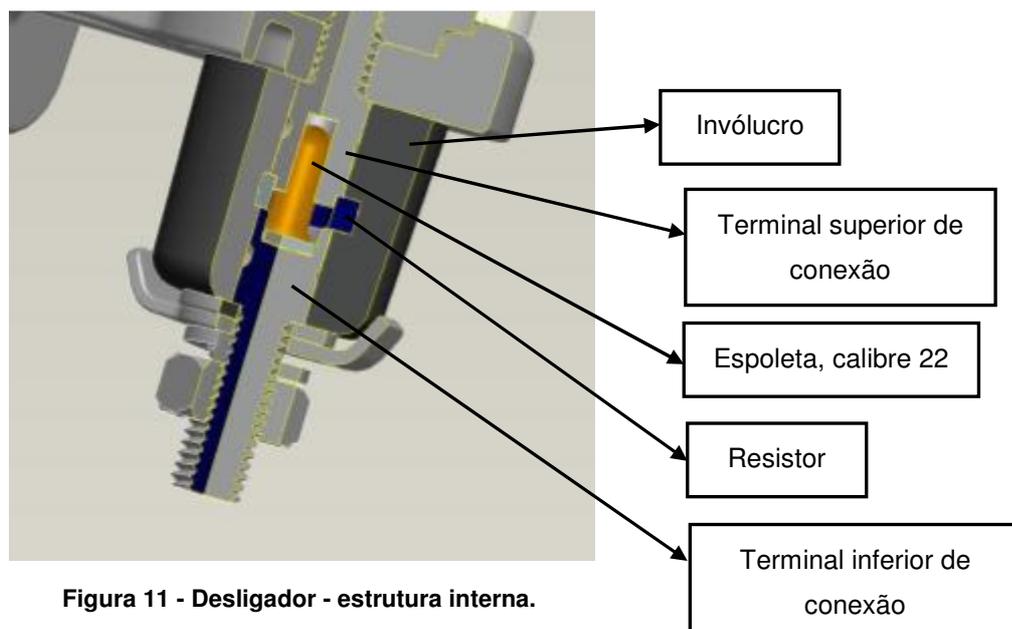


Figura 11 - Desligador - estrutura interna.

3 Requisitos de Projeto

Este capítulo tem por objetivo definir os requisitos e critérios de seleção para o correto desenvolvimento de um projeto de para-raios. Para isto, são considerados parâmetros de qualidade, processos produtivos e desempenho em ensaios.

3.1 Varistores

Os varistores utilizados no projeto dos para-raios devem atender aos requisitos mínimos estabelecidos nas normas IEC 60099-4 [7] e ANSI/IEEE 62-11 [8]. Desta forma, é importante que se desenvolvam procedimentos que visem obter e verificar os requisitos de garantia do fabricante escolhido para o fornecimento de varistores para que não haja nenhum problema futuro com as unidades fabricadas, pois estas são as mais importantes e com maior valor agregado, comparadas com os outros componentes que as compõem.



Figura 12 - Varistor do fabricante



Figura 13 - Varistor do fabricante II

As Figuras 12 e 13 mostram dois varistores de fabricantes diferentes, que foram submetidos a uma série de ensaios para avaliação e possível seleção para utilização em um novo projeto de para-raios.

Os varistores devem possuir uma boa metalização em suas faces de contato elétrico, inclusive sobre a borda isolante, geralmente em vidro associada ou não a uma cobertura em "Resina EPOXI". Observa-se na Figura 13, que a borda próxima da isolação lateral não é metalizada.

A borda sem metalização não prejudica necessariamente a qualidade do varistor, mas existe uma maior preocupação de que não haja um bom contato elétrico entre as faces dos varistores. Isto possibilita a entrada de material estranho entre as junções durante o processo de aplicação do "Roving" (Cobertura feita com fios de fibra de vidro embebidos com *Resina EPOXI*, responsável pela rigidez mecânica dos para-raios e a escolhida para o desenvolvimento deste trabalho - Manufatura de Módulos) e aplicação do polímero dos invólucros.

Além disso, a camada de metalização, também chamada de eletrodo, não pode ser muito fina, para não prejudicar o contato elétrico nem muito grossa para, por meio de contração - expansão térmica diferenciada, prejudicar a aderência do metal ao material cerâmico do varistor. Tipicamente, os eletrodos tem a espessura da ordem de 80 - 100 micrometros, substituindo os discos de alumínio e permitindo a correção da junção entre varistores.

Os varistores precisam atender uma série de ensaios elétricos que avaliam a sua funcionalidade, garantindo o desempenho adequado do produto final. Assim, as principais características que devem ser apresentadas pelos varistores são [7, 8]:

- Valores reduzidos de tensão residual para máxima corrente nominal;
- Tensão de operação contínua próxima da nominal - U_C ;
- Baixo consumo - dissipação de potência (O ideal são valores de até $\approx 0,551$ W);
- Baixa corrente de referência em mA;
- Suportar os impulsos de corrente de longa duração [A; ms] 18 x (150A; 2000 ms);
- Suportar os impulsos de alta corrente [kA; μ s] 2 x (100 kA; 4/10 μ s);
- Atender aos ensaios de envelhecimento acelerado 1000 h, 115 °C sob U_C ;
- Apresentar boa capacidade de absorção de carga e energia elétrica e descarga;
- Normalização para operar em 50 ou 60 Hz.

Deste modo, os varistores devem ser fornecidos em conjunto com um contrato de qualidade assegurada para que não seja necessário reensaiar todas as unidades antes da montagem, evitando a elevação dos custos de fabricação. Ainda assim, considera-se recomendável fazer uma avaliação simplificada, selecionando alguns ensaios mais significativos e realizá-los através de pequena amostragem para cada lote.

Antes de qualquer ensaio elétrico, inspeções visuais devem ser realizadas para verificação de algumas características:

- Os varistores devem possuir correto paralelismo entre as faces onde se realizam os contatos elétricos. Se isto não acontecer, podem ocorrer vários problemas na forma

de contatos de baixa qualidade, gradientes de campo, entre outros quando da associação para a montagem dos módulos ativos finais. A Figura 14 mostra este paralelismo. Varistores que se apresentam conforme o diagrama à esquerda não podem ser utilizados na construção de módulos de para-raios.

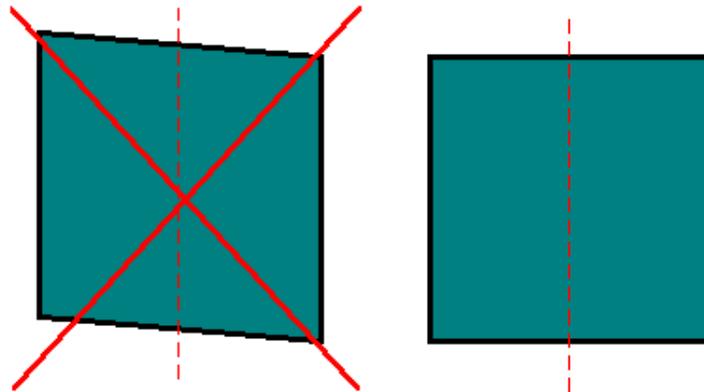


Figura 14 - Paralelismo nos varistores - faces de contato.

- Os varistores têm que apresentar um ângulo de 90° entre base e superfície lateral, formando um cilindro reto. Não é permitido o paralelismo inclinado conforme mostrado na Figura 15, evitando-se o desalinhamento vertical, conforme mostra a Figura 16 criando uma abertura entre os varistores.

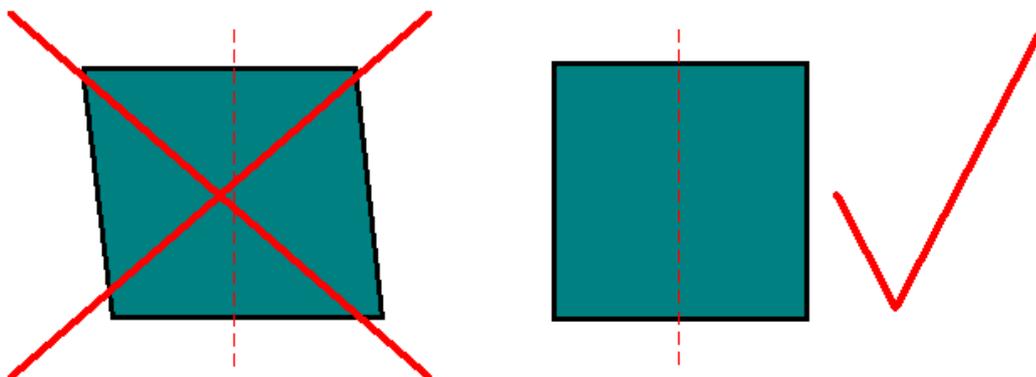


Figura 15 - Ângulo entre base e faces laterais dos varistores.

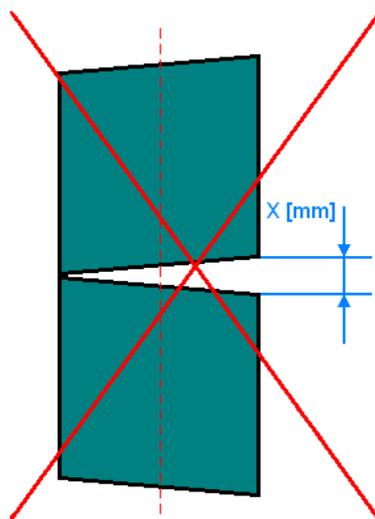


Figura 16 - Alinhamento vertical de um coluna de varistores.

- Outro alinhamento importante, para o qual se deve ter atenção, é o alinhamento entre peças, evitando-se as situações exemplificadas nas Figuras 16 e 17. O caso da Figura 17, no entanto, não ocasiona muitos defeitos na associação dos varistores, desde que o deslocamento não seja superior a 2 mm do outro varistor associado.

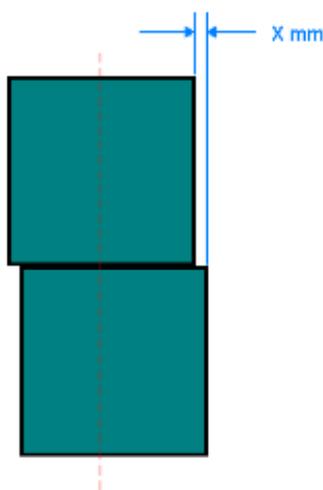


Figura 17 - Alinhamento horizontal - permitido com restrições.

- Verificar o abaulamento das superfícies cilíndricas conforme indicado pelo fabricante. A Figura 18 nos mostra este abaulamento que deve ser mínimo e relaciona-se à qualidade no processo de fabricação do varistor, prensagem e posterior sinterização. Quanto maior for este abaulamento, pior é o processo de produção dos varistores e, como resultado, implicações negativas no processo de montagem e, por diferenças de densidade possíveis problemas de desempenho

elétrico. Durante a montagem, a aplicação da força de compressão (máxima indicada por fabricante 180 kgf +/- 10 kg) na associação dos varistores, inclusive pode resultar em quebra dos varistores, pois eles se tornam mecanicamente mais frágeis em decorrência do abaulamento.

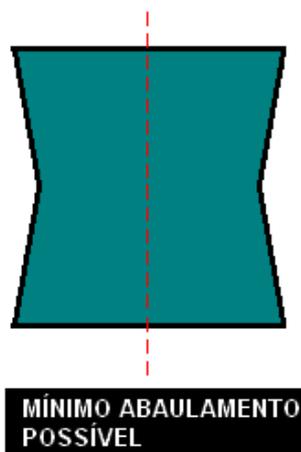


Figura 18 - "Abaulamento" mínimo

Além do processo de fabricação, alguns cuidados devem ser tomados com a montagem, estocagem e manuseio na produção. Estes cuidados estão descritos abaixo:

- A estocagem do varistor pode ser feita em qualquer ambiente que não apresente níveis elevados de umidade ou presença de água que possa entrar em contato direto;
- Durante o manuseio, é obrigatório o uso de luvas, pois o contato com a pele implica em uma possível oxidação por causa dos "fluidos ácidos" existentes nas mãos e depositados nas faces metalizadas do varistor, podendo prejudicar o contato elétrico.

3.2 Construção dos Módulos do Para-raios

Selecionado o varistor, o próximo passo é a montagem de módulos completos para ensaios. Hoje existem vários métodos e formas de construir módulos - unidades mecânicas de para-raios. No entanto, a forma de construção mais comum encontrada no Brasil, e também a mesma que foi utilizada nos módulos utilizados nos ensaios deste projeto, é a aplicação de "*Roving*" ou "*Fios de Fibra de Vidro*".

É importante lembrar que o método de construção utilizado não possui influência significativa nos resultados dos ensaios propostos, desde que, os cuidados citados ao longo deste texto sejam seguidos.

3.2.1 Montagem por Roving ou Fios de Fibra de Vidro

Os módulos utilizados neste trabalho foram construídos com uma trama de fio de fibra de vidro impregnada com "Resina EPOXI" envolvente, uma tecnologia conhecida como "roving" ou "filamento winding". Este processo faz uso de um dispositivo para montar e alinhar os componentes tais como: varistores, terminais em alumínio e disco compensador quando necessário; e uma máquina de tramar (enrolar o fio impregnado com resina no módulo do para-raios) que possibilite ajustes para acertar os ângulos de abertura das janelas (aberturas que permitem construir áreas abertas que vão facilitar a vazão do ar quando o para-raios for submetido a um curto-circuito), conforme visto na Figura 19.

Para este caso, foi considerado ângulo de abertura entre 53° a 60° . Este ângulo assegura que a estrutura suporte as solicitações mecânicas. Utilizando este ângulo restringe-se a utilização de várias camadas, economizando-se material e agilizando-se o processo de fabricação.

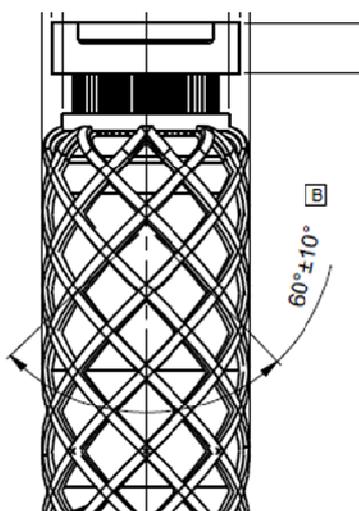


Figura 19 - Roving - trama de fio de fibra de vidro impregnada em "Resina EPOXI"

Além do tipo de estrutura apresentado na Figura 19, para montar o módulo do para-raios, existem outros artifícios para se obter uma estrutura rígida, fundamental no desempenho do para-raios frente aos ensaios elétricos.

3.2.2 Montagem por Injeção de Plásticos

O segundo modo para construção dos módulos de um para-raios pode ser o de injeção utilizando matérias-primas tais como: *SMC* (*Sheet Molding Compound*) e *BMC*

(*Bulk Molding Compound*); que são materiais termofixos, que para serem aplicados, necessitam de um molde e uma injetora específica para moldar ou encapsular os componentes.

Os pontos fortes deste tipo de estrutura são a alta resistência mecânica final, bem como as altas temperaturas de trabalho para materiais plásticos, em torno de 170°C. Porém, seus pontos fracos são a aplicação de elevados níveis de pressão quando da injeção do material e de forma direta sobre a coluna ativa, formada pelos varistores, o que pode resultar no deslocamento dos blocos e a perda da conexão entre a associação dos varistores e os terminais de alumínio. Isso possibilita a ocorrência de problemas subsequentes por causa da conexão pobre entre os varistores, varistores e terminais, penetração de compostos isolantes entre as interfaces, entre outros.

Também é possível utilizar como matéria prima, o *Nylon com carga de fibra de vidro*, que é um sistema polimérico com elevada resistência mecânica devido à carga de fibra de vidro e que pode ser aplicado em uma injetora de plástico convencional. Os pontos fracos na utilização deste material estão associados com investimento na manufatura do ferramental que é igual ou superior aos necessários para os *SMC/BMC*, além da possibilidade de perda do alinhamento e da pressão de contato elétrico entre os varistores.

Os pontos fortes são a alta produtividade, valor da matéria-prima acessível quando aplicado uma carga acima de 25% de fibra de vidro, o que, por sua vez, possibilita resistir aos esforços de explosão do para-raios nos casos de falha por curto-circuito, sem deixar com que fragmentos sejam lançados com riscos a segurança pública e patrimonial, como por exemplo, as buchas dos transformadores de média tensão.

É importante lembrar que a utilização de qualquer material termofixo ou termoplástico no projeto dos invólucros dos para-raios deve prever a existência de áreas frágeis ou aliviadas, conhecidas como janelas de alívio de pressão. Isto é importante para propiciar pontos para o escape dos gases internos, formados pela circulação das altas correntes de curto-circuito, sem que surjam altas pressões internas, capazes de ocasionar a explosão do para-raios. Um exemplo destas janelas de alívio encontra-se na Figura 20.



Figura 20 - Alívio de material no módulo elemento varistor.

3.2.3 Módulos com Tubos Rígidos de Fibra de Vidro e Resina ÉPOXI

É comum encontrar-se em para-raios, principalmente de fabricantes europeus, módulos construídos com um tubo de fibra de vidro impregnado com resina *EPOXI*, no qual os varistores são encaixados sob pressão e, por último, são aplicados os terminais. Estes, por sua vez, sofrem uma compressão a fim de criar uma “solda fria” entre os terminais de alumínio e o tubo de resina *EPOXI*, artifício conhecido no meio industrial como “*Crimpagem*”. São utilizados neste processo cola, rosca e ou outros métodos que facilitam a montagem do núcleo do para-raios e tornam o processo mais produtivo.

Neste tipo de montagem, quando há ocorrência de danos internos devido a descargas de corrente de alta intensidade ou falhas por concentração de correntes de longa duração, podem ocorrer curtos-circuitos plenos, o que gera gases associados à temperaturas elevadas. Para que este tipo de módulo não apresente comportamento explosivo são aplicados vários métodos, tais como:

- Alívio de material, ou seja, é usinada uma linha no sentido axial do lado externo do cilindro de fibra de vidro e epóxi tornando esta linha uma região frágil. Assim, quando de um curto-circuito interno, os gases gerados exercem pressão de dentro

para fora do invólucro que se rompe nesta linha ou ponto frágil, abrindo o conjunto evitando assim o lançamento de fragmentos a grande distâncias;

- Furos com diâmetros próximos de 10 mm para facilitar que os gases internos encontrem pontos de escape. O único ponto que merece atenção é quando do processo de aplicação dos materiais usados na formação final do invólucro, pois estes furos podem ser preenchidos pelo material utilizado. Nos processos de aplicação dos materiais dos invólucros, na forma de injeção, o material é empurrado para dentro da cavidade dos moldes sob alta pressão. Assim, os furos feitos nos tubos recebem material quente e que, sob pressão, podem penetrar nas junções e danificar a associação de varistores internas ao tubo.

Os pontos positivos na utilização deste processo estão ligados com a sua rapidez, ou seja, possui alta produtividade quando comparado aos processos de "Roving". Garante a força de conexão do início ao fim da montagem do para-raios, devido à forma como são introduzidos os componentes no interior dos tubos. Além disso, a resistência mecânica à flexão é elevada, comparado com os demais processos de montagem, pois, em geral os tubos possuem espessura relativamente elevadas, ajudando também na isolação dos varistores e junções e evitando as ocorrências que possam levar os módulos ao curto-circuito.

3.2.4 Sistema de Hastes ou Gaiola

Este sistema de montagem dos módulos dos para-raios com hastes é o mais novo dos mencionados neste trabalho. Assim, é possível estudar e divulgar um estudo sobre módulos montados com hastes na forma de gaiola, conforme mostrado na Figura 21.

O módulo consiste em um estrutura composta de no mínimo 4 hastes (barras) de fibra de vidro funcionando como uma coluna e travada em terminais de alumínio. Nesta estrutura, a associação de varistores fica totalmente visível antes de receber o material do invólucro. Ponto importante e que merece cuidado na preparação deste módulo, pois, ao receber o material do invólucro, não deve haver penetração de material na junção da associação de varistores, o que pode provocar a perda de contato entre eles.

As vantagens deste modelo estão descritas abaixo:

- Rápida montagem, diminuindo o custo de produção;
- Melhor controle da força de compressão de conexão;

- Não lança fragmentos, comparados com os outros modelos, apresentando um bom desempenho quando dos ensaios de curto-circuito;
- Possibilidade de reaproveitar o varistor após a aplicação do invólucro em caso de erros de processo;
- Menos processos envolvidos na produção;
- Processo mais limpo comparado com o processo de roving;
- Menor investimento em equipamentos de produção.

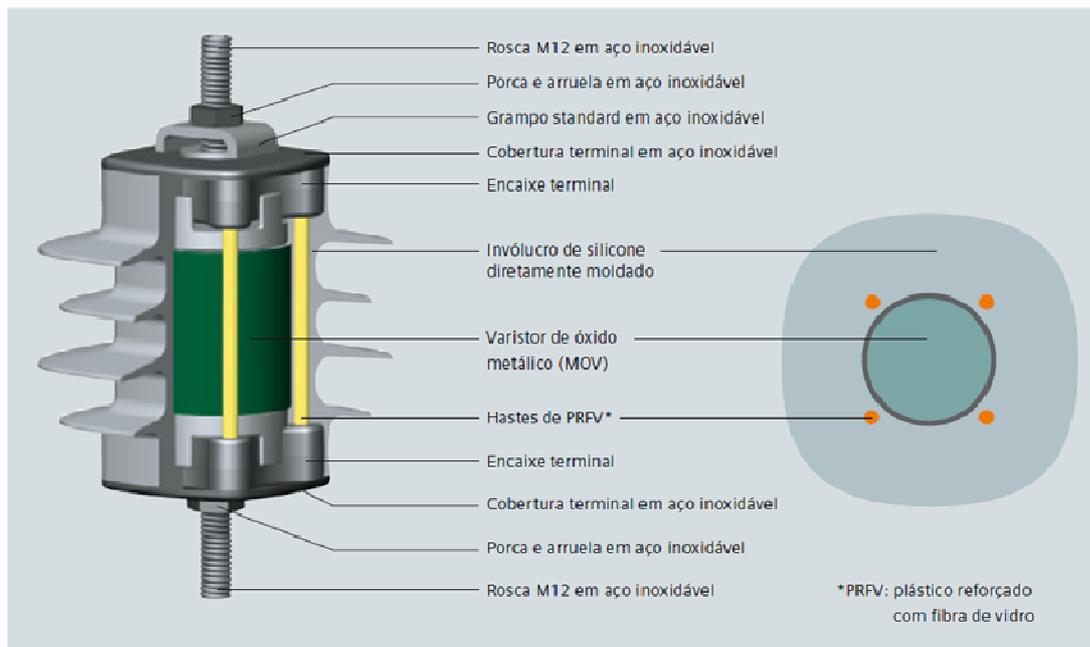


Figura 21 - Montagem em estrutura tipo hastes ou gaiola.

3.3 Invólucro

O invólucro fornece proteção do módulo do para-raios contra agentes contaminantes, inclusive umidade, evitando o desenvolvimento de trilhamento que pode evoluir para curto-circuito ou danos que prejudiquem o seu funcionamento, garantindo a vedação. Também são abertas possibilidades para o projetista definir qual a classe de poluição que o produto deve trabalhar, conforme Norma IEC 60815 [9].

Ao se definir o formato dos invólucros e, por conseguinte, a forma de suas saias, é necessário considerar um coeficiente denominado "*Fator de Forma*", dado típico para isoladores, bem como um gradiente de tensão em função de determinado nível, ou classe de poluição. Deste modo, com estes dados é obtida - projetada uma geometria para o invólucro capaz de possibilitar ao produto obter o melhor desempenho no campo.

É importante salientar que o "*Fator de Forma*" mínimo para se obter uma distância de escoamento segura, em regiões com baixa presença de poluentes, é de 25 mm/kV.

Também é necessário lembrar que quando os para-raios não atuam, descarregando correntes de impulso para terra, eles apresentam o comportamento típico dos isoladores. Portanto, é importante considerar a distância de arco para atender a coordenação de isolamento e também as tensões suportáveis a seco e sob chuva, para se garantir ao projeto de invólucro e, por conseguinte ao para-raios bom desempenho dielétrico global.

Para se manufaturar invólucros para para-raios existem dois tipos de tecnologias bem conhecidas hoje:

- Invólucros em porcelana;
- Invólucros em material polimérico (em geral em borracha de silicone).

A fabricação de para-raios com invólucros em porcelana tem se tornado cada vez mais incipiente, de modo que neste texto é dado maior destaque aos invólucros poliméricos. Também é discutida uma nova abordagem, distinta da tradicionalmente aplicada em Borracha de Silicone, utilizando PEAD (Polietileno de Alta Densidade), material hoje utilizado em acessórios de rede compactas.

3.3.1 Invólucros em Porcelana

Os para-raios de distribuição fabricados até a década de 1990 utilizavam invólucros em porcelana. Os fabricantes adquiriam os "cilindros" de porcelana denominados genericamente de "Isolador tipo bucha para para-raios", introduziam seus módulos ativos no seu interior e lacravam suas extremidades com tampas confeccionadas em aço inoxidável, latão e ou alumínio. Neste caso, a vedação principal era obtida por meio de um anel tipo "*o'ring*" ou borracha de silicone criando uma barreira para a penetração da umidade. Os pontos de interesse neste tipo de projeto são as condições das superfícies que recebiam os anéis de vedação, também denominados de gaxetas, as tolerâncias de manufatura da porcelana e a pressão aplicada ao sistema, estes pontos deveriam ser responsáveis pela manutenção de uma pressão de contacto entre 2 e 3 kgf/mm².

Os isoladores tipo bucha, em porcelana, para para-raios, conforme mostrado na Figura 22, além de pesados, eram sensíveis ao impacto, quebrando com facilidade. A produção era lenta e, de acordo com registros levantados, havia um elevado índice de quebra da porcelana durante as etapas de montagem do produto. O comprador destas buchas necessitava de um controle contínuo para avaliar a porcelana que entraria na

linha de produção, pois, uma vez com defeito ou problemas de dilatação por choque térmico, estes materiais eram considerados como inadequados.



Figura 22 - Para-raios com invólucro em porcelana. [26]

Outro ponto importante, que levou a substituição por invólucros poliméricos, foram os casos de explosão e lançamento de fragmentos de porcelana, altamente perigosos, por sua característica cortante, quando de falhas na forma de curtos-circuitos internos ao invólucro. Estes casos levaram ao desenvolvimento e adoção de um ensaio denominado "*Ensaio de Capacidade de Alívio de Sobre Pressão*", com o objetivo de avaliar o projeto do produto, quando da ocorrência de curtos-circuitos internos, em evitar a fragmentação e ou explosão com o subsequente lançamento fragmentos para fora de um círculo com diâmetro de 2 metros, no centro do qual se encontra instalado o para-raios.

3.3.2 Invólucros Poliméricos em Silicône

O primeiro grande impacto da invenção dos varistores na década de 1970 foi que em geral, os para-raios não necessitavam mais da utilização de centelhadores em sua construção. Com o surgimento das resinas em poliéster e epóxi e sua subsequente evolução, na década de 1980, foram fabricados os primeiros para-raios com invólucros poliméricos.

Vários polímeros foram utilizados, a exemplo do que se observou ao longo do desenvolvimento dos isoladores, sendo o de maior sucesso os materiais com base em silicone. A adoção destes polímeros para confecção do invólucro permitiu uma maior flexibilidade no projeto das saias, necessárias para atingir os níveis de distância de

escoamento e de arco, bem como o desenvolvimento de projetos mais eficientes contra intempéries.

Os invólucros em borracha de silicone são produzidos por meio de injeção. Deste modo, os moldes utilizados para vulcanização devem possuir além de um bom projeto alguns cuidados importantes como acabamento, fechamento e entrada de material para preencher a cavidade e, por último, serem produzidos por uma boa ferramentaria especializada na confecção destes tipos de ferramentas.

Para que o produto tenha produtividade, pois a vulcanização da borracha de silicone é considerada lenta, o molde deve possuir no mínimo duas cavidades. No entanto, de forma a viabilizar todo o processo é usual observar o número máximo de cavidades que a prensa de vulcanização permite, ou seja, verificar se os limites fornecidos pela dimensão dos platôs superior e inferior da prensa são compatíveis com os tamanhos dos moldes com mais cavidades. Nos casos onde se utilizam mais de duas cavidades é importante que os canais que conduzem o material a ser injetado (borracha de silicone) para as cavidades sejam projetados de forma a garantir a fluidez do material quente e sob pressão.

Estes canais devem chegar às cavidades pelas saias do invólucro e nunca diretamente pelo seu corpo ou módulo, a fim de evitar que o material, que está sob pressão, não danifique a associação de varistores e tampouco permita a entrada de silicone nas junções, mesmo com a fita de vedação. Também é comum utilizar o ponto de entrada - injeção do material embaixo da saia de modo que o material, ao adentrar a cavidade, venha a se chocar com a parede do molde (Parte superior da saia), reduzindo a pressão do material evitando danos ao núcleo.

A entrada do material, borracha de silicone, é conhecida como canal de injeção. Este canal deve ser projetado de forma a permitir o fluxo da quantidade correta de material que está quente e sob pressão, uma vez que este é momento em que o material entra no processo de cura. Assim, o canal deve atender o tamanho, geometria e tipo de material que preenche a cavidade do molde.

Um projeto ineficiente deste canal pode ser responsável por alguns danos ao invólucro, ou seja:

- Falta de preenchimento da cavidade;
- Alteração da cor, pois os compostos de silicone contêm em sua composição óxido de alumínio, também conhecido como alumina.

Finalmente, caso os canais de injeção não apresentem um projeto que permita, no ato de retirada das amostras, que o próprio molde venha a cortar estes canais, eles podem ficar entupidos, o que leva o operador a gastar mais tempo com a limpeza, acarretando um ciclo de vulcanização maior e tornando o processo improdutivo. Tomando-se os cuidados acima, se obtém um bom projeto do molde de vulcanização. No entanto, é necessário observar, de forma complementar, mais dois pontos importantes com respeito os projetos de moldes:

- Acabamento do molde: O acabamento do molde é importante para auxiliar na extração e ganhar produtividade. Facilita também a limpeza e deixa a superfície lisa com o aspecto de polida. Esta característica ajuda o silicone a eliminar a sujeira depositada durante o tempo instalado no campo, reforçando a "*Hidrofobicidade*" deste tipo de invólucro;
- Fechamento do molde: O projeto do fechamento do molde deve garantir que não sejam deixadas rebarbas na linha de fechamento. Estas rebarbas alteram o campo elétrico permitindo a degradação do silicone e, em última análise, a perfuração elétrica levando o para-raios a condição de curto-circuito. Estes pontos podem ser observados nos ensaios de roda de trilhamento elétrico;
- Ainda quanto ao fechamento, atentar para o fato de que quando o molde se fecha para dar início ao processo de injeção, a sua parte superior, ao descer encosta, nos terminais de alumínio existentes nas extremidades do para-raios. Assim, o projeto não deve permitir o escoamento extra de material o que gera consumo excessivo de borracha de silicone;
- Nestes casos, também é necessário prover meios para que nestas regiões ocorra boa aderência entre a borracha de silicone e o alumínio de modo que o acabamento não se solte nem permita a entrada de água. A eficiência dos modos de vedação é verificada através de ensaios em água fervente conforme previsto na Norma IEC 60099-4 [7].

3.3.3 Invólucros em PEAD

A evolução da tecnologia e as inovações na área dos polímeros têm permitido maior desenvolvimento dos componentes elétricos utilizados na área de distribuição de energia. Neste caso, especial atenção tem sido dispensada ao PEAD (Polietileno de Alta Densidade). Sua utilização é vista em campo principalmente em redes compactas, como isoladores, espaçadores losangulares e cabos cobertos. Considerando o desempenho

destes elementos da rede, surge a possibilidade de se utilizar este mesmo material na confecção dos invólucro dos para-raios.

Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, desenvolvidos em parceria entre Universidades e Empresas do setor privado, permitem considerar esta possibilidade técnica. Assim sendo, no momento vários conjuntos de ensaios estão sendo realizados em protótipos de para-raios com corrente nominal de 5 kA com invólucro em PEAD. As amostras produzidas a partir deste projeto estão apresentando comportamento satisfatório no que tange os aspectos relativos aos polímeros e o resultado gerado é redução no custo principalmente na manufatura do invólucro do módulo do para-raios.

As vantagens da utilização do PEAD com relação ao silicone são:

- Maior produtividade, decorrente ao polímero possuir uma solidificação - "cura" maior que a do silicone e desta forma, o tempo de injeção é menor comparado com o tempo de vulcanização;
- Menos componentes internos e maior desempenho mecânico do PEAD em relação ao silicone, permitindo montar a associação de varistores dentro do molde de injeção sem a aplicação do roving, o que possui potencial para redução de custos;
- Material reciclável, o PEAD possui facilidade de remoção e reciclagem, não ocorrendo com o silicone.

Por outro lado, suas desvantagens são:

- Baixo desempenho elétrico frente a ambiente com alta poluição, por não possuir características de hidrofobicidade;
- Quando o para-raios entra em curto-circuito, o sistema apresenta maior possibilidade de lançar fragmentos por ser rígido e não flexível. Isto pode ser resolvido com métodos de alívio de material ou no composto para que o invólucro crie rachaduras/fissuras, facilitando a saída dos gases internos ao invólucro, gerados quando a associação de varistores entra em curto-circuito.

4 Avaliação Tecnológica

A etapa de avaliação tecnológica deste trabalho contemplou a avaliação de um conjunto de para-raios de manufatura nacional, bem como conjuntos de resistores não lineares importados e módulos construídos com parte dos resistores não lineares selecionados.

A etapa de avaliação da tecnologia nacional no campo de para-raios se faz necessária para gerar um conjunto de dados de referência, e permitir a manufatura de um para-raios que seja capaz de atender de forma econômica os requisitos de mercado.

A avaliação dos resistores tem por objetivo fornecer uma lista de fornecedores prioritários e confiáveis definindo tendências de manufatura e maior flexibilidade de contratos de suprimento, uma vez que, idealmente, devem existir alternativas que, por sua vez, necessitam estar pré-cadastradas quando do início da manufatura das unidades.

Finalmente, os módulos com a parte ativa são ensaiados para prover dados sobre a montagem do núcleo do produto para-raios, aferindo sua influência no produto final.

4.1 Ensaios em Para-raios de Fabricantes Nacionais

Nesta etapa foram ensaiadas amostras de para-raios de 15 kV e 24 kV de quatro diferentes fabricantes que atuam no mercado nacional de para-raios. Assim, foram realizados ensaios em 29 amostras de para-raios divididos da seguinte maneira:

- Fabricante 1: 5 Amostras - Identificado por "A" - 24 kV;
- Fabricante 2: 5 Amostras - Identificado por "B"- 24 kV;
- Fabricante 3: 10 Amostras - Identificado por "C" - 24 kV;
- Fabricante 4: 9 Amostras - Identificado por "D" - 15 kV.

As amostras A, B e C são para-raios de distribuição com invólucro polimérico, corrente nominal de descarga 10 kA, tensão nominal 24 kV, máxima tensão de operação contínua (MCOV) de 20 kV. As amostras D são para-raios de distribuição com invólucro polimérico, corrente nominal de descarga 10 kA, tensão nominal 15 kV. Todas as amostras se encontravam acompanhadas de seus respectivos suportes isolantes e desligadores automáticos.

A finalidade principal dos ensaios era fazer uma avaliação preliminar para homologação. Como objetivo secundário, fazer uma avaliação do desempenho de alguns modelos presentes no mercado gerando uma lógica e base de dados para comparação de desempenho.

Os ensaios realizados nos para-raios de fabricação nacional foram executados na sequência mostrada na Tabela 1:

Tabela 1 - Sequência de Ensaio Realizados nos Para-raios de Fabricantes Nacionais [7, 8].

<i>Item</i>	<i>Medição</i>	<i>Características</i>
01	Tensão de referência, potência e corrente de fuga.	Considerando 1mA e 2 mA, sob temperatura ambiente.
02	Tensão de Rádio Interferência - RIV	Considerando tensões de 1,0 e 1,1 pu.
03	Aplicação de Impulsos de corrente com 8 x 20 µs	Cinco impulsos de 10 kA, com medição de tensão residual.
04	<i>Repetição dos Itens 1 e 2</i>	-
05	Aplicação de Impulsos de longa duração (2ms)	Cinco impulsos de 250 A, com medição de tensão residual.
06	<i>Repetição dos Itens 1 e 2</i>	-

As leituras de tensão de referência e potência dissipada foram realizadas nas amostras novas e após cada uma das sequências de impulso de corrente de curta duração e longa duração. O objetivo era acompanhar possíveis variações significativas destes valores após as solicitações impostas, o que, em geral, sinaliza degradação das características de operação dos varistores e, por conseguinte dos para-raios.

Os ensaios de impulso de corrente de curta duração consistem na aplicação de uma sequência de 5 impulsos com amplitude de 10 kA e forma 8/20 µs, com medição associada da tensão residual em cada uma das aplicações, de modo a permitir verificar a característica de proteção nominal dos para-raios frente a impulsos atmosféricos.

Já os ensaios de impulso de corrente de longa duração consistem na aplicação de uma sequência de 5 impulsos de 250 A, com forma retangular e duração de 2 ms. Novamente, a tensão residual é medida para cada uma das aplicações, o que permite determinar um ponto específico da característica de proteção contra impulsos de manobra dos para-raios.

Os ensaios realizados nos para-raios, conforme posto na Tabela 1, são modificações dos ensaios especificados na IEC e ANSI nos para-raios Classe 1 de 10 kA. A sequência adotada e apresenta, como principais características, baixo custo e consistência técnica. O ponto em questão era trabalhar com uma quantidade reduzida de amostras sem solicitá-las em demasiado e manter padrões de tempo de avaliação e custos adequados.

As solicitações aplicadas foram de forma sequencial em cada amostra e não um ensaio por amostra com o objetivo de verificar e qualificar os para-raios após a sequência de ensaios através da variação da corrente de fuga o que não é previsto nas Normas Brasileiras e que descreve o modo de degradação das unidades perante as solicitações de descargas de impulsos de corrente.

Observações:

- 1- Optou-se por realizar os ensaios de impulso de corrente sem os desligadores para que estes pudessem ser avaliados posteriormente, de maneira individual. Exceção foi feita para as amostras A, por solicitação do engenheiro que acompanhou os ensaios, representante do fabricante.
- 2- Para os ensaios de tensão de rádio interferência - RIV foi adotado um procedimento simplificado, diferente do especificado pela norma. Neste caso, foi avaliado o nível de tensão de rádio interferência apenas para os valores de 1,1 e 1,0 vezes a tensão de operação contínua do para-raios. Este procedimento foi adotado pelo fato de que a finalidade da medição das tensões de rádio interferência nesta sequência de ensaios era apenas avaliar a sua possível evolução após a aplicação dos impulsos de corrente.
- 3- Para os impulsos corrente de longa duração, a tempo do impulso utilizado foi de 1,75 ms, devido a limitações do gerador.

Os resultados obtidos nos ensaios, assim como algumas formas de correntes e tensões residuais podem ser vistas nas tabelas e figuras a seguir. Estes resultados referem-se às medições de tensão de referência, potência dissipada e tensão residual obtida durante a execução da sequência de ensaios.

A Figura 23 mostra duas das unidades ensaiadas.



Figura 23 - Para-raios vendidos no mercado brasileiro.

- *Corrente de Fuga*

Nos ensaios de corrente de fuga foram feitas medições da tensão de referência (tensão necessária para fazer com que a componente resistiva da corrente de fuga que circula pelo para-raios possua o valor de 1mA de pico - essa definição em termos de amplitude pode não corresponder ao valor de referência real da unidade, no entanto, é uma regra padrão com aceitação razoavelmente universal) e de potência dissipada nesta condição.

Também foram medidas a tensão e a potência dissipada quando se faz circular uma componente resistiva da corrente de fuga da ordem 2 mA pelo para-raios. Estes ensaios foram realizados em para-raios novos, sob temperatura ambiente, e repetidos após a aplicação de cada uma das sequências de impulso. Os resultados são apresentados nas Tabelas 2 a 5. Um “x” indica que a amostra não suportou a sequência de ensaios até o final.

Tabela 2 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo A de Para-raios.

			<i>Amostra</i>					<i>Média</i>
			<i>A01</i>	<i>A02</i>	<i>A03</i>	<i>A04</i>	<i>A05</i>	
Novos	1mA	Tensão (kV)	23,8	24,0	23,9	24,0	23,8	23,9
		Potência (W)	13,8	13,8	14,0	14,0	13,9	13,9
	2mA	Tensão (kV)	24,2	24,5	24,4	24,4	24,3	24,4
		Potência (W)	28,9	29,0	29,1	28,9	28,4	28,9
Após 4 x 20	1mA	Tensão (kV)	24,0	24,3	24,2	24,2	24,1	24,1
		Potência (W)	14,0	13,9	14,0	13,7	13,9	13,9
	2mA	Tensão (kV)	24,5	24,7	24,6	24,6	24,5	24,6
		Potência (W)	28,4	28,7	29,0	28,6	28,7	28,7
Após 250 A Forma Retangular	1mA	Tensão (kV)	24,2	24,4	x	24,3	24,2	24,3
		Potência (W)	13,8	13,9	x	13,8	13,7	13,8
	2mA	Tensão (kV)	24,6	24,8	x	24,7	24,6	24,7
		Potência (W)	28,3	28,6	x	28,3	28,2	28,4

Tabela 3 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo B de Para-raios.

			<i>Amostra</i>					<i>Média</i>
			<i>B01</i>	<i>B02</i>	<i>B03</i>	<i>B04</i>	<i>B05</i>	
Novos	1mA	Tensão (kV)	25,67	25,11	25,21	25,14	24,98	25,22
		Potência (W)	14,11	13,74	13,82	13,76	13,54	13,79
	2mA	Tensão (kV)	26,21	25,64	24,98	25,66	25,54	25,61
		Potência (W)	31,17	30,13	30,43	30,29	29,95	30,40
Após 4 x 20	1mA	Tensão (kV)	25,7	25,3	25,3	25,2	25,1	25,3
		Potência (W)	14,4	14,6	14,1	14,1	13,9	14,2
	2mA	Tensão (kV)	26,3	25,7	25,9	25,8	25,7	25,9
		Potência (W)	31,3	30,2	31,2	30,4	30,3	30,7
Após 250 A Forma Retangular	1mA	Tensão (kV)	25,77	x	25,37	25,28	25,17	25,40
		Potência (W)	14,35	x	13,90	13,95	13,84	14,01
	2mA	Tensão (kV)	26,34	x	25,96	25,83	25,73	25,97
		Potência (W)	31,43	x	30,28	30,24	30,47	30,61

Tabela 4 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo C de Para-raios.

			<i>Amostra</i>										<i>Média</i>
			<i>C01</i>	<i>C02</i>	<i>C03</i>	<i>C04</i>	<i>C05</i>	<i>C06</i>	<i>C07</i>	<i>C08</i>	<i>C09</i>	<i>C10</i>	
Novos	1mA	Tensão (kV)	25,9	26,5	26,2	26,2	26,4	26,4	26,1	25,6	26,1	27,1	26,2
		Potência (W)	14,5	14,3	14,6	14,1	14,3	14,6	14,4	13,9	14,9	15,2	14,5
	2mA	Tensão (kV)	26,6	27,2	26,9	27,0	27,2	27,2	27,0	26,2	26,9	27,9	27,0
		Potência (W)	32,3	32,7	34,7	32,6	33,4	33,9	34,0	31,2	33,5	34,8	33,3
Após 4 x 20	1mA	Tensão (kV)	26,0	25,6	26,0	26,3	26,4	26,4	26,1	25,8	26,1	27,0	26,2
		Potência (W)	14,2	14,4	14,6	14,3	14,4	14,3	14,5	13,7	14,3	14,7	14,3
	2mA	Tensão (kV)	26,8	27,4	27,0	27,1	27,3	27,3	27,0	26,3	27,0	28,0	27,1
		Potência (W)	32,5	32,8	33,9	32,3	33,2	33,0	33,7	30,7	33,1	34,1	32,9
Após 250 A Forma Retangular	1mA	Tensão (kV)	21,4	26,7	26,2	x	x	x	26,2	25,8	x	x	25,3
		Potência (W)	11,6	14,3	14,8	x	x	x	15,0	14,1	x	x	13,9
	2mA	Tensão (kV)	22,1	27,5	27,1	x	x	x	27,1	26,4	x	x	26,0
		Potência (W)	26,6	32,9	33,8	x	x	x	33,4	30,8	x	x	31,5

Tabela 5 - Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo D de Para-raios.

			<i>Amostra</i>									<i>Média</i>	
			<i>D01</i>	<i>D02</i>	<i>D03</i>	<i>D04</i>	<i>D05</i>	<i>D06</i>	<i>D07</i>	<i>D08</i>	<i>D09</i>		
Novos	1mA	Tensão (kV)	14,2	14,1	14,0	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,2	14,1	14,1
		Potência (W)	4,4	4,5	4,1	4,7	4,8	4,6	4,6	4,6	4,9	4,5	4,6
	2mA	Tensão (kV)	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,5	14,6	14,6	14,5	14,5
		Potência (W)	8,3	7,6	7,5	8,0	7,8	7,6	7,7	8,4	7,5	7,8	
Após 4 x 20	1mA	Tensão (kV)	14,0	14,1	14,2	13,8	14,1	14,2	14,2	14,0	14,0	14,1	14,1
		Potência (W)	5,2	5,1	4,9	4,9	5,3	4,9	5,3	5,0	5,3	5,1	
	2mA	Tensão (kV)	14,6	14,7	14,7	14,5	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	14,7
		Potência (W)	9,6	8,8	8,8	9,7	9,6	9,0	8,9	9,8	9,4	9,3	
Após 250 A Forma Retangular	1mA	Tensão (kV)	14,4	14,3	14,3	14,2	14,3	14,4	14,4	14,3	14,1	14,3	14,3
		Potência (W)	5,4	5,1	5,1	5,3	5,3	5,1	5,4	5,8	5,0	5,3	
	2mA	Tensão (kV)	14,8	14,8	14,8	14,7	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,7	14,8
		Potência (W)	9,6	9,3	9,5	10,0	9,6	9,2	9,2	10,5	9,3	9,6	

As variações das tensões aplicadas para os valores de pico da componente resistivas das correntes de fuga de 1mA e 2 mA após a sequência de ensaios aplicadas aos para-raios são mostradas nas Tabelas de 6 a 9.

Tabela 6 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo A de Para-raios.

<i>Tensão & Potência</i>	<i>Amostra</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Condição Final</i>	<i>Variação(%)</i>	<i>Média</i>
U_{1mA}	A01	23,79	24,15	1,51	1,50%
	A02	24,04	24,38	1,41	
	A03	23,94	x	x	
	A04	23,97	24,31	1,42	
	A05	23,82	24,21	1,64	
P_{1mA}	A01	13,75	13,76	0,07	-0,34%
	A02	13,84	13,94	0,72	
	A03	13,96	x	x	
	A04	13,96	13,82	-1,00	
	A05	13,88	13,72	-1,15	
U_{2mA}	A01	24,22	24,57	1,45	1,44%
	A02	24,49	24,83	1,39	
	A03	24,40	x	x	
	A04	24,40	24,74	1,39	
	A05	24,26	24,63	1,53	
P_{2mA}	A01	28,89	28,28	-2,11	-1,56%
	A02	29,02	28,64	-1,31	
	A03	29,05	x	x	
	A04	28,87	28,32	-1,91	
	A05	28,44	28,18	-0,91	

Tabela 7 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo B de Para-raios.

<i>Tensão & Potência</i>	<i>Amostra</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Condição Final</i>	<i>Variação(%)</i>	<i>Média</i>
U_{1mA}	B01	25,67	25,77	-22,2	0,59%
	B02	25,11	x	x	
	B03	25,21	25,37	-22,0	
	B04	25,14	25,28	-22,0	
	B05	24,98	25,17	-21,9	
P_{1mA}	B01	14,11	14,35	-21,15	1,46%
	B02	13,74	x	x	
	B03	13,82	13,90	-22,04	
	B04	13,76	13,95	-21,41	
	B05	13,54	13,84	-20,78	
U_{2mA}	B01	26,21	26,34	-22,09	1,45%
	B02	25,64	x	x	
	B03	24,98	25,96	-19,45	
	B04	25,66	25,83	-21,96	
	B05	25,54	25,73	-21,91	
P_{2mA}	B01	31,17	31,43	-21,84	0,47%
	B02	30,13	x	x	
	B03	30,43	30,28	-22,87	
	B04	30,29	30,24	-22,60	
	B05	29,95	30,47	-21,14	

Tabela 8 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo C de Para-raios.

<i>Tensão & Potência</i>	<i>Amostra</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Condição Final</i>	<i>Variação(%)</i>	<i>Média</i>
U_{1mA}	C01	25,93	21,38	-17,55	-3,16%
	C02	26,48	26,66	0,68	
	C03	26,20	26,16	-0,15	
	C04	26,23	x	x	
	C05	26,40	x	x	
	C06	26,36	x	x	
	C07	26,10	26,24	0,54	
	C08	25,64	25,82	0,70	
	C09	26,08	x	x	
	C10	27,06	x	x	
P_{1mA}	C01	14,51	11,60	-20,06	-2,66%
	C02	14,32	14,31	-0,07	
	C03	14,55	14,78	1,58	
	C04	14,11	x	x	
	C05	14,31	x	x	
	C06	14,60	x	x	
	C07	14,39	14,99	4,17	
	C08	13,91	14,06	1,08	
	C09	14,90	x	x	
	C10	15,23	x	x	
U_{2mA}	C01	26,64	22,05	-17,23	-2,88%
	C02	27,20	27,46	0,96	
	C03	26,94	27,10	0,59	
	C04	26,97	x	x	
	C05	27,19	x	x	
	C06	27,20	x	x	
	C07	26,96	27,12	0,59	
	C08	26,20	26,38	0,69	
	C09	26,88	x	x	
	C10	27,94	x	x	
P_{2mA}	C01	32,34	26,61	-17,72	-4,50%
	C02	32,68	32,94	0,80	
	C03	34,65	33,76	-2,57	
	C04	32,62	x	x	
	C05	33,41	x	x	
	C06	33,86	x	x	
	C07	34,02	33,43	-1,73	
	C08	31,17	30,77	-1,28	
	C09	33,49	x	x	
	C10	34,75	x	x	

Tabela 9 - Variação da Tensão de Referência e Potência Dissipada para o Modelo D de Para-raios.

<i>Tensão & Potência</i>	<i>Amostra</i>	<i>Condição Inicial</i>	<i>Condição Final</i>	<i>Variação(%)</i>	<i>Média</i>
U_{1mA}	D01	14,15	14,37	1,55	1,35%
	D02	14,12	14,29	1,20	
	D03	14,03	14,33	2,14	
	D04	14,06	14,23	1,21	
	D05	14,10	14,27	1,21	
	D06	14,13	14,36	1,63	
	D07	14,10	14,41	2,20	
	D08	14,20	14,33	0,92	
	D09	14,11	14,13	0,14	
P_{1mA}	D01	4,39	5,36	22,10	15,71%
	D02	4,48	5,05	12,72	
	D03	4,08	5,10	25,00	
	D04	4,70	5,34	13,62	
	D05	4,79	5,33	11,27	
	D06	4,56	5,12	12,28	
	D07	4,64	5,39	16,16	
	D08	4,94	5,76	16,60	
	D09	4,50	5,03	11,78	
U_{2mA}	D01	14,63	14,81	1,23	1,52%
	D02	14,53	14,75	1,51	
	D03	14,54	14,80	1,79	
	D04	14,48	14,72	1,66	
	D05	14,53	14,76	1,58	
	D06	14,55	14,80	1,72	
	D07	14,51	14,78	1,86	
	D08	14,62	14,79	1,16	
	D09	14,53	14,70	1,17	
P_{2mA}	D01	8,28	9,63	16,30	22,67%
	D02	7,58	9,28	22,43	
	D03	7,47	9,47	26,77	
	D04	8,01	10,01	24,97	
	D05	7,82	9,56	22,25	
	D06	7,57	9,16	21,00	
	D07	7,67	9,23	20,34	
	D08	8,36	10,52	25,84	
	D09	7,45	9,25	24,16	
D09	7,80	9,57	22,65		

- *Tensão Residual*

A tensão residual sobre todos os para-raios foi medida durante as aplicações dos impulsos de corrente de curta e de longa duração nos valores de 10 kA e 250 A, respectivamente [7, 8].

Os valores de tensão residual apresentados referem-se ao valor máximo da forma do impulso da tensão residual, como exemplificado nas Figura 24 e 25, para um impulso de curta duração de 10 kA e um impulso de longa duração de 250 A.

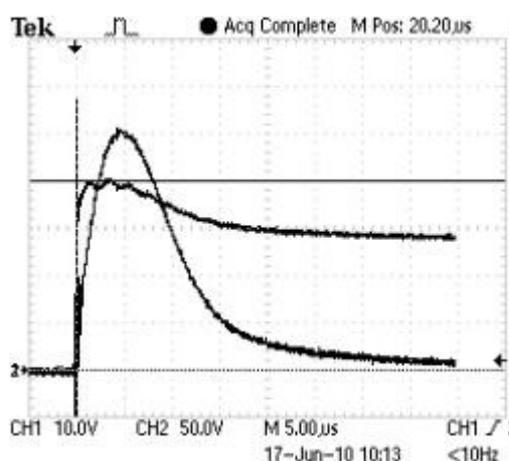


Figura 24 - Tensão Residual para Impulso de Corrente de 10 kA.

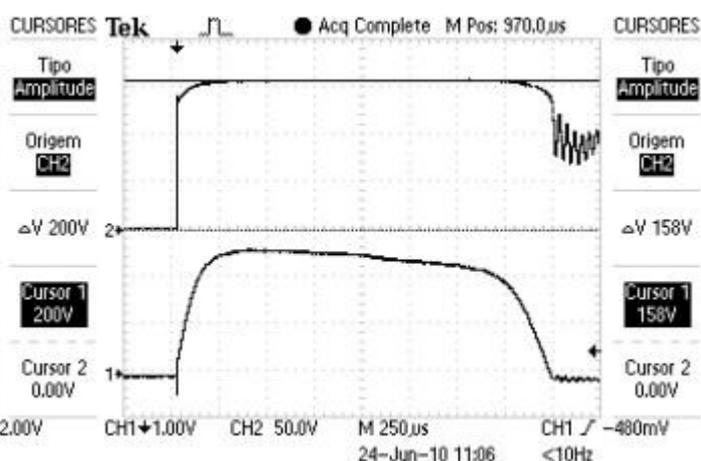


Figura 25 - Tensão Residual para Impulso de Corrente de 250 A.

As Tabelas 10 a 13 mostram os valores de tensão residual observados nos ensaios realizados.

Tabela 10 - Valores de Tensão Residual para o Modelo A de Para-raios.

Corrente& Forma	Amostra	Aplicação Número					Média
		1	2	3	4	5	
10 kA (4 x 10 µs)	A01	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5
	A02	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5
	A03	58,5	58,5	59,1	59,1	59,1	58,9
	A04	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1
	A05	59,8	58,5	58,5	58,5	58,5	58,8
250 A (2000 µs)	A01	39,2	40,8	38,7	39,7	40,8	39,9
	A02	40,8	38,2	39,7	33,6	41,3	38,7
	A03	40,3	37,7	38,2	x	x	38,7
	A04	38,2	36,7	38,2	39,7	40,3	38,6
	A05	38,2	41,8	40,3	40,3	40,8	40,3

Tabela 11 - Valores de Tensão Residual para o Modelo B de Para-raios.

Corrente& Forma	Amostra	Aplicação Número					Média
		1	2	3	4	5	
10 kA (4 x 10 µs)	B01	61,0	61,6	62,3	62,3	62,3	61,9
	B02	61,0	61,6	61,6	62,3	62,3	61,8
	B03	61,0	61,6	62,3	62,3	62,3	61,9
	B04	61,0	61,6	61,6	62,3	62,3	61,8
	B05	61,0	61,6	62,3	62,3	62,3	61,9
250 A (2000 µs)	B01	48,4	48,4	43,8	45,9	45,9	46,5
	B02	48,4	41,8	x	x	x	x
	B03	48,4	48,4	48,4	45,9	47,9	47,8
	B04	45,9	47,9	42,3	42,8	44,3	44,6
	B05	40,3	42,8	42,8	40,8	42,8	41,9

Tabela 12 - Valores de Tensão Residual para o Modelo C de Para-raios.

Corrente& Forma	Amostra	Aplicação Número					Média
		1	2	3	4	5	
10 kA (4 x 10 µs)	C01	67,9	67,2	67,2	67,2	67,9	67,5
	C02	67,2	67,2	67,9	67,9	68,5	67,7
	C03	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2	67,2
	C04	67,9	68,5	69,1	68,5	68,5	68,5
	C05	66,6	67,2	66,6	67,2	67,2	67,0
	C06	66,0	66,0	68,5	68,5	68,5	67,5
	C07	64,8	65,4	65,4	65,4	66,0	65,4
	C08	62,9	62,3	62,9	62,3	62,3	62,5
	C09	66,0	66,6	66,6	66,0	66,6	66,4
	C10	67,2	67,9	67,9	67,9	67,9	67,7
250 A (2000 µs)	C01	47,9	48,9	42,8	42,8	42,8	45,0
	C02	48,9	49,4	50,5	51,0	51,0	50,1
	C03	50,5	49,9	50,5	50,5	50,5	50,3
	C04	48,9	48,9	x	x	x	48,9
	C05	49,9	49,9	51,0	51,0	x	50,5
	C06	47,9	48,4	44,3	x	x	46,9
	C07	46,4	48,4	49,4	49,4	49,9	48,7
	C08	44,3	43,8	46,4	46,9	47,4	45,8
	C09	48,4	48,4	38,7	x	x	45,2
	C10	49,4	48,9	48,4	x	x	48,9

Tabela 13 - Valores de Tensão Residual para o Modelo D de Para-raios.

Corrente& Forma	Amostra	Aplicação Número					Média
		1	2	3	4	5	
10 kA (4 x 10 µs)	D01	24,2	26,2	25,7	27,8	26,8	26,1
	D02	23,7	25,2	26,2	26,2	26,2	25,5
	D03	24,2	24,2	25,2	24,7	26,2	24,9
	D04	23,7	26,2	26,2	26,8	27,8	26,1
	D05	24,2	25,2	26,8	25,7	27,3	25,8
	D06	23,2	25,2	26,8	25,7	25,7	25,3
	D07	23,7	23,7	24,7	24,7	25,2	24,4
	D08	23,2	24,7	25,2	26,8	26,2	25,2
	D09	23,7	22,3	21,3	22,1	22,1	22,3
250 A (2000 µs)	D01	31,6	31,6	31,6	31,6	32,1	31,7
	D02	31,6	31,6	31,6	32,1	32,1	31,8
	D03	32,1	31,1	31,6	32,1	31,6	31,7
	D04	31,6	31,1	31,1	31,6	31,6	31,4
	D05	31,6	31,6	31,1	32,6	32,6	31,9
	D06	31,6	31,6	31,6	32,1	32,1	31,8
	D07	32,1	30,6	31,6	31,6	32,1	31,6
	D08	32,1	31,6	31,6	31,6	31,6	31,7
	D09	31,6	31,6	31,6	31,6	32,1	31,7

- *Análise das Falhas Observadas*

Alguns dos para-raios falharam durante as aplicações de corrente de longa duração. A quantidade de falhas, as formas dos impulsos correspondente e fotos das

falhas podem ser vistos na Tabela 14 e nas Figuras 26 a 33. Ressalta-se que as amostras do "Modelo C" que falharam nos ensaios não apresentaram evidências físicas externas da falha.

Tabela 14 - Número de Unidades que Falharam nos Ensaios.

Modelo	Número de Amostras Ensaçadas	Número de falhas	
		10 kA (4 x 10 μ s)	250 A (2ms)
A	5	0	1
B	5	0	1
C	10	0	5
D	9	0	0

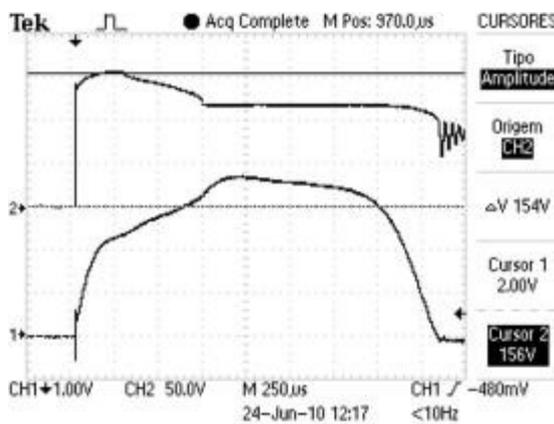


Figura 26 - Oscilograma obtido durante falha da amostra A03.



Figura 27 - Evidência de falha da amostra A03.



Figura 28 - Evidência de falha da amostra B02

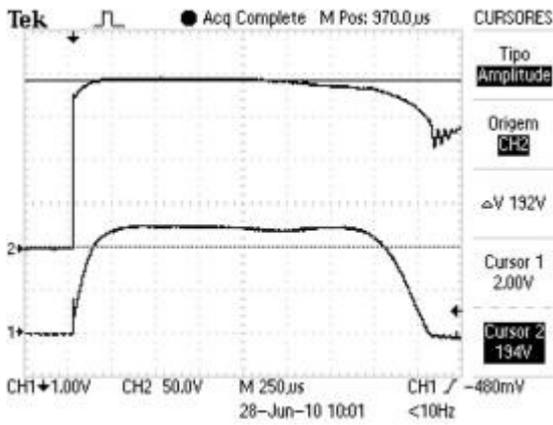


Figura 29 - Oscilograma obtido durante falha da mostra C04.

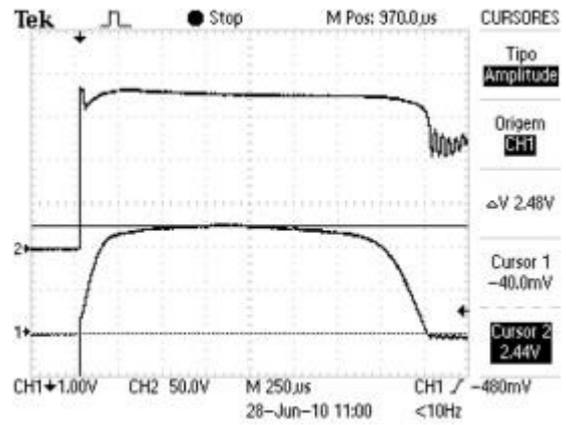


Figura 30 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C05.

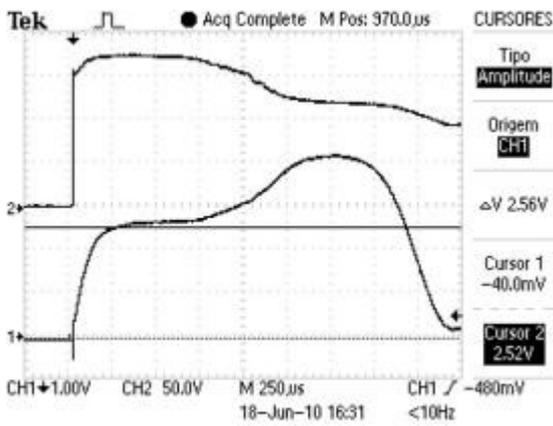


Figura 31 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C06.

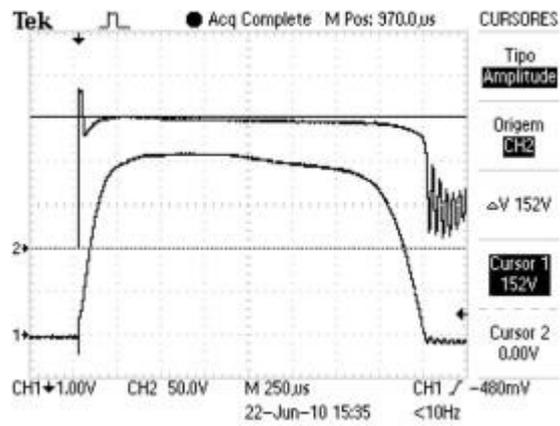


Figura 32 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C09.

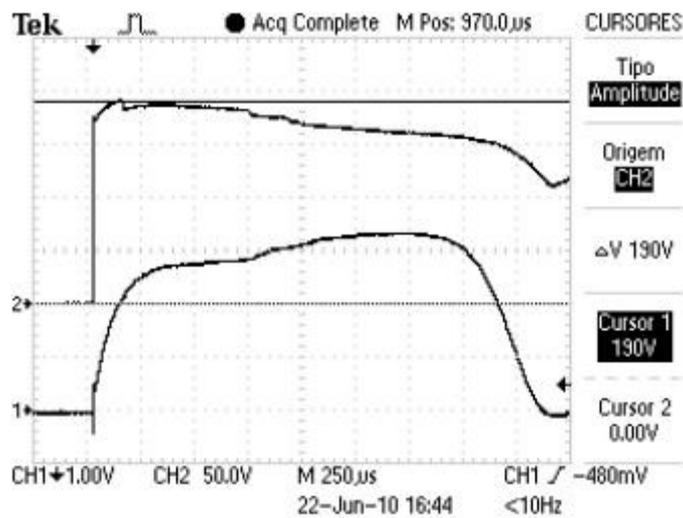


Figura 33 - Oscilograma obtido durante falha da amostra C10.

- *Conclusões e Observações dos Resultados dos Ensaios*
- *Correntes de Fuga*

A Tabela 15 mostra as variações para os valores de tensão de referência e potência dissipada, para uma amplitude da componente da corrente de fuga de 1 mA circulando pelo para-raios. Foram considerados os valores médios das tensões e potências, com a avaliação do valor final feita para as amostras que suportaram a sequência de ensaios.

Tabela 15 - Variação nos Valores Médios de Tensão de Referência e Potência Dissipada.

<i>Modelo</i>	<i>Tensão de Referência [kV]</i>			<i>Potência Dissipada [W]</i>		
	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Variação</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Variação</i>
A	23,91	24,26	1,47%	13,88	13,81	-0,49%
B	25,22	25,40	0,59%	13,79	13,90	1,46%
C	26,25	25,25	-3,79%	14,48	13,95	-3,69%
D	14,10	14,30	1,35%	4,60	5,30	15,31%

Como forma de avaliação, os valores de referência não podem variar mais ou menos do que 15% sobre os valores iniciais, assim como as amostras devem suportar toda a sequência sem falhas. Assim, considerando-se as condições iniciais das amostras e após a realização dos ensaios, todos os modelos apresentaram uma variação da tensão de referência dentro do limite máximo de 15%. O modelo D apresentou uma variação da potência dissipada acima de 15%, algo preocupante pois se reflete na forma do equilíbrio térmico das unidades, o que é mandatório.

- Tensão Residual

A Tabela 16 mostra o valor médio das tensões residuais medidas para as amostras, considerando apenas as amostras que suportaram a sequência de ensaios.

Tabela 16 - Valores de Tensão Residual para os Para-raios Ensaados.

<i>Modelo</i>	<i>Tensão Residual (kV)</i>	
	<i>10 kA</i>	<i>250 A</i>
A	58,8	39,2
B	61,8	45,2
C	66,7	48,0
D #	25,1	31,7

#- Para-raios 15 kV

Assim, em termos aparentes, exceto pela elevada variação da potência consumida, apenas o "Modelo D" não apresentou falhas. Neste caso, considerando os três fabricantes, identificados por "A", "B" e "C", foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado dos Ensaios em Para-raios de Fabricação Nacional 24 kV.

<i>Modelo</i>	<i>Número de Amostras</i>	<i>Resultado</i>
A	05	- Uma amostra falhou no ensaio de corrente de longa duração. - Variação média da tensão de referência, inferior ao limite de 15%. - Variação média da potência dissipada, inferior ao limite de 15%.
B	05	- Uma amostra falhou no ensaio de corrente de longa duração. - Variação média da tensão de referência, inferior ao limite de 15%. - Variação média da potência dissipada, inferior ao limite de 15%.
C	10	- Cinco amostras falharam no ensaio de corrente de longa duração. - Variação média da tensão de referência, inferior ao limite de 15%. - Variação média da potência dissipada, inferior ao limite de 15%.

Os valores de tensão de rádio interferência - RIV não apresentaram mudanças significativas. Devido a diferenças nas metodologias utilizadas para alguns modelos, seus valores não foram mostrados neste trabalho.

4.2 Ensaio em Resistores Não Lineares

Para este trabalho foram escolhidos 4 fabricantes, também como anteriormente, denominados aqui como "Modelos". Cada fabricante forneceu 40 varistores com diferentes tensões e corrente nominal de 5 kA. O objetivo dos ensaios em varistores neste trabalho é fornecer os subsídios necessários para escolha de um ou mais fabricantes cujos varistores possivelmente possam ser utilizados na construção de protótipos para ensaios na forma de um conjunto eletromecânico mínimo e representativo da parte ativa do para-raios - módulos.

Assim, com os varistores considerados adequados para manufatura foram montadas amostras não finalizadas, sem a injeção final do invólucro, "módulos" para ensaios. Observa-se, no entanto, que deve existir correspondência entre os módulos e a estrutura mecânica final do para-raios completo. Estas amostras são então submetidas à novos ensaios em laboratório e, caso aprovadas, passa a ser recomendável o início do processo de produção dos para-raios cabeça de série.

A sequência de ensaios mostrada na Tabela 18 foi aplicada aos varistores. Também foram realizados ensaios com os varistores submetidos a temperaturas elevadas

fato que tem por característica forçar a degradação das unidades frente aos impulsos de corrente e que não estão descritos nas normas. Desta forma, torna-se uma sequência de ensaios não normalizados, com base nas IEC e ANSI [7, 8].

Tabela 18 - Sequência de ensaios realizados nos varistores.

Sequência Ensaio	Ensaio	Características
01	Potência e corrente de fuga.	1mA e 2 mA e os valores de 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão medida para 1 mA - Tensão de Referência, sob temperatura ambiente.
02	Potência e corrente de fuga sob temperatura elevada.	1mA e 2 mA e os valores de 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão medida para 1 mA - Tensão de Referência, sob 80 °C.
03	Impulsos 8 x 20 µs	Cinco impulsos para os níveis de corrente: 1,5 kA, 2,5 kA, 5,0 kA e 10 kA.
04	Repetição do Item 1	-
05	Impulsos 4 x 10 µs	Dois impulsos de 40 kA.
06	Repetição do Item 1	-
07	Impulsos de longa duração (2ms)	Cinco impulsos para cada os níveis de corrente: 75 A e 150 A.
08	Repetição do Item 1	-
09	Impulso 4 x 10 µs	Dois impulsos de 65 kA.

O conjunto de ensaios mostrado na Tabela 18 foi aplicado a varistores com corrente de descarga nominal de 5 kA de 4 grupos - fornecedores - diferentes dotados das seguintes características de origem e de tensão nominal:

- Grupo 1 – Origem: China – Tensão nominal: 3,0 kV e 4,5 kV;
- Grupo 2 – Origem: Japão – Tensão nominal: 3,0 e 5,0 kV;
- Grupo 3 – Origem: Coréia – Tensão nominal: 3,0 kV e 6,0 kV;
- Grupo 4 – Origem: EUA – Tensão nominal: 3,0 kV e 4,5 kV;

A Tabela 19 mostra as características físicas dos varistores ensaiados durante este trabalho.

Tabela 19 - Características dos Físicas e Nominais dos Varistores Ensaaiados.

Modelo	Grupo	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Tensão Nominal (kV)
A1	1	22,0	35	3,0
A2		31,2	35	4,5
A3		35,2	35	5,0
B1	2	21,7	32	3,0
B2		36,1	32	5,0
C1	3	21,7	31	3,0
C2		20,2	31	3,0
J2	4	34,6	33	5,0
J3		22,0	33	3,0
K5		34,6	33	5,0

Como forma inicial de avaliação, a exemplo do que foi aplicado aos para-raios, os valores de referência não podem variar mais ou menos do que 15% sobre os valores iniciais e as amostras devem suportar toda a sequência de ensaios sem falhas.

- *Corrente de Fuga e Dissipação de Potência*

Nos ensaios de corrente de fuga foram feitas medições da tensão de referência e potência dissipada, bem como a tensão e potência dissipada quando se faz uma componente resistiva de corrente de fuga de 2 mA percorrer o varistor. Em seguida a tensão aplicada sobre o varistor foi ajustada para 75%, 80% e 85% da tensão de referência, medindo-se a corrente de fuga e potência dissipada nestas condições.

Estes ensaios foram realizados com os varistores novos, em temperatura ambiente e a 80 °C, e repetidos sob condição de temperatura ambiente, após a aplicação de cada uma das sequências de impulso. Os resultados são apresentados nas Tabelas 20a 29. Para alguns varistores, a potência dissipada sob 75% e 80% da tensão de referência apresentou valores abaixo da sensibilidade do sistema de medição. Nestes casos, o valor é apresentado como ND (não disponível).

Tabela 20 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A1.

A1	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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
Elevada	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 21 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A2.

A2	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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
Elevada	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 22 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor A3.

A3	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]
Novo	5,13	3,22	5,27	6,85	271	96	301	188	339	340
80°C	4,73	3,32	4,98	7,33	266	376	298	532	348	801
Curta	5,12	3,17	5,26	6,75	266	78	294	155	331	302
Elevada	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 23 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor B1.

B1	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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
Elevada	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 24 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor B2.

B2	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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
Elevada	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 25 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor C1.

C1	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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
Elevada	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 26 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor C2.

C2	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[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 27 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor J2.

J2	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]
Novo	5,19	2,97	5,29	6,26	228	ND	245	ND	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	ND	250	ND	272	62
Elevado	5,45	3,15	5,56	6,56	232	ND	250	ND	272	56
Longa	5,83	3,31	5,95	6,71	237	ND	256	ND	278	140

Tabela 28 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor J3.

J3	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]
Novo	3,55	2,10	3,63	4,44	226	ND	246	ND	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	ND	255	ND	281	83
Elevado	3,75	2,26	3,82	4,71	232	ND	251	ND	273	62
Longa	3,92	2,31	3,99	4,79	233	ND	253	ND	276	89

Tabela 29 - Valores Médios de Tensão de Referência, Potência e Corrente de Fuga para o Modelo de Varistor K5.

K5	1 mA		2 mA		Corrente de Fuga & Potência					
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	Potência	0,80 U ₁	Potência	0,85 U ₁	Potência
	U ₁ [kV]	[mW]	U ₂ [kV]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]	[μA]	[mW]
Novo	5,65	3,29	5,75	6,81	231	ND	249	ND	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	ND	257	ND	280	103
Elevado	5,67	3,48	5,82	7,20	231	ND	250	ND	272	83
Longa	6,19	3,51	6,29	7,09	236	ND	256	ND	279	112

A Tabela 30 sintetiza os resultados dos ensaios de tensão de referência realizados durante a análise dos grupos de varistores, sendo chave neste caso atentar para as variações que devem ser inferiores ao limite de 15%, principalmente no que tange o quesito de potência dissipada.

Tabela 30 - Resultados para os Variação da Tensão de Referência dos Varistores Analisados.

Modelo	Grupo	Tensão de Referência (kV)			Potência Dissipada (mW)		
		Inicial	Final	Variação	Inicial	Final	Variação
A1	1	3,34	3,45	3,3%	2,00	2,22	11,0%
A2		4,71	4,76	1,06%	2,76	2,80	1,30%
A3		5,13	5,35	4,13%	3,22	3,47	7,77%
B1	2	3,67	3,92	6,79%	2,16	2,52	16,67%
B2		6,46	6,86	6,13%	3,97	4,17	4,88%
C1	3	3,42	3,42	0,0%	2,10	2,22	5,62%
C2		6,91	6,76	-2,11%	4,15	3,84	-7,51%
J2	4	5,19	5,83	12,34%	2,97	3,31	11,23%
J3		3,55	3,92	10,48%	2,10	2,31	9,99%
K5		5,65	6,19	9,64%	3,29	3,51	6,98%

- **Tensão Residual**

As tensões residuais sobre cada varistor foram medidas durante as aplicações dos impulsos de corrente rápidos e de longa duração nos valores de 1,5 kA; 2,5 kA; 5 kA; 10 kA; 40 kA; 65 kA; 75 A e 150 A, respectivamente, sendo os dois últimos valores os relativos aos impulsos de longa duração.

Os valores de tensão residual apresentados referem-se ao valor máximo da forma dos impulsos da tensão residual, conforme mostra a Figura 34 para um impulso rápido com 10 kA de amplitude e forma 8 x 20 µs e a Figura 35 para um impulso de longa duração com 150 A e forma 2.000 µs.

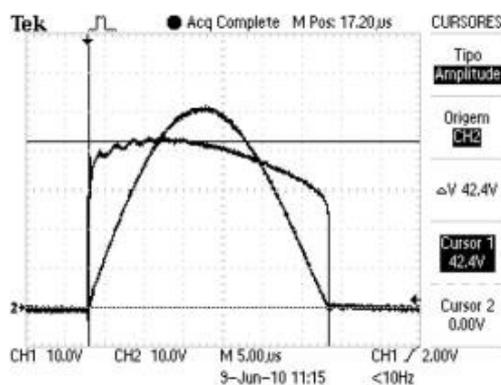


Figura 34 - Tensão Residual para Corrente de Descarga de 10 kA e Forma 8 x 20 µs.

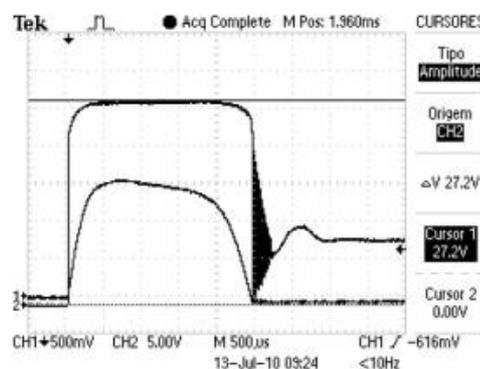


Figura 35 - Tensão Residual para Corrente de Descarga com 150 A e Forma 2.000 µs.

Os valores médios de tensão residual para cada modelo de varistor podem ser vistos na Tabela 31. 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-negrito).

Tabela 31 - Valores Médios de Tensão Residual de Acordo com a Corrente Aplicada.

Amplitude 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 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	16,88	19,70	21,20	16,90	24,64	16,82	27,72	22,88	18,02	23,98
65 kA	21,98	25,42	27,24	22,20	30,48	22,28	32,80	28,26	23,48	29,40
75 A	6,15	8,80	9,44	6,65	11,60	6,28	13,03	8,62	6,16	9,45
150 A	6,50	9,26	9,94	7,03	12,50	6,64	13,73	9,22	6,52	10,28

- *Análise das Falhas Observadas*

Alguns dos varistores ensaiados não suportaram a sequência principal de ensaios. No entanto, outros modelos suportaram, inclusive, uma sequência adicional, composta da aplicação de dois impulsos de 65 kA.

A Tabela 32 indica as falhas dos varistores durante a sequência dos ensaios. Modelos destacados em "itálico" correspondem a conjuntos de amostras em que ocorreram falhas durante sequência principal de ensaios. Os modelos destacados em "negrito" correspondem aos conjuntos de amostras que suportaram toda a sequência de ensaios, inclusive, a realizada adicionalmente com 65 kA de ensaios.

Assim, os modelos B1, B2, J2 e J3 suportaram somente a sequência principal de ensaios estabelecida. Já os modelos A2, A3 e C1 suportaram também a sequência adicional, com impulsos de 65 kA.

Tabela 32 - Falhas dos Varistores de Acordo com a Sequência de Aplicação dos Impulsos.

Modelo	Grupo	Número de Amostras	Número de Falhas				
			10 kA (8 x 20 µs)	40 kA (4 x 10 µs)	75 A (2ms)	150 A (2ms)	65 kA (4 x 10 µs)
A1	1	05	0	1	0	0	0
A2		05	0	0	0	0	0
A3		05	0	0	0	0	0
B1	2	05	0	1	0	0	3
B2		05	0	0	0	0	1
C1	3	05	0	0	0	0	0
C2		05	0	1	0	3	0
J2	4	05	0	0	0	0	1
J3		05	0	0	0	0	1
K5		05	0	1	0	0	0

Algumas falhas observadas durante a aplicação dos impulsos de 40 kA podem ser vistas nas imagens mostradas nas Figuras 36 a 39.



Figura 36 - Varistor A1 - 03 - Falha 40 kA.



Figura 37 - Varistor B1-05 - Falha 40 kA.



Figura 38 - Varistor C2-02 - Falha 40 kA.



Figura 39 - Varistor K5-05 - Falha 40 kA.

Já as falhas durante a aplicação dos impulsos de 150 A podem ser vistas nas imagens mostradas nas Figura 40 a 42.



Figura 40 - Varistor C2-01 - Falha 150 A.



Figura 41 - Varistor C2-04 - Falha 150 A.



Figura 42 - Varistor C2-05 - Falha 150 A.

Finalmente, as falhas durante a aplicação dos impulsos de 65 kA podem ser vistas nas Figuras 43 a 48.



Figura 43 - Varistor B1-01 - Falha 65 kA.



Figura 44 - Varistor B1-02 - Falha 65 kA.



Figura 45 - Varistor B1-03 - Falha 65 kA.



Figura 46 - Varistor B2-02 - Falha 65 kA.



Figura 47 - Varistor J2-02 - Falha 65 kA.



Figura 48 - Varistor J3-03 - Falha 65 kA.

É interessante perceber que, ao se considerar a análise por meio de "Grupos", em vez de por "Modelos", nenhum dos "Grupos" apresentou suportabilidade quando do ensaio de todas as suas amostras. Assim, ao considerar a análise por "Grupos", tem-se os resultados mostrados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados dos Ensaios por Grupo - Fabricante.

<i>Grupo - Fabricante</i>	<i>Número de Amostras</i>	<i>Número de Amostras que Falharam</i>	
		<i>Sequência Principal</i>	<i>Sequência Adicional</i>
1	15	01	-
2	10	01	04
3	10	04	-
4	15	01	02

Os resultados mostrados na Tabela 33, por sua vez, apresentam implicações no que tange ao fato de que, de forma unitária, ocorrem falhas de origem dielétrica quando da aplicação de correntes de descarga elevada. Estas falhas podem, por exemplo, estar ligadas ao manuseio inadequado das amostras ou ainda com a ausência do isolamento extra, provido pelos invólucros em materiais polimérico, que ao aderirem aos varistores durante o processo de injeção fornecem capacidade dielétrica extra ao conjunto. Isto pode ser verificado quando dos ensaios nos módulos dos para-raios.

4.3 Ensaios nos Módulos de Resistores Não Lineares - Parte Ativa dos Para-raios

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados nos quatro grupos de varistores optou-se por descartar parte dos grupos que não suportaram os ensaios de aplicação de corrente de impulso de longa duração (150 A, 2ms). Deste modo, com cada um dos outros três grupos selecionados, o próximo passo foi montar cinco conjuntos de amostras formados por módulos de 15 kV, bem como cinco conjuntos de amostras formados por módulos de 24 kV. Assim sendo, os conjuntos de módulos ensaiados foram projetados com varistores pertencentes aos "Grupos" 1, 2 e 4.

Os conjuntos de módulos foram submetidos à mesma sequência de ensaios aplicada aos varistores. Caso todos os módulos de um conjunto fossem aprovados nesta sequência de ensaios, poderiam seguir para os ensaios de ciclo de operação, idealmente com mais cinco módulos novos.

Os módulos - amostras montadas e ensaiadas com os varistores dos modelos escolhidos possuem as seguintes características:

- Conjunto 1 - 15 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 1" com uma configuração composta por 3 varistores de 5,0 kV com corrente nominal de 5 kA; 2 terminais em alumínio e, por último, 2 camadas de fibra de vidro com

"Resina EPOXI" com uma malha com ângulo aproximado de 50° a 70° envolvendo o conjunto de varistores.

- Conjunto 1 - 24 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 1" com uma configuração composta por 2 varistores de 4,5 kV e 3 varistores de 5,0 kV, com corrente nominal de 5 kA; 2 terminais de alumínio e, por último, 2 camadas de fio de fibra de vidro com "Resina EPOXI" com uma malha com ângulo aproximado de 50° a 70° envolvendo os varistores.
- Conjunto 2 - 15 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 2", com uma configuração composta por 3 varistores de 5,0 kV e corrente nominal de 5 kA, 2 terminais em alumínio e, por último, 2 camadas de fio de fibra de vidro com "Resina EPOXI" com uma malha com ângulo aproximado de 50° a 70° envolvendo o conjunto de varistores.
- Conjunto 2 - 24 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 2", com uma configuração composta por 3 varistores de 3,0 kV e 3 varistores de 5,0 kV, com corrente nominal de 5 kA; 2 terminais de alumínio e, por último, 2 camada de fio de fibra de vidro com "Resina EPOXI" com uma malha com ângulo aproximado de 50° a 70° envolvendo o conjunto de varistores.
- Conjunto 4 - 15 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 4", com uma configuração composta por 3 peças do varistores de 4,5 kV, e corrente nominal de 5 kA (Fabricante considera 5,0 kV, e conforme confirmado pelas medidas de tensão de referência, ver Tabelas 27 e 29 - Modelos J2 e K5); 2 terminais em alumínio e, por último, 2 camadas de fio de fibra de vidro com "Resina EPOXI" com uma malha com ângulo de aproximadamente de 50° a 70°, envolvendo o conjunto de varistores.
- Conjunto 4 - 24 kV - Formado por 05 módulos com varistores do "Grupo 4", com uma configuração composta por 3 varistores de 3,0 kV e 3 varistores de 5,0 kV, com corrente nominal de 5 kA; 2 terminais de alumínio e, por último, 2 camadas

de fio de fibra de vidro com "Resina EPOXI" com uma malha com ângulo de aproximadamente de 50º a 70º, envolvendo o conjunto de varistores.

A Figura 46 mostra alguns módulos ensaiados. Os de menor comprimento possuem tensão nominal de 15 kV e os de maior comprimento, 24 kV.



Figura 49 - Módulo de 15 e 24 kV Construídos pelo Método de Roving - Montagem com Fio de Fibra de Vidro com Resina Epóxi

Nestas montagens, os varistores de menor valor de tensão nominal, que também tem a altura menor, foram colocados entre os dois varistores maiores, para que este por simetria passe a apresentar maior capacidade de dissipar calor evitando entrar em avalanche térmica. Dessa forma, avalia-se o desempenho dos varistores como um conjunto, bem como o processo de montagem dos módulos. Nesta etapa é importante avaliar o módulo com seus invólucros.

Os ensaios nos conjuntos formado pelos módulos 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 de modo a permitir avaliar a evolução destes parâmetros após a aplicação de uma sequência de impulsos de curta e de longa duração, conforme mostrado na Tabela 34.

Deste modo, 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, 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 relacionados com as medições realizadas após a aplicação dos impulsos de curta duração com amplitude de 1,5 kA, 3,0 kA, 5,0 kA e 10 kA e forma 8/20 μ s. A Etapa 3 apresenta os resultados após a aplicação dos impulsos com amplitude de 40 kA e forma 4/10 μ s. Por fim, os resultados da Etapa 4 se referem às medições realizadas após a aplicação dos impulsos de longa duração, 150 A e 250 A com forma de 2.000 μ s.

Tabela 34 - Sequência de Ensaios nos Conjuntos de Módulos

<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 1mA 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 1mA 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 1mA 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 1mA e 2 mA.
Ensaio de RIV	Considerando tensões aplicadas de 1,0 e 1,1 pu.

- *Tensão de Referência e Potência Dissipada*

As Tabelas 35 a 40 fornecem os resultados para as tensões de referência para cada uma das etapas dos ensaios realizados nos conjuntos de módulos desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 35 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 1 - Conjunto 1 & 15 kV

	<i>1mA</i>		<i>2mA</i>		<i>Corrente de Fuga</i>		
	<i>Tensão</i>	<i>Potência</i>	<i>Tensão</i>	<i>Potência</i>	<i>0,75 U₁</i>	<i>0,80 U₁</i>	<i>0,85 U₁</i>
	<i>U₁ [kV]</i>	<i>[W]</i>	<i>U₂ [kV]</i>	<i>[W]</i>	<i>[μA]</i>	<i>[μA]</i>	<i>[μA]</i>
<i>Etapa 1</i>	15,88	9,27	16,19	19,72	266,65	289,85	313,48
<i>Etapa 2</i>	15,05	7,77	15,46	17,21	264,55	288,78	317,85
<i>Etapa 3</i>	14,41	8,16	15,09	17,31	270,03	298,60	334,88
<i>Etapa 4</i>	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 36 - Módulos Montados com Varistores do Grupo 1 - Conjunto 1 & 24 kV

	1mA		2mA		Corrente de Fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	0,80 U ₁	0,85 U ₁
	U ₁ [kV]	[W]	U ₂ [kV]	[W]	[μA]	[μA]	[μA]
Etapa 1	24,83	14,25	25,30	30,09	271,84	295,97	324,05
Etapa 2	23,53	12,97	24,04	26,16	284,06	306,69	333,54
Etapa 3	-	-	-	-	-	-	-
Etapa 4	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 37 - Módulos Montados com Varistores do Grupo2 - Conjunto 2 & 15 kV.

	1mA		2mA		Corrente de Fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	0,80 U ₁	0,85 U ₁
	U ₁ [kV]	[W]	U ₂ [kV]	[W]	[μA]	[μA]	[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 38 - Módulos Montados com Varistores do Grupo2 - Conjunto 2 & 24 kV

	1mA		2mA		Corrente de Fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	0,80 U ₁	0,85 U ₁
	U ₁ [kV]	[W]	U ₂ [kV]	[W]	[μA]	[μA]	[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 39 - Módulos Montados com Varistores do Grupo4 - Conjunto 4 & 15 kV.

	1mA		2mA		Corrente de Fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	0,80 U ₁	0,85 U ₁
	U ₁ [kV]	[W]	U ₂ [kV]	[W]	[μA]	[μA]	[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

Tabela 40 - Módulos Montados com Varistores do Grupo4 - Conjunto 4 & 24 kV.

	1mA		2mA		Corrente de Fuga		
	Tensão	Potência	Tensão	Potência	0,75 U ₁	0,80 U ₁	0,85 U ₁
	U ₁ [kV]	[W]	U ₂ [kV]	[W]	[μA]	[μA]	[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	-	-	-	-	-	-	-

Analisando a Tabela 39, relativa ao conjunto formado pelos de módulos para-raios de 15 kV, do Grupo 4, observa-se uma ligeira tendência de incremento tanto das tensões de referência quanto das potências dissipadas, excetuando-se as medidas realizadas após a Etapa 4. Esperava-se que a tensão de referência apresentasse uma tendência a redução no decorrer da sequência de ensaios. Com exceção das medidas realizadas na Etapa 2, ou seja, após a aplicação de impulsos padronizados considerados como "Solicitações Nominais".

Uma possível explicação para este comportamento se refere à modificação da estrutura cristalina dos grãos de óxido de zinco, após a aplicação dos impulsos, que pode após solicitações extremas resultar em caminhos alternativos para a passagem de corrente. Afora estes pontos as variações nas grandezas de referência encontram-se dentro dos limites especificados de 10 - 15%.

- *Tensão de Rádio Interferência*

As medidas de tensão de rádio interferência - RIV têm a finalidade de avaliar a possibilidade de um equipamento emitir sinais que produzam interferência nas transmissões de rádio, bem como de modo complementar se existem tendências à degradação. De acordo com a IEC 60099-4, o para-raios está aprovado no ensaio apenas se a tensão de rádio interferência apresentar valor inferior a 2.500 μV . O ensaio de tensão de rádio interferência foi realizado no início e o no fim de cada ciclo de ensaios [7].

A Tabela 41 mostra os valores máximos obtidos das tensões de rádio interferência. Como se observa, os 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. Durante os ensaios realizados, todos os módulos avaliados apresentaram valores de RIV abaixo do valor especificado pela norma (2.500 μV).

Tabela 41 - Medição de RIV - Condição Inicial e Final

<i>Conjuntos</i>	<i>RIV – Inicial [μV]</i>	<i>RIV – Final [μV]</i>
<i>Conjunto-1 & 15 kV</i>	1,46	7,25
<i>Conjunto-1 & 24 kV</i>	1,50	8,61
<i>Conjunto-2 & 15 kV</i>	4,62	114,85
<i>Conjunto-2 & 24 kV</i>	6,41	7,71
<i>Conjunto-4 & 15 kV</i>	1,64	6,71
<i>Conjunto-4 & 24 kV</i>	1,72	8,64

- *Tensão Residual*

Os resultados dos ensaios de impulso realizados nas Etapas 3 e 4 da avaliação dos conjunto de módulos é mostrado nas Tabela 42 e 43 que apresentam os valores médios das tensões residuais para os impulsos de curta e longa duração. Estes resultados agregam informações relacionadas ao nível de proteção do para-raios submetido a impulsos atmosféricos e de manobra.

No que se refere às tensões residuais obtidas dos impulsos de curta duração, os valores obtidos, considerando correntes de até 5 kA, são compatíveis com valores normalmente especificados por fabricantes. Os valores de corrente superiores à corrente de descarga nominal resultaram em valores mais elevados de tensão residual, no entanto inferiores aos níveis de suportabilidade frente a impulsos dos equipamentos a serem protegidos - transformadores.

Tabela 42 - Módulos de Para-raios de 15 kV

MÓDULOS	Corrente						
	1,5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	40 kA	150 A	250 A
	Valor Médio da Tensão Residual (kV)						
Grupo 1	32,7	34,4	36,4	40,5	54,1	30,7	31,2
Grupo 2	38,4	40,4	42,5	47,4	NR	36,3	38,4
Grupo 4	32,4	34,7	36,5	40,5	53,9	27,5	31,0

Nota1: Valores destacados indicam que houve falha de amostras e a média foi feita com os resultados das amostras remanescentes.

Nota2: NR- Indica que não foi possível obter a corrente de ensaio por limitações do gerador utilizado.

Tabela 43 - Módulos de Para-raios de 24 kV

MÓDULOS	Corrente						
	1,5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	40 kA	150 A	250 A
	Valor Médio da Tensão Residual (kV)						
Grupo 1	49,4	51,8	55,2	NR	NR	46,4	47,0
Grupo 2	36,9	38,7	77,1	NR	NR	55,5	56,2
Grupo 4	55,5	58,6	60,5	NR	NR	48,3	49,7

Nota: NR- Indica que não foi possível obter a corrente de ensaio por limitações do gerador utilizado.

- *Suportabilidade e Absorção de Energia*

Para a avaliação da suportabilidade e absorção de energia, relacionados aos impulsos de curta e longa duração, foram obtidos os seguintes resultados:

- Grupo 1 - 15 kV: Uma falha em impulso de curta duração, 5 kA; e uma falha em impulso de longa duração, 150 A.
- Grupo 2- 15 kV: Uma falha em impulso de longa duração, 250 A;
- Grupo 4- 15 kV: Nenhuma falha;

Os módulos de 24 kV de todos os fabricantes passaram sem falha aparente. No entanto, é razoável ressaltar que não foram realizados ensaios com amplitudes de corrente superiores a 5 kA nestes módulos.

Finalmente, a análise de um do módulo do Grupo 1 - 15 kV que falhou durante o impulso de 5 kA indica uma provável deficiência no processo de montagem, com alinhamento e compressão inadequados dos varistores.

Após a realização dos ensaios nos módulos dos fabricantes selecionados, foi observado que os módulos montados com os varistores do Grupo 4 apresentaram melhor adequação a sequência de ensaios.

5 Procedimentos e Recomendações para Projeto

Como discutido, para se projetar um para-raios de modo equilibrado é necessário realizar uma série de ensaios de seus componentes em laboratório. Com isso, selecionam-se quais fornecedores se encontram aptos a disponibilizar tecnologia com capacidade de atender os requisitos de qualidade desejados pelo projetista dentro das restrições técnicas, e associadas com a capacidade e regulamentação da unidade de manufatura.

5.1 Ensaios nos Varistores

Para desenvolvimento do projeto, conforme descrito neste texto, foi necessário realizar uma série de ensaios em laboratório nos varistores, avaliando, primeiramente o desempenho das propostas de varistores isoladamente e, finalmente, o da sua associação com outras unidades para compor a parte ativa do para-raios.

Baseiam-se em avaliações das características elétricas, mecânicas e dimensionais. Os principais ensaios realizados nos varistores são os descritos a seguir.

5.1.1 *Ensaio Não Elétricos*

Têm por objetivo verificar o produto antes que entre na linha de produção para que não dificultem ou prejudiquem toda a montagem dos módulos dos para-raios. Com isso pretende-se evitar a ocorrência de elevados volumes de perdas durante a manufatura das unidades. Conforme abordado, os pontos mais importantes a serem observados durante o recebimento dos varistores são os seguintes:

- Dimensionamento;
- Paralelismo das faces;
- Massa;
- Metalização.

5.1.2 *Ensaio Elétricos*

De acordo com a IEC 60099-4, os ensaios elétricos a serem realizados devem ser baseados na sequência dos Ensaio de Tipo conforme mostrado na Tabela 44:

Tabela 44 - Ensaios de Tipo Conforme IEC 60099-4 [7]

<i>Ensaios</i>		<i>10.000 A</i>	<i>5.000 A</i>
1- Suportabilidade da Isolação - Invólucro			
A	Tensão de impulso atmosférico	Sim	Sim
B	Tensão de impulso de manobra	Sim	Sim
C	Tensão suportável a frequência industrial - 60 Hz	Sim	Não
2- Ensaio de Tensão Residual			
A	Impulso de corrente	Sim	Sim
B	Impulso atmosférico	Sim	Sim
C	Impulso de manobra	Sim	Sim
3- Impulso de Corrente de Longa Duração		Sim	Sim
4- Ciclo de Operação			
A	Impulso de alta corrente	Sim	Sim
B	Impulso de manobra	Sim	Não
5- Suportabilidade frente a Curto-Circuito		Sim	Sim
6- Indicador de Falha -Desligador Automático		Sim	Sim
7- Poluição do Invólucro		Sim	Sim
8- Descargas Parciais		Sim	Sim
9- Momento de Flexão		Sim	Sim
10- Ambiental		Sim	Sim
11- Selagem		Sim	Sim
12- RIV		Sim	Sim

Em alternativa à sequência de ensaios prevista nas normas sugere-separa a seleção dos varistores e avaliação dos módulos da parte ativa dos para-raios a sequência não normalizada mostrada na Tabela 45, baseada nos requisitos mínimos recomendados na norma IEC 60099-4, capazes de representar de forma coesa as características necessárias ao desempenho dos para-raios.

Tabela 45 - Sequência de Ensaios Elétricos utilizada em Laboratório.

<i>Sequência Ensaio</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Características</i>
01	Potência e corrente de fuga.	1mA e 2 mA e os valores de 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão medida para 1 mA - Tensão de Referência, sob temperatura ambiente.
02	Potência e corrente de fuga sob temperatura elevada.	1mA e 2 mA e os valores de 0,75, 0,80 e 0,85 vezes a tensão medida para 1 mA - Tensão de Referência, sob 80 °C.
03	Impulsos 8 x 20 µs	Cinco impulsos para os níveis de corrente: 1,5 kA, 2,5 kA, 5,0 kA e 10 kA.
04	Repetição do Item 1	-
05	Impulsos 4 x 10 µs	Dois impulsos de 40 kA.
06	Repetição do Item 1	-
07	Impulsos de longa duração (2ms)	Cinco impulsos para cada os níveis de corrente: 75 A e 150 A.
08	Repetição do Item 1	-
09	Impulso 4 x 10 µs	Dois impulsos de 65 kA.

Os ensaios alternativos permitem trabalhar com uma quantidade reduzida de amostras sem solicitá-las em demasia mantendo padrões de tempo de avaliação e reduzindo custos. Deve-se ressaltar que estes ensaios constituem uma avaliação preliminar, o produto final deve passar pela sequência prevista pela norma.

As solicitações devem ser aplicadas de forma sequencial em cada amostra e não um ensaio por amostra. Dessa forma, é possível verificar e qualificar os varistores para montar a parte ativa de um para-raios, usando como critério de avaliação a integridade do varistor e as variações na corrente de referência e potência dissipada.

I. Ensaio de Corrente de Fuga e Verificação da Tensão de Referência

Este ensaio tem a finalidade de verificar a tensão de referência dos varistores e prover uma comparação com os valores especificados pelo fabricante - fornecedor dos varistores ou do para-raios completo. Em geral a tensão de referência corresponde à tensão que deve ser aplicada a amostra de ensaio, varistor ou para-raios, para que circule a corrente de referência, normalmente especificada em 1mA medida em valores de pico da componente resistiva da corrente de fuga total.

Para uma avaliação mais completa, sugere-se medir também a potência dissipada nesta condição, bem como a tensão e potência dissipada quando se faz uma corrente resistiva com 2mA de pico circular pela amostra de ensaio. A potência dissipada fornece melhor avaliação dos processos de envelhecimento das amostras sob ensaio, pois contempla os fenômenos de polarização que ocorrem quando da aplicação de impulsos de corrente de elevada amplitude.

Em seguida, a tensão deve ser ajustada entre os valores de 75%, 80% e 85% da tensão de referência, medindo-se a corrente de fuga e potência dissipada nestas condições.

Estes ensaios devem ser realizados em amostras novas, sob temperatura ambiente e a 80°C, e repetidos, sob condição de temperatura ambiente, após a aplicação de cada uma das sequências de impulso. As medidas sob 80 °C têm a finalidade de avaliar o desempenho das amostras sob temperaturas elevadas. Esta situação simula as condições de operação na rede onde a circulação das correntes de fuga provocam o aquecimento permanente dos para-raios.

Com os valores obtidos de corrente de fuga e potência dissipada obtidos, é possível avaliar a degradação das amostras durante a realização ao longo dos ensaios propostos neste trabalho.

II. Determinação da Suportabilidade Frente à Solicitações Extremas

Estes ensaios têm por objetivo avaliar os limites de suportabilidade das amostras, formadas por varistores ou módulos de para-raios para altas correntes, bem como determinar os valores médios e máximos de tensão residual que aparecem nos terminais dos para-raios.

Os ensaios seguem a sequência proposta a seguir e, após cada um das avaliações previstas na sequência, devem ser repetidas as medidas de corrente de fuga e potência dissipada, especificadas anteriormente, cujos valores, idealmente não devem apresentar variações superiores, idealmente, a 5%[7].

- Ensaios de Corrente de Descarga com forma 8/20 μs ;
- Ensaios de Corrente de Descarga de Amplitude Elevada com forma – 4/10 μs ;
- Ensaios de Corrente de Longa Duração com forma 2000 μs .

A principal finalidade do "Ensaio de Corrente de Descarga com Forma 8/20 μs " é a determinação da tensão residual nas amostras, estabelecendo os limites que permitem gerar a curva de proteção do para-raios. Devem ser aplicados impulsos de corrente com 1,5 – 3,0 – 5,0 – 10 e 20 kA. Porém, por norma, a corrente de descarga mais usual e importante para qualificar ou não, no caso dos varistores de 10 kA, é a de 20 kA, que é a amplitude de corrente utilizada nos procedimentos para Coordenação de Isolamentos de Redes sem Cabos de Guarda. Sugere-se adotar para estes ensaios a metodologia proposta na Norma IEC 60099-4 [7].

O objetivo do "Ensaio de Corrente de Descarga de Amplitude Elevada com Forma 4/10 μs " é avaliar a suportabilidade na condição extrema de impulsos atmosféricos como definido em norma. A discussão sobre o nível de corrente segue aspectos estatísticos e de fato o fator determinante neste caso é verificar a suportabilidade do sistema de isolamento da coluna de varistores e o grau de degradação associado com a passagem de níveis de correntes elevados. As amostras, varistores ou módulos de para-raios, devem deve suportar 2 impulsos com forma 4/10 μs , com amplitude de:

- 100 kA - Para-raios tipo "*Heavy Duty*" (Serviço Pesado), para instalação em locais submetidos a condições severas de operação, para-raios com corrente de descarga nominal de 10 kA ou 20 kA;

- 65 kA - Para-raios tipo "Normal Duty" (Serviço Normal), para instalação em locais submetidos a condições normais de operação, para-raios com corrente de descarga nominal de 5 kA;
- 40 kA - Para-raios do "Light Duty" (Serviço Leve), para instalação em locais onde não se esperam solicitações elevadas, para-raios com corrente de descarga nominal de 5 kA.

Através deste ensaio são simulados impulsos de corrente próximos aos pontos de instalação dos para-raios, considerados como diretos ao vão e, a partir destes, é possível avaliar sua suportabilidade. O impacto das solicitações geradas por estas amplitudes de corrente se faz na forma de energia - carga que, uma vez, aplicada ao varistor/para-raios pode resultar em falha dielétrica. Neste caso, tratando o desligador automático como parte do para-raios, este também deve suportar estas solicitações sem atuar evitando assim desconectar um para-raios são da rede.

Nestes casos a desconexão implica em: falta de proteção adequada até o momento da troca, custo com uma substituição, normalmente por problemas associados aos índices de continuidade por meio de ferramentas de linha viva e custo de uma nova unidade. É necessário ressaltar que o valor final da operação de substituição das unidades ultrapassa muito o seu custo de aquisição.

O "Ensaio de Corrente de Longa Duração com Forma 2000 μ s" tem a finalidade de verificar a suportabilidade das amostras com relação à correntes de longa duração associadas às componentes contínuas das descargas atmosféricas e quando necessário à descarga em linhas ou como mais comum nas redes de distribuição cabos isolados, que usualmente podem ocasionar falhas por meio de perfuração. Além disso, este ensaio se encontra associado a capacidade de absorção de energia ou carga dos para-raios.

A Norma IEC 60099-4 considera 18 aplicações em 3 grupos no valor de 150 A, porém como algumas especificações estabelecemos o valor de 250 A. Assim, recomenda-se aplicar estes dois níveis de corrente para uma melhor avaliação das unidades [7].

5.1.3 Ensaio Elétricos Extras - Complementares

Os ensaios elétricos extras têm por finalidade dirimir dúvidas sobre o desempenho dos varistores, caso os resultados dos ensaios descritos na Tabela 44 não sejam satisfatórios para garantir a qualificação do fabricante ou componente, porém, demandam

mais tempo e custos. Deste modo, exceto quando da característica de proteção, não devem ser realizados de forma completa durante as etapas iniciais de desenvolvimento dos trabalhos de projeto de um para-raios.

Assim, são eles:

- Levantamento da curva característica de proteção;
- Ensaio de envelhecimento em 1000 horas em temperatura e tensão contínua.

I- Levantamento da Curva Característica de Proteção

Com base nos valores de tensão e corrente obtidos nos ensaios de corrente de fuga, tensão residual para impulsos de longa duração, bem como dos valores de tensão residual dos ensaios de corrente de impulsos com forma $8 \times 20 \mu s$, é possível fazer o levantamento da curva característica do para-raios.

A partir desta curva é possível determinar os valores que caracterizam o para-raios e constituem dados de catálogo, tais como tensão nominal, tensão de operação contínua e máximos valores de tensão residual na região de proteção do para-raios.

II- Ensaio de Envelhecimento em 1000 horas em Temperatura e Tensão Contínua

Este ensaio tem a finalidade de simular os processos de envelhecimento em campo dos para-raios quando submetidos a tensões em frequência industrial, onde, além de condições ambientais adversas, ocorrem fenômenos físico-químicos ativados pelo pequeno aquecimento proveniente da corrente de fuga permanente que circula em direção ao ponto de aterramento.

Em geral, a circulação de corrente de fuga, associada em algumas situações a altas temperaturas, superiores a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ pode fazer com que os varistores que compõem a parte ativa dos para-raios sejam submetidos a um processo de envelhecimento que atua nas regiões contorno de grão, modificando seu modo de absorver energia de forma lenta do sistema - correntes de fuga. Assim, este modo de envelhecimento tende a alterar algumas das características dos varistores como, por exemplo, a tensão de referência o que resulta em valores mais elevados de corrente de fuga e temperatura de operação. O resultado é um processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, chamado de avalanche térmica, até que os varistores entrem em curto. Em algumas situações, caso o desligador automático não atue de maneira satisfatória, é possível que ocorra falha por combustão de todo invólucro.

5.2 Ensaio no Módulo

Os ensaios recomendados para os módulos são os mesmos aplicados aos varistores, exceto a medição da tensão de referência e corrente de fuga com a temperatura do módulo a 80 °C. Também se recomenda realizar ensaios de "Ciclo Operação", que na Norma IEC 60099-4 é tratado conforme mostram as Figuras 50 e 51. Deste modo, é possível avaliar com segurança a montagem do módulo seguindo o que foi descrito neste trabalho com relação ao alinhamento e a posição dos varistores, definição do melhor terminal de alumínio, para que este ajude a dissipar a temperatura do conjunto, bem como verificar qual a melhor tecnologia do invólucro e saia a ser aplicada no desenvolvimento do para-raios.

Medição Inicial	Medição da tensão residual na I_n , 8/20 μ s	1 x I_n 8/20
	Intervalo de tempo não especificado	
Condicionamento	Teste de condicionamento: 4 grupos de 5 impulsos na I_n , 8/20 μ s sobreposto na tensão de operação contínua + 20 %	1,2 U_c 4 x 5 x I_n 8/20
	Intervalo de tempo não especificado, 20° C \pm 15° C	
Ensaio de impulso de alta corrente de trabalho operacional	Impulso de alta corrente, 4/10 Pré-aquecimento para 60° C \pm 3° C Impulso de alta corrente, 4/10	2 x 4/10 μ s
	Tão rápido quanto possível Não maior que 100 ms, ver nota 2	
	Elevar a tensão nominal , 10 s	U_r
	Elevar a tensão de operação contínua, 30 min.	U_c
	Resfriar até a temperatura ambiente, 20° C \pm 15° C	
Medição e exame	Medir a tensão residual na I_n , 8/20	1 x I_n 8/20
	Exame visual do amostras ensaiadas	

I_n = Corrente nominal de descarga.

Figura 50 - Ensaio de Ciclo de Operação em Para-raios de 10 kA. Classe 1 de Descarga de Linha, 5 kA, 2,5 kA, e 1,5 kA [7].

Medição Inicial	Medição da tensão residual na I_n , 8/20 μ s	1 x I_n 8/20
	Intervalo de tempo não especificado	
Condicionamento	Teste de condicionamento: 4 grupos de 5 impulsos na I_n , 8/20 μ s sobreposto na tensão de operação contínua + 20 %	1,2 U_c 4 x 5 x I_n 8/20
	Intervalo de tempo não especificado, 20° C \pm 15° C	
	Impulso de alta corrente condicionamento na secção Resfriamento até a temperatura ambiente Impulso de alta corrente condicionamento na secção	2 x 4/10 μ s
Ensaio de tensão de manobra de trabalho operacional	A peça deve ser separada para uso no futuro	
	Pré-aquecer até 60° C \pm 3° C	
	Impulso de corrente de longa duração	
	50 - 60 s	
	Impulso de corrente de longa duração	
	Tão rápido quanto possível não mais do que 100 ms, ver nota	
	Elevar a tensão nominal, 10 s	U_r
	Elevar a tensão de operação contínua, 30 min.	U_c
	Resfriar até a temperatura ambiente, 20° C \pm 15° C	
Medições e exame	Medir a tensão residual na I_n , 8/20	1 x I_n 8/20 μ s
	Exame visual do amostras ensaiadas	

I_n = Corrente nominal de descarga.

Medição Inicial	Medição da tensão residual na In, 8/20 μ s	1 x In 8/20
	Intervalo de tempo não especificado	
Condicionamento	Teste de condicionamento: 4 grupos de 5 impulsos na In, 8/20 μ s sobreposto na tensão de operação contínua + 20 %	1,2 Uc 4 x 5 x In 8/20
	Intervalo de tempo não especificado, 20° C \pm 15° C	
	Impulso de alta corrente condicionamento na secção Resfriamento até a temperatura ambiente Impulso de alta corrente condicionamento na secção	2 x 4/10 μ s
Ensaio de tensão de manobra de trabalho operacional	A peça deve ser separada para uso no futuro	
	Pré-aquecer até 60° C \pm 3° C	
	Impulso de corrente de longa duração	
	50 - 60 s	
	Impulso de corrente de longa duração	
	Tão rápido quanto possível não mais do que 100 ms, ver nota	
	Elevar a tensão nominal, 10 s	Ur
	Elevar a tensão de operação contínua, 30 min.	Uc
	Resfriar até a temperatura ambiente, 20° C \pm 15° C	
Medições e exame	Medir a tensão residual na In, 8/20	1 x In 8/20 μ s
	Exame visual do amostras ensaiadas	

In = Corrente nominal de descarga.

Figura 51 - Ensaio de Ciclo de Operação em Para-raios de 10 kA. Classes 2 e 3 de Descarga de Linha e 20 kA Classes 4 e 5 de Descarga de Linha [7].

5.3 Ensaio nos Materiais dos Invólucros

Os ensaios nos materiais dos invólucros devem ser executados conforme sua escolha, porcelana, silicone ou PEAD, assim, abaixo estão descritas as normas a serem utilizadas para cada tipo de material:

- Invólucro em Porcelana: Normas IEC 60383-1[10] ou NBR 5032 [11];
- Invólucro em Borracha de Silicone: Normas IEC 61109 [12] ou NBR 15122 [13];
- Invólucro em PEAD: Normas IEC, ASTM, NBR e ABRADDEE [14]- Tabela 45;

Com a definição do material empregado no projeto, selecionam-se entre as normas acima quais serão os ensaios pertinentes ao material os ensaios elétricos associados aos isoladores - sistemas de isolamento. Os ensaios mecânicos finais devem ser executados conforme a normalização específica sobre para-raios no caso IEC 60099-4 ou ANSI C62.11.

Tabela 46 - Ensaio Pertinentes aos Materiais - Invólucros em PEAD.

ENSAIOS	ABRADEE / CODI	ASTM	NBR	IEC
<i>Resistência aos Intemperismos Artificiais</i>	3.2.18.27.1	G-26; G-155		
<i>Temperatura de Fragilização</i>	3.2.18.27.1		7307	
<i>Absorção de H2O</i>	3.2.18.27.1		7040	
<i>Envelhecimento Térmico no Produto</i>	3.2.18.27.1			
<i>Rádio Interferência</i>	3.2.18.27.1		5032	
<i>Tensão Suportável sob Chuva</i>	3.2.18.27.1		5032	
<i>Impulso Atmosférico</i>	3.2.18.27.1		6936	
<i>Tensão Suportável sob Frente Íngreme</i>	3.2.18.27.1		5032	1211
<i>Tensão de Trilhamento Elétrico</i>	3.2.18.27.1			
<i>Resistividade Superficial</i>	3.2.18.27.1	D-257		
<i>Constante Dielétrica ou Permissividade Relativa</i>	3.2.18.27.1	D-150		
<i>Rigidez Dielétrica</i>	3.2.18.27.1	D-149		

6 Resultados Gerais e Projeto Selecionado

6.1 Varistores

Com todas as análises realizadas nos varistores dos fabricantes envolvidos, a escolha da melhor alternativa obedece à sequência abaixo:

1º - Grupo 1 – Origem: China – Tensão nominal: 3,0 kV e 4,5 kV;

2º - Grupo 4 – Origem: EUA – Tensão nominal: 3,0 kV e 4,5 kV;

3º - Grupo 2 – Origem: Japão – Tensão nominal: 3,0 e 5,0 kV;

A escolha acima leva em consideração a relação custo versus benefício. Lembrando que o para-raios montado aqui é o ideal para atender o serviço solicitado em campo de uma rede de distribuição normal de energia elétrica, ou seja, a que se conhece em âmbito urbano e rural.

Para casos de rede de distribuição de energia elétrica com características especiais, deve-se primeiro analisar para qual aplicação e necessidades o para-raios é aplicado e depois sim, aplicar o método descrito neste trabalho e mais as solicitações especiais para escolher o melhor varistor para se utilizar no projeto. É importante ressaltar que a parte que descreve a montagem do módulo do para-raios deve ser seguida para todos os casos, uma vez que esta, basicamente, independe da corrente nominal de descarga dos para-raios.

6.1.1 *Invólucro do Módulo*

Para este trabalho foi escolhido o sistema "Roving", que a trama de fio de fibra de vidro impregnado em "RESINA EPÓXI". O fato de decisão da escolha deste sistema foi o fato de que a empresa envolvida neste trabalho possui e monta os módulos com esta tecnologia.

No entanto, ao analisarem-se os para-raios de outros fabricantes nacionais, verificou-se que a tecnologia utilizada para construir os módulos do para-raios não influencia o desempenho do produto, desde que as condições de montagem e alinhamento sejam obedecidas.

6.1.2 Invólucro Externo

Ao analisar-se as novas tecnologias no mercado de matérias-primas e a crescente utilização de rede compactas, que utilizam o PEAD como matéria-prima na construção dos espaçadores e isoladores, decidiu-se por recomendar sua aplicação nos invólucros dos para-raios, afim de se reduzir os custos de fabricação.

6.1.3 Terminal em Alumínio

Para este projeto, optou-se por um modelo de terminal de alumínio que pode ser construído de forma mais barata e que proporcione um melhor desempenho com relação à ancoragem do Roving, e que garanta a melhor conexão com os varistores, possibilitando trocas de calor com o ambiente externo.

Desta forma, o terminal possui uma liga de alumínio com condutividade bem próxima a da máxima e de fácil usinabilidade, reduzindo-se, assim, as etapas de produção e seu custo final.

6.1.4 Suporte Isolador

Para a construção deste componente, optou-se por construí-lo em Nylon com carga, uma vez que este material plástico atende muito bem as condições elétricas e mecânicas deste tipo de projeto. Lembrando que o projeto do suporte isolador deve obedecer o mesmo tipo de um projeto de isolador de distribuição conforme tensão de operação do para-raios.

7 Comentários Finais

7.1 Conclusões

O conteúdo deste trabalho possibilitou obter conhecimento mais avançado na elaboração e na criação de um produto de proteção que vem sendo utilizado em grande monta por todas as partes do Brasil e do mundo.

Foi possível verificar que não se deve direcionar todas as atenções somente para os varistores utilizados, que sem dúvida são os componentes principais de um para-raios, e devem apresentar boa qualidade para que se obtenha um produto de confiança e eficiência. Porém, existem outros detalhes na construção dos módulos dos para-raios e de outros componentes que o compõe que podem colocar em cheque a qualidade do produto, mesmo quando se utiliza o melhor varistor fabricado no mercado.

Estes detalhes devem também levarem conta o ambiente em que é instalado o para-raios que, por sua vez, afeta a escolha dos varistores. Isto é essencial para que se obtenha uma relação custo versus benefício que atenda a comercialização, de forma que os clientes das empresas que desejam fabricar para-raios venham a receber um produto que atenda as necessidades existentes em campo quando da proteção de equipamentos sensíveis aos surtos de tensão, cujas falhas podem levar os equipamentos protegidos a danos irreversíveis e sua subsequente substituição.

A substituição de um equipamento sensível aos surtos de tensão, como por exemplo, um transformador, que chega a custar dezenas de vezes a mais que os para-raios, sem contabilizar a equipe destinada a executar esta tarefa, é uma condição que a maioria dos gestores das redes de média e alta tensão tem por objetivo evitar.

Assim, este trabalho ajuda a entender de forma mais completa a construção dos para-raios e como os fabricantes podem oferecer um produto de qualidade sem alto custo.

Com os novos incentivos para as tecnologias em materiais poliméricos, principalmente o PEAD, que está sendo muito utilizado no mercado de energia elétrica principalmente em redes compactas, parece ser uma atitude razoável aplicar-se esta tecnologia e material para a fabricação dos invólucros dos para-raios em substituição à Borracha de Silicose. Uma tecnologia que torna os para-raios mais baratos e que possibilita inovar nos processos de manufatura do produto.

Neste trabalho definiram-se ensaios elétricos não normatizados que ajudam a verificar a qualidade do varistor em uma quantidade reduzida de amostras. Estes ensaios já estão sendo aplicados por uma empresa privada para definir a escolha do varistor de três fabricantes de regiões diferentes, mostrando a viabilidade de aplicação do trabalho aqui proposto.

Da mesma forma ocorreu com a construção do módulo ou associação dos varistores para se obter a classe de tensão de operação nominal desejada, uma vez que neste caso quebraram-se vários paradigmas que existiam no universo dos poucos fabricantes existentes no mercado.

Os resultados contidos neste trabalho possibilitam o avanço de estudos de outros sistemas estruturais para a manufatura de módulos, uma vez que os detalhes das características elétricas dos varistores e dos módulos construídos, foram apresentados, discutidos e construídos protótipos que possibilitaram os ensaios e o conteúdo necessário para traçar a lógica da construção do início ao fim de um projeto de para-raios.

Com todo material gerado para este trabalho, foi possível também a criação de idéias para novos produtos como, por exemplo, um desligador automático sem pólvora. Ensaios provam que a utilização de um elo fusível a um sistema mecânico que substitua a pólvora, possibilita maior eficiência e segurança em um componente que representa no mercado de para-raios o maior vilão de problemas e segurança pessoal em uma instalação elétrica no campo.

7.2 Trabalhos Futuros

Aprimorar os métodos de montagem dos módulos de varistores desenvolvendo um dispositivo ou máquina que execute o serviço sem a dependência do manuseio para evitarem-se erros e manter-se contínuo o processo produtivo.

Outros dois trabalhos necessitam de continuidade para tornar os para-raios de distribuição mais eficiente se com custos menores, são eles:

- Invólucros construídos com matéria-prima em PEAD, aperfeiçoando o projeto inicial e desenvolvendo um molde de injeção plástica a fim de possibilitar encaixar o módulo do para-raios, sendo o próprio molde o responsável pela manutenção do alinhamento e da compressão sem a necessidade da utilização de uma estrutura primária. Assim, tem-se um módulo de para-raios construído de forma mais rápida e, ao ser removido

do molde, se encontra pronto para montagem dos demais acessórios, possibilitando o surgimento de um novo produto, o "Isolador para-raios";

- Desligador automático sem pólvora - Após estudos nos desligadores, não detalhado neste trabalho, verificou-se que é possível o desenvolvimento de um desligador automático contendo em seu interior um elemento fusível no lugar da pólvora. Porém, alguns desafios de engenharia devem ser vencidos.

8 Referências Bibliográficas

- [1] http://www.arresterworks.com/history/hall_fame.php acessado no dia 29/10/11
- [2] <http://www.arresterworks.com/history/articles.php> Acessado no dia 29/10/11
- [3] CAVENAGHI, JOSÉ MILTON. **Efeito da prensagem sobre as propriedades elétricas e micro estruturais de um Varistor de ZnO**. Itatiba. 100 p Dissertação (Mestrado). Universidade São Francisco, 2006.
- [4] FRANCO, J. L. **Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão**, Franco Engenharia, São Paulo, 174. 2001.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] IEC 60099-4 – **Metal-oxide surge arresters without gaps for A. C. systems**. International Standard. Edition 2.1. International Electrotechnical Commission.
- [8] ANSI Std. C62-11 – **IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for A. C. Power Circuits (>1kV)**. Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA, 1999.
- [9] IEC 60815/TS - **Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions** - Part 1: Definitions, information and general principles. Edition 1 - 2008-10.
- [10] IEC 60383-1 -**Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V** - Part 1: Ceramic or glass insulator units for A. C. systems - Definitions, test methods and acceptance criteria. 4^a Edition - 1993-04;
- [11]NBR 5032 -**Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistema de corrente alternada**.Segunda Edição 29.10.2004.
- [12] IEC 61109 -**Insulators for overhead lines - Composite suspension and tension insulators for A. C. systems with a nominal voltage greater than 1000 V - Definitions, test methods and acceptance criteria**. Edition 2.0 - 2008-05.
- [13] NBR 15122 -**Isoladores - bastão composto poliméricos para tensão acima de 1000 V**. Primeira edição - 30-07-2008.

- [14] Especificação de Isoladores Tipo Pino Polimérico para Rede Compacta de 13,8 kV a 34,5 kV. Rio de Janeiro: ABRADE, s.d. (CODI-3.2.18.27.1).
- [15] ASTM G-26 -**Practice for Operating Light-Exposure Apparatus (Xenon-Arc Type) With and Without Water for Exposure of Nonmetallic Materials (Withdrawn 2000).**
- [16] ASTM G-155 -**Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials.**
- [17] ASTM D-257 -**Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.**
- [18] ASTM D-150 -**Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation.**
- [19] ASTM D-149 -**Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.**
- [20] NBR 7307 - **Fios e cabos elétricos – Ensaio de fragilização.** Primeira edição - 23/02/2011.
- [21] NBR 7040 -**Fios e cabos elétricos - Absorção de água.** Primeira edição - 30/06/1986.
- [22] NBR 6936 -**Técnicas de ensaios de alta tensão - Procedimentos -**
- [23] IEC 61211 - **Insulator of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage great than 1000 V - Puncture testing - 1^a edition - 1994-06.**
- [24] NBR 6939 - **Coordenação de Isolamento - Procedimento - Nov. 2000;**