

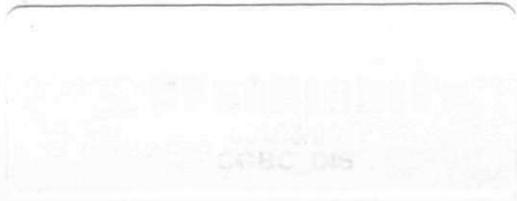
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MESTRADO

**MEDIÇÃO E ANÁLISE HARMÔNICA DA CORRENTE DE FUGA
RESISTIVA EM VARISTORES DE ZNO**

Ronimack Trajano de Souza

© Campina Grande – Paraíba – Brasil
Agosto de 2004.



MEDIÇÃO E ANÁLISE HARMÔNICA DA CORRENTE DE FUGA RESISTIVA EM
VARISTORES DE ZNO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Edson Guedes da Costa
S. R. Naidu
Orientadores

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Agosto de 2004



© 2004, Ronimack Trajano de Souza

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da UFCEG

S719m Souza, Ronimack Trajano de
Medição e análise harmônica da corrente de fuga
resistiva em varistores de ZnO/Ronimack Trajano de
Souza.- Campina Grande: UFCEG, 2004.

74p. il

Dissertação (mestrado) UFCEG/CCT

Inclui bibliografia

1. Análise Harmônica 2. Pára-raios 3. Ponte Virtual
4. Supressores de surto

I – Título

CDU: 621.316.933

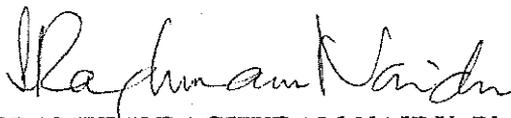
MEDIÇÃO E ANÁLISE HARMÔNICA DA CORRENTE DE FUGA RESISTIVA EM
VARISTORES DE ZNO

RONIMACK TRAJANO DE SOUZA

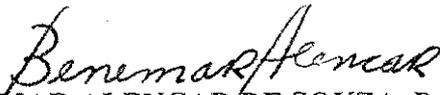
Dissertação Aprovada em 31.08.2004



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG
Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Agosto - 2004

Agradecimentos

A Deus, pela dádiva da vida e pelas graças que Ele tem me concedido.

A minha família por está sempre comigo, mesmo quando a distância era grande.

A Edson pela confiança e, sobretudo pela amizade em todas as horas.

A Geo pela paciência, amor, carinho e, sobretudo pela presença constante.

Aos Professores dos LAT, pela colaboração prestada.

Aos Professores do curso de Eletrotécnica do CEFET/PB, pelo exemplo de dedicação e constante incentivo ao longo dos quatro inesquecíveis anos do curso técnico.

Aos orientadores Profs. Edson Guedes e Naidu pelas diretrizes e permanente incentivo.

Aos co-executores deste trabalho Max Neri, Tarso, Rodolfo e Estácio pelo apoio no desenvolvimento dos ensaios.

Aos Funcionários do LAT (Chico, Eduardo, Adriano, Adalberto) pelo ajuda de sempre.

As protetoras Selma e Dona Lurdes pela amizade.

A Adail pela constante colaboração durante e após o curso de graduação.

Aos parceiros de graduação e amigos da vida José Antônio, José Carlos, Renata, Max Wendel pelo aprendizado durante nossa caminhada.

Aos amigos de ontem, Lourival, Vanessa, ..., e os de hoje, Danny, Alessandro, Kleber, Segundo, ..., sempre prontos a contribuir.

A todos aqueles que forma direta ou indireta, contribuíram para o êxito deste trabalho.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso.

Aos Fundos Setoriais ANEEL-CHESF/ATECEL, pelos equipamentos utilizados nos ensaios.

Sumário

Resumo	xi
Abstract	xii
Introdução	1
Motivação	1
Objetivos	1
Capítulo I	2
1 Fundamentação teórica	2
Introdução	2
1.1 Dispositivos de proteção	2
1.2 Pára-raios à base de Óxido de Zinco	7
Capítulo II	15
2 Revisão bibliográfica	15
Introdução	15
2.1 Harmônicas	15
2.2 Teorema da Amostragem	17
2.3 Harmônicas em pára-raios	18
2.4 Métodos de medição da corrente de fuga resistiva	19
2.4.1 Técnica da compensação - <i>Leakage Current Monitor</i> - LCM	19
2.4.2 Detector portátil usando um sensor de corrente tipo alicate amperímetro ..	22
2.4.3 Método de medição - compensação diferencial capacitiva	23
2.4.4 Método da ponte virtual - uma nova metodologia	25

Capítulo III.....	33
3 Materiais e Métodos.....	33
Introdução.....	33
3.1 Materiais.....	33
3.2 Métodos.....	35
3.2.1 Medição da curva v-i.....	35
3.2.2 Medição da corrente resistiva.....	37
3.2.3 Ensaio de envelhecimento acelerado.....	38
Capítulo IV.....	43
4 Resultados e Discussões.....	43
Introdução.....	43
4.1 Ensaio de sobretensão e análise do sinal da corrente resistiva.....	44
4.2 Ensaio de impulsos de corrente.....	48
4.3 Ensaio de caracterização – medição da curva v-i.....	64
Capítulo V.....	70
5 Conclusões e Sugestões.....	70
5.1 Conclusões.....	70
5.2 Limitações.....	71
5.3 Sugestões.....	71
Referências Bibliográficas.....	72

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D’Ajuz, 1985).....	3
Figura 1.2 - Característica tensão-corrente de pára-raios ideal, ZnO e SiC.....	4
Figura 1.3 - Curva característica de um pára-raios tipo ZnO (Hinrichsen, 2001).....	5
Figura 1.4 – Desenho esquemático de um pára-raios (Steinfeld, 2002).....	6
Figura 1.5 – Pára-raios de ZnO instalado em subestação.....	7
Figura 1.6 - Curvas características densidade de Corrente versus Campo Elétrico para varistores de ZnO em cc e ca (Costa, 1998).....	9
Figura 1.7 – Detalhes microscópicos do varistor de ZnO (Steinfeld, 2002).....	10
Figura 1.8 - Comportamento da densidade de corrente total versus tempo para duas diferentes composições de um varistor de ZnO (Fujiwara, 1982).....	11
Figura 1.9 - Varistor de ZnO (Hinrichsen).....	11
Figura 1.10 - Circuito equivalente de um pára-raios de ZnO (Shirakawa, 1988).....	12
Figura 2.1 – Discretização de um sinal senoidal, amostrado a taxa de $1/\Delta T$ Hz.....	18
Figura 2.2 – Medição da corrente total e corrente de um sensor de campo na base do pára-raios. (Lundquist, 1990).....	20
Figura 2.3 – Partes constituintes do LCM. (TransiNor, 1999).....	21
Figura 2.4 – Sistema detector de corrente total em pára-raios de ZnO (Shirakawa, 1988).....	22
Figura 2.5 - Circuito para medição da corrente resistiva de um varistor de ZnO (Naidu & Srivastava, 1987).....	23
Figura 2.6 - Circuito para medição da corrente resistiva em varistores de ZnO - Método de medição utilizando compensação diferencial capacitiva virtual.....	25
Figura 2.7 - Sequência computacional em diagrama de blocos para a obtenção da corrente resistiva.....	28
Figura 2.8 - Circuito RC a ser validado.....	29
Figura 2.9 - Sinais de tensão no resistor R.....	29
Figura 2.10 - Sinais de tensão no resistor R_2 , ramo do capacitor.....	30
Figura 2.11 - Sinais de corrente resistiva no varistor.....	30

Figura 3.1 – Fotografia do Pára-raios utilizado nos ensaios - (a) Pára-raios novo e (b) Pára-raios aberto.....	34
Figura 3.2 – Varistor utilizado nos ensaios - (a) Desenho do varistor e (b) Fotografia do varistor.....	34
Figura 3.3 – Circuito para obtenção da característica v-i - (a) Desenho do circuito, (b) Fotografia do circuito e (c) mesa de controle.....	36
Figura 3.4 - Circuito para medição da tensão e corrente total de um varistor - (a) Desenho do circuito e (b) Fotografia do circuito.....	38
Figura 3.5 – Seqüência esquemática de aplicação de sobretensão.....	39
Figura 3.6 - Gerador de impulso de corrente.....	40
Figura 3.7 - Arranjo do circuito do gerador para reprodução de impulso de corrente.....	40
Figura 3.8 – Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos.....	41
Figura 4.1 – Diagrama do ensaio de sobretensão aplicada versus tempo - varistor V1.....	46
Figura 4.2 – Corrente de fuga total no varistor V1 no ensaio de sobretensão.....	46
Figura 4.3 – Varistor V1 - descarga lateral devido a estresse elétrico.....	46
Figura 4.4 – Comportamento da corrente de fuga total no patamar I de V1.....	47
Figura 4.5 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V1 após ensaios de sobretensão aplicada.....	48
Figura 4.6 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos no varistor V2.....	49
Figura 4.7(a), (b), (c) e (d) - Sinais de corrente resistiva de V2 antes, nos intervalos entre 2 grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.....	50
Figura 4.8 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V2 após ensaios de impulsos atmosféricos.....	51
Figura 4.9 - Curvas v-i do varistor V5 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.....	52
Figura 4.10 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos nos varistores V5.....	53
Figura 4.11 – Comportamento do sinal de corrente resistiva de V5 após seções de impulsos.....	54
Figura 4.12 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V5 após ensaios de impulso atmosférico.....	54
Figura 4.13 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos nos varistores V6.....	55

Figura 4.14 – Comportamento do sinal de corrente resistiva de V6 após seções de impulsos.	56
Figura 4.15 - Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva de V6 após ensaios de impulso atmosférico.	56
Figura 4.16 – Diagrama esquemático do ensaio de sobretensão aplicada ao varistor V3.	58
Figura 4.17 – Diagrama esquemático da evolução da corrente total no ensaio de sobretensão aplicada ao varistor V3.	59
Figura 4.18 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V3 após ensaios de sobretensão aplicada.	59
Figura 4.19 - Sinais de corrente resistiva de V3 antes e após os ensaios de envelhecimento com sobretensão alternada.	61
Figura 4.20 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos no varistor V3.	61
Figura 4.21(a), (b), (c) e (d) - Sinais de corrente resistiva de V2 antes, nos intervalos entre 2 grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.	63
Figura 4.22 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V2 após ensaios de impulsos atmosféricos.	63
Figura 4.23 - Curvas v-i do varistor V1 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.	65
Figura 4.24 - Curvas v-i do varistor V2 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.	65
Figura 4.25 - Curvas v-i do varistor V3 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.	66
Figura 4.26 - Curvas v-i do varistor V5 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.	67
Figura 4.27 - Curvas v-i do varistor V6 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.	67
Figura 4.28 – Comportamento das correntes no varistor V2 com o aumento da tensão após os ensaios de envelhecimento acelerado.	68

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Ordem, frequência e seqüência das harmônicas	17
Tabela 2.2 – Comparativo entre quatro métodos utilizados para medição da corrente resistiva.....	32
Tabela 3.1 – Principais características dos varistores.	35

RESUMO

A medição e análise harmônica da resistiva têm sido usadas como parâmetros no monitoramento nos pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Os pára-raios a base de ZnO são formados por varistores, elementos que apresentam alta não-linearidade entre a tensão e a corrente. A medição da componente resistiva da corrente de fuga total será realizada utilizando-se o método de compensação capacitiva diferencial virtual – método da ponte virtual desenvolvido neste trabalho. A nova abordagem propõe a eliminação física do capacitor de compensação da ponte diferencial capacitiva. Com o objetivo de validar a análise harmônica da corrente resistiva, como parâmetro eficaz no monitoramento dos pára-raios, varistores de ZnO novos serão degradados paulatinamente com aplicação de sobretensão alternada e impulsos de corrente. Antes e após os ensaios de degradação efetuam-se medições da corrente de fuga resistiva. Figura 2.5 Os resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações demonstram que o método da ponte virtual desenvolvida neste trabalho é eficiente nas medições e na determinação da corrente resistiva e suas harmônicas. Também se constatou que a corrente resistiva e a componente de 3ª harmônica são os parâmetros que mais evidenciam a degradação dos varistores.

ABSTRACT

The measurement and the harmonic analysis of the resistive leakage current is an efficient technique for determining the degradation level of metal oxide surge arresters. The arrester consists of a stack of nonlinear resistive blocks known as varistors. A novel technique for determining the resistive component of the leakage current of ZnO varistors has been presented. It consists of a virtual bridge that does not require a high voltage coupling capacitor. The proposed technique has been applied to monitor the resistive leakage current of ZnO varistors that have been degraded under controlled conditions. The degradation has been obtained by applying high voltages and high impulses current discharges. The resistive waveform has been measured before and after the degradation of the varistors. Measurements and simulations are presented and they show that the 3rd harmonic component of the resistive leakage current is a good indicator of the level degradation of the ZnO varistors.

INTRODUÇÃO

Motivação

Os pára-raios são equipamentos responsáveis por funções de grande importância nos sistemas elétricos de potência, contribuindo decisivamente para a sua confiabilidade, economia e continuidade de operação.

Embora os pára-raios venham sendo utilizados há décadas, ainda não existem técnicas de diagnóstico consensual capaz de indicar quando um pára-raios deva ser retirado de serviço.

A medição e análise harmônica da corrente de fuga resistiva têm se consolidado como parâmetros eficazes no monitoramento nos pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos neste campo de pesquisa. Entretanto, os métodos utilizados para medição da corrente resistiva apresentam em alguns casos resultados com um elevado grau de incerteza. Como também, ainda não há nas literaturas disponíveis, uma metodologia consensual adotada para o monitoramento de pára-raios de ZnO através da análise de harmônicos.

Objetivos

A pesquisa proposta tem como objetivo validar a utilização da “medição e análise da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga resistiva” como um parâmetro eficaz para monitorar a degradação dos pára-raios de ZnO.

É também objetivo deste trabalho desenvolver uma nova metodologia para medição e análise da corrente de fuga resistiva de pára-raios de ZnO em subestação.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Introdução

Neste capítulo são descritos os principais tópicos relacionados a pára-raios, abordando tópicos como evolução, conceitos, características e métodos de monitoramento. Nos métodos de monitoramento é dada maior ênfase ao monitoramento através da medição e análise harmônica da corrente de fuga resistiva do pára-raios.

1.1 Dispositivos de proteção

O uso de dispositivos de proteção surgiu com a simples instalação de centelhadores em paralelo aos equipamentos, passando pelos pára-raios convencionais de carboneto de silício (SiC) com centelhadores, com centelhadores ativos, e mais recentemente, os pára-raios sem centelhadores à base de óxido de zinco (ZnO), também conhecidos como de óxido metálico. Na prática, cada fabricante tem suas especificidades no projeto de pára-raios e algumas diferenças existem de um para outro fabricante.

Na Figura 1.1 é apresentado o processo evolutivo dos dispositivos de proteção.

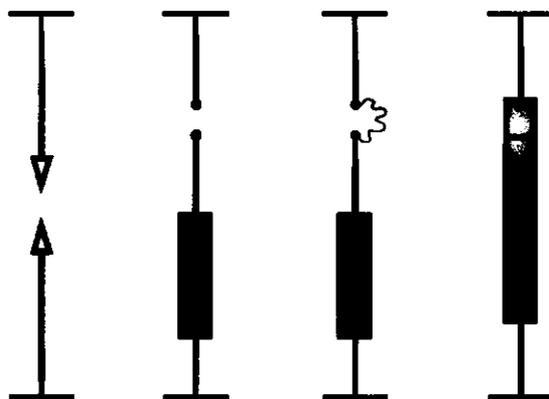


Figura 1.1 – Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'Ajuz, 1985).

Com o crescimento das tensões dos sistemas de transmissão, os pára-raios tiveram o seu desenvolvimento acelerado e hoje se constituem como o principal equipamento de proteção utilizado em sistemas elétricos de potência. Os pára-raios têm como principal função limitar sobretensões provenientes de ocorrências no sistema elétrico (ex. manobras, curtos-circuitos ou descargas atmosféricas), atuando de forma a impedir que valores de tensão acima de um determinado nível preestabelecido possam atingir os outros equipamentos da subestação (D'Ajuz, 1985).

Apesar do pára-raios ser um equipamento imprescindível em subestações de potência, ele se caracteriza como um equipamento de reduzido custo e de pequenas dimensões, quando comparado aos equipamentos que protege. A correta seleção de um pára-raios pode redundar em diminuição significativa de custos para os demais equipamentos, uma vez que o isolamento se constitui em importante parcela no custo de um equipamento de subestação.

De uma forma geral, pode se afirmar que se trata de um equipamento bastante simples do ponto de vista construtivo. O pára-raios é constituído principalmente por elementos resistivos não-lineares, conhecidos como varistores, associados ou não a um centelhador em série. Em operação normal, o pára-raios é semelhante a um circuito aberto. Quando ocorre uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não-linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor. É possível a eliminação do centelhador, utilizando-se somente o varistor, desde que o varistor apresente uma característica não-linear suficientemente adequada para esta finalidade.

Na Figura 1.2 são apresentadas as curvas características tensão-corrente de pára-raios (ideal, ZnO e SiC). O pára-raios ideal seria aquele que iniciaria o processo de condução após a tensão ter alcançado um determinado valor, mantendo a tensão nos seus terminais constante, independentemente do valor da corrente. Na prática o pára-raios ideal não existe, sendo o pára-raios do tipo ZnO o que mais se assemelha desse perfil.

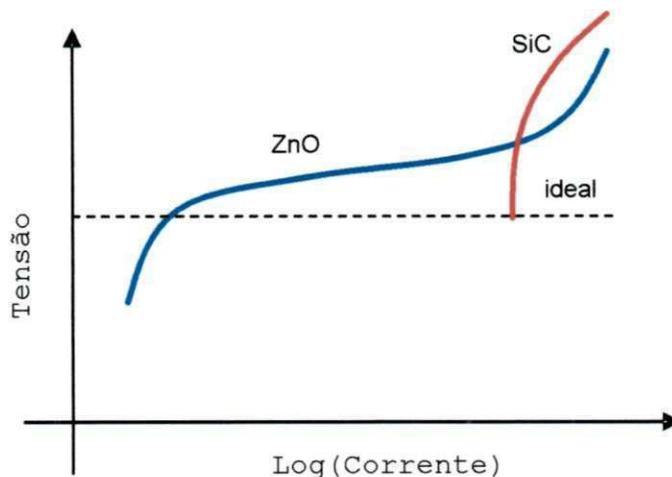


Figura 1.2 - Característica tensão-corrente de pára-raios ideal, ZnO e SiC.

Na prática quando da incidência de uma sobretensão, devido a alta não linearidade tensão-corrente, a resistência entre os terminais do pára-raios se torna muito pequena. Uma corrente de alta intensidade circula pelo pára-raios provocando o afundamento da tensão, conseqüentemente o nível de tensão dos outros equipamentos que ele protege não excede os valores permitidos. Espera-se que um pára-raios mantenha suas características elétricas e mecânicas após ser submetido aos esforços elétricos (Shirakawa, 1988).

Aspectos operacionais

Na Figura 1.3 pode-se visualizar a curva característica v-i de um pára-raios a ser conectado em um sistema de 420 kV. Na curva estão exemplificados alguns termos ou definições dos pára-raios de ZnO, e são listados a seguir:

Corrente de fuga: É a corrente que circula pelo pára-raios quando o mesmo está submetido à tensão.

Tensão nominal: É o valor máximo RMS da tensão na frequência industrial aplicada aos seus terminais no ensaio de ciclo de operação. O valor da tensão nominal é utilizado como um parâmetro de referência para a especificação de suas características de operação (D'Ajuz, 1985).

Tensão de operação contínua (MCOV): É o maior valor RMS da tensão aplicada a seus terminais em condições normais de operação em regime contínuo (IEC 60099-4, Clause 2.9).

Corrente de descarga nominal: É o valor de pico do pulso de corrente que é usado para classificar o pára-raios. Existem cinco diferentes valores para essa corrente: 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA e 20 kA, com forma de onda 8x20 μ s. Na curva característica mostrada na Figura 1.3 o valor da corrente de descarga nominal é de 10 kA.

Tensão residual: Valor da crista da tensão que se estabelece entre os terminais de um pára raios, durante a passagem da corrente de descarga nominal.

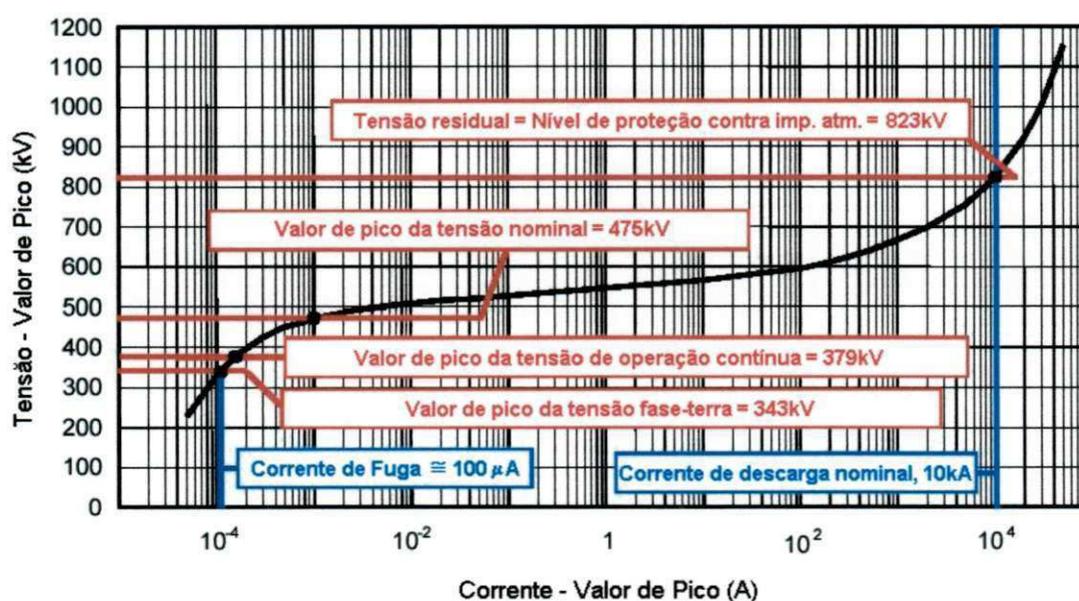


Figura 1.3 - Curva característica de um pára-raios tipo ZnO (Hinrichsen, 2001).

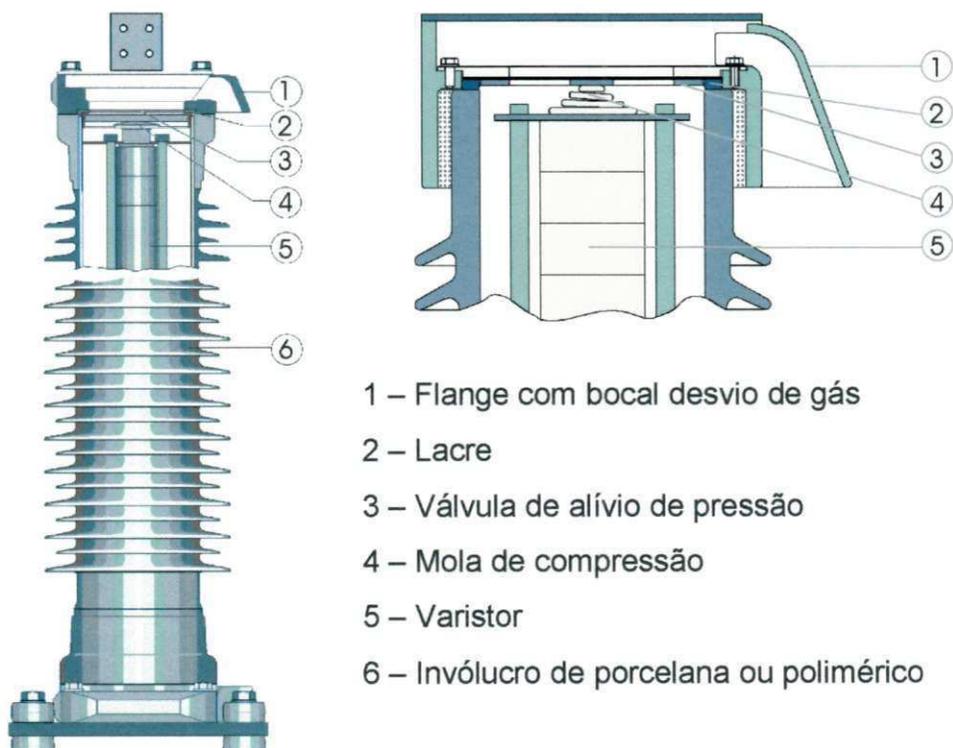
Na Figura 1.4 é mostrado um desenho esquemático de um pára-raios de ZnO e citados os principais elementos que o constitui.

A coluna é constituída de blocos varistores de ZnO e de espaçadores metálicos. Os espaçadores são geralmente tubos de alumínio ou cilindros sólidos que têm a função de proporcionar a melhor distribuição de tensão elétrica nos pára-raios, como também ajudar na dissipação do calor.

A mola de compressão, colocada na extremidade interna da coluna central, tem a função de garantir a pressão necessária e melhoria dos contatos elétricos entre os diversos componentes do pára-raios.

Outra parte de suma importância que constitui o pára-raios é o encapsulamento, que deve possuir uma configuração do invólucro tal que proporcione a mínima circulação de correntes de fuga pela sua superfície externa e garanta a estanqueidade (não permitindo principalmente a entrada de umidade e poluentes). Atualmente, os invólucros produzidos com materiais poliméricos garantem uma maior estanqueidade (Lahti, 2002).

Os pára-raios, principalmente com invólucro de porcelana são dotados ou apresentam uma válvula de alívio de pressão. A válvula de alívio de pressão é uma pequena película, geralmente, de zinco ou aço de alta qualidade. Ela atua quando uma descarga de alta intensidade atinge o pára-raios e sua tensão suportável interna (entre os varistores e a porcelana) é superada. A descarga interna provoca o aumento da temperatura e da pressão interna do gás, conseqüentemente, há possibilidade de ocorrência de explosão que poderia danificar equipamentos vizinhos e até colocar em risco a vida de alguns operadores. Em caso de aumento de pressão acima do esperado esse diafragma rompe, expelindo os gases sob pressão do interior do pára-raios. Como os gases saem ionizados e sobre pressão, o surto passa então a circular pelo lado externo do pára-raios através do flange com bocal para desvio do gás.



- 1 – Flange com bocal desvio de gás
- 2 – Lacre
- 3 – Válvula de alívio de pressão
- 4 – Mola de compressão
- 5 – Varistor
- 6 – Invólucro de porcelana ou polimérico

Figura 1.4 – Desenho esquemático de um pára-raios (Steinfeld, 2002).

Localização dos pára-raios

Um pára-raios é instalado entre fase e terra, geralmente tão próximo quanto possível dos equipamentos que se pretende proteger, sendo os equipamentos principais protegidos diretamente por pára-raios conectados nos seus terminais. Em algumas situações, a proteção de um grupo de equipamentos pode ser feita por um único pára-raios. Uma prática tradicional é a utilização de pára-raios nos transformadores e entradas de linha de uma subestação de potência (D'Ajuz, 1985). É apresentado na Figura 1.5 a localização de um pára-raios para proteção dos equipamentos.

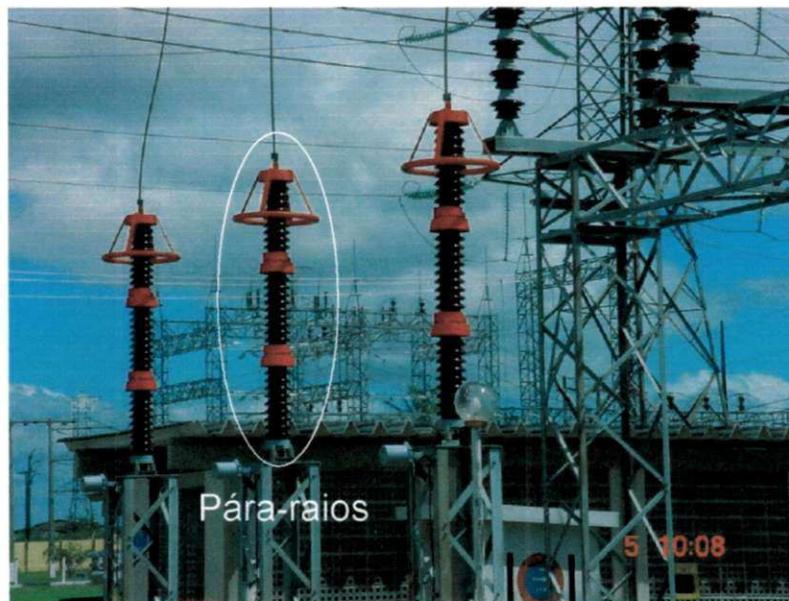


Figura 1.5 – Pára-raios de ZnO instalado em subestação.

1.2 Pára-raios à base de Óxido de Zinco

O surgimento dos pára-raios à base de ZnO modificou sensivelmente a filosofia da coordenação de isolamento suprimindo a maioria das deficiências do pára-raios convencional a base de carboneto de silício, dentre elas: baixa não-linearidade, utilização de centelhadores-série, existência da corrente subsequente. Além disso, o pára-raios de ZnO é compacto, permite o aumento da capacidade de absorção de energia, permite a redução do nível de isolamento dos equipamentos e é um ótimo dispositivo para proteção de surtos em transmissão de potência em cc com alta tensão (Kobayashi, 1986).

A eficiência no funcionamento do pára-raios a base de óxido de zinco está no comportamento altamente não-linear da relação tensão-corrente dos seus varistores. Nos sistemas de transmissão, os pára-raios de ZnO são diretamente instalados entre a fase e terra. Desse modo, uma pequena corrente de fuga para terra circula continuamente pelos varistores de ZnO.

Os varistores de ZnO

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

Até o final da década de 60, os varistores utilizados eram constituídos por carboneto de silício. Os varistores de SiC apresentavam várias deficiências, entre elas a baixa não-linearidade, utilização de centelhadores-série, existência da corrente subsequente (Costa, 1998).

Com a evolução da ciência dos materiais, em 1968 a Matsushita Electric descobriu as características não-lineares de um composto cerâmico à base de óxido de zinco. As características elétricas não-lineares das cerâmicas à base de óxido de zinco foram relatadas inicialmente por MATSOUKA (1971). O seu trabalho pioneiro possibilitou o desenvolvimento de pára-raios modernos, os quais estão sendo extensivamente aplicados na proteção dos equipamentos elétricos contra sobretensões que ocorrem nos sistemas de potência. Um pára-raios de óxido de zinco, em especial, é constituído principalmente por elementos varistores, também denominados de elementos não-lineares, discos, blocos ou pastilhas de ZnO. Os blocos são dispostos em formas de uma ou mais colunas. As colunas são envolvidas por um invólucro de porcelana de forma cilíndrica com aletas ou são moldadas em material polimérico, com formato semelhante ao da porcelana (Costa, 1999).

Os varistores à base de óxido de zinco apresentam uma alta não-linearidade, tornando dispensável o uso de centelhadores-série, características elétricas e térmicas mais aperfeiçoadas que os varistores de SiC. A característica não-linear do ZnO é muito superior ao SiC. Considerando-se a expressão $I = kV^n$ para a característica do resistor não-linear, é verificado que o SiC apresenta a ordem do expoente “n” compreendido entre 4 e 6 enquanto que o ZnO apresenta um expoente “n” na ordem de 25 a 30 (D’Ajuz, 1985).

A característica v-i do varistor de ZnO pode ser dividida em três regiões da curva, conforme apresentado na Figura 1.6.

Região linear de baixa corrente: a característica v-i é aproximadamente ôhmica nesta região, não há degradação do bloco varistor nesta região (Shirakawa, 1988).

Região não-linear: é a principal região da curva v-i do varistor de ZnO, nessa região, um pequeno incremento na tensão aplicada provoca a condução de uma grande quantidade de corrente. Na região não-linear ocorre a degradação acelerada do varistor e o conseqüente aumento das correntes total e da corrente resistiva com o tempo (Shirakawa, 1988).

Região de alta corrente: a região de alta corrente apresenta densidade de corrente superior a 10^3 A/cm^2 . Esta região apresenta-se com comportamento linear, isto é, a tensão volta a crescer com o aumento da corrente e o mecanismo de condução é controlado pela impedância dos grãos de ZnO (Costa, 1998).

Nas suas aplicações, o pára-raios ou um único varistor utiliza todas as regiões da sua curva característica. A região de baixa corrente define as perdas ativas, conseqüentemente, a tensão de operação para aplicações em regime de uso contínuo. A região não-linear determina a tensão residual na aplicação de um surto. A região de alta corrente apresenta a condição limite para proteção contra surtos de alta corrente (Costa, 1998).

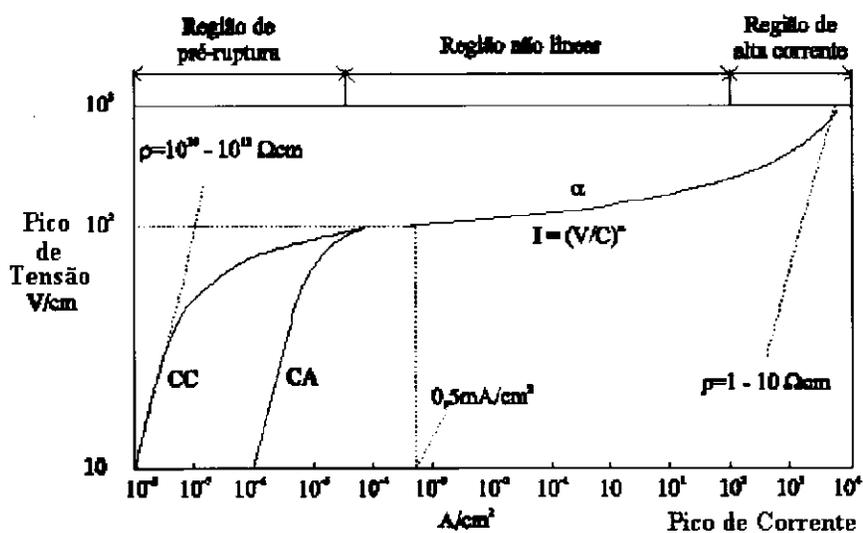


Figura 1.6 - Curvas características densidade de corrente versus campo elétrico para varistores de ZnO em cc e ca (Costa, 1998).

O varistor à base de ZnO consiste de aproximadamente 90 a 95 % de óxido de zinco e de 10 a 5 % formado por outros óxidos, tais como: bismuto, antimônio, cobalto, manganês, etc. A origem do comportamento não-linear está relacionada com as características microestruturais dos varistores que são dependentes do tipo de processamento empregado e da natureza dos dopantes. O bismuto e o antimônio são responsáveis pela formação da região intergranular, barreiras físicas e elétricas adjacentes aos grãos de óxido de zinco. A região intergranular é responsável pelas características exclusivas de não linearidade do varistor (Steinfeld, 2002). Para o varistor atingir a homogeneidade, os óxidos são misturados e aquecidos a uma temperatura superior a 1200 °C (Hinrichsen, 2001). Na Figura 1.7 é apresentada um desenho do varistor de ZnO em escala microscópica, sendo os grãos de ZnO separados por óxido bismuto.

A física, a química, o processo de fabricação, a microestrutura e os defeitos nos varistores à base de ZnO não são objetos deste trabalho, entretanto, informações adicionais podem ser encontradas em: W. E. CORPORATION (1983), CESI (1989), EDA (1985), GUPTA (1985), COSTA (1995) e nas referências citadas por GUPTA (1990) e EDA (1985).



Figura 1.7 – Detalhes microscópicos do varistor de ZnO (Steinfeld, 2002).

Fujikawa, 1982 constatou a partir de ensaios de tensão aplicada, que a corrente de fuga pode apresentar variações bem distintas, dependendo da quantidade e dos aditivos usados na fabricação, bem como do processo de aquecimento do varistor. Na Figura 1.8 é apresentado o comportamento da densidade de corrente com o tempo para dois varistores com características de fabricação distintas.

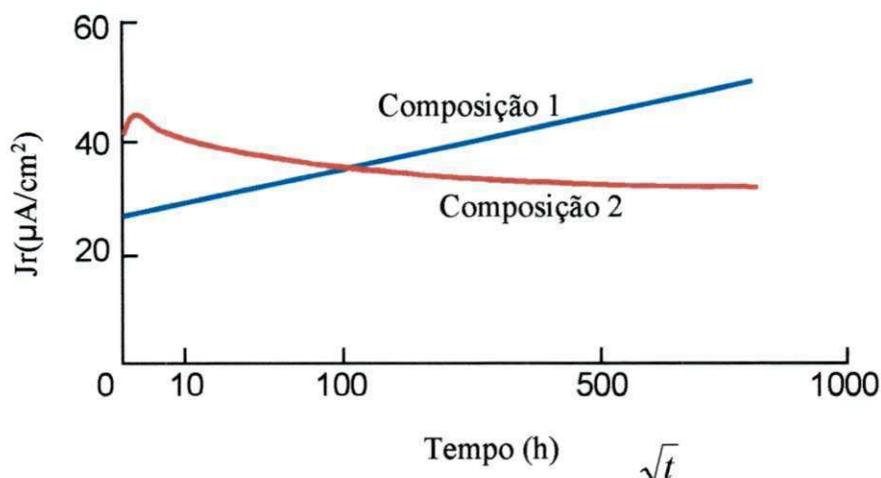


Figura 1.8 - Comportamento da densidade de corrente total versus tempo para duas diferentes composições de um varistor de ZnO (Fujiwara, 1982).

Os varistores são quase sempre cilíndricos. O diâmetro varia geralmente de 30 *mm* até cerca de 100 *mm*, quanto maior o diâmetro maior a capacidade de absorção de energia. A altura varia de 20 *mm* a 45 *mm*, sendo dependente do sistema de produção. Um varistor deve apresentar uniformidade de suas características em todo o seu volume. Quanto maior a altura e o diâmetro mais difícil é para se produzir um varistor homogêneo. Na Figura 1.9 é apresentada uma fotografia de varistores do tipo ZnO de diferentes dimensões.



Figura 1.9 - Varistor de ZnO (Hinrichsen, 2001).

Modelo elétrico do varistor de ZnO

Os varistores de ZnO, mesmo novos, devido as suas características, apresentam uma corrente de fuga quando submetido a uma tensão elétrica. A corrente elétrica que circula pelo varistor apresenta duas componentes (capacitiva e resistiva). A Figura 1.10 apresenta o circuito elétrico equivalente de um varistor de ZnO, onde:

R_s – Resistência dos grãos de ZnO; R_p – Resistência não-linear da região intergranular e C_p – Capacitância formada pelos grãos de ZnO. A corrente resistiva, de característica não-linear é responsável pelas perdas elétricas e pelo envelhecimento dos blocos de ZnO. A corrente resistiva apresenta em condições normais de operação do pára-raios um valor baixo quando comparado a componente capacitiva.

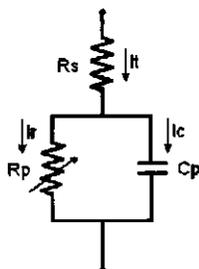


Figura 1.10 - Circuito equivalente de um pára-raios de ZnO (Shirakawa, 1988).

Fatores de degradação dos varistores de ZnO

Os principais fatores que contribuem diretamente e mais significativamente para a degradação dos varistores de ZnO são:

Perda de estanqueidade e penetração de umidade: A absorção de umidade se dá através da infiltração por trincas que se formam, ao longo do tempo, na cimentação entre as porcelanas e flanges. A umidade no interior do pára-raios altera significativamente a característica v-i, aumentando a corrente resistiva na tensão de operação do pára-raios.

Contaminação externa da porcelana: O acúmulo de materiais poluentes na superfície da porcelana do pára-raios acarreta a elevação da corrente de fuga pela porcelana, provocando uma distribuição de tensão não uniforme ao longo do mesmo com conseqüente aquecimento excessivo. O aquecimento excessivo provoca o envelhecimento precoce dos varistores de ZnO. O efeito da contaminação externa é menos crítica em invólucros poliméricos a base de silicone.

Descargas internas (corona): A ocorrência de descargas internas é capaz de produzir alterações irreversíveis na composição interna do gás de enchimento, queima de oxigênio e criação de componentes químicos que prejudicam as propriedades químicas e dielétricas do material isolante que recobre a superfície do varistor, desviando correntes para sua superfície, podendo comprometer a integridade dos componentes dos pára-raios em operações futuras. A ausência de oxigênio e a

criação de novos gases gerados pelas descargas parciais são responsáveis pelo envelhecimento acelerado de todos ou alguns blocos de ZnO.

Descargas de longa duração ou de alta intensidade/curta duração:

Chaveamentos de grandes bancos de capacitores ou de linhas longas em vazio podem solicitar severamente os pára-raios, acarretando, normalmente, queima ou rachaduras (marcas, trincas) em algum ou todos os varistores. Impulsos de alta intensidade e de curta duração podem concentrar-se num único ponto, perfurando os varistores. Eda, em 1984 estudou o comportamento de varistores quando solicitados a impulsos de alta intensidade e cc. Ele também relata que existem dois modos de destruição: a ruptura (quebra ou fratura) e a perfuração (queima local ou microquebras). Ele também estudou o efeito do tamanho do elemento na sua destruição, através da energia de destruição em função da área do varistor.

Monitoramento de pára-raio de ZnO

Embora os pára-raios venham sendo utilizados a alguns decênios, ainda não existem técnicas de diagnóstico consensual capaz de indicar quando devem ser retirados de serviço (Sobrinho, 2001). Um dos principais problemas ao se diagnosticar o equipamento é a dificuldade de inspeção interna dos componentes, principalmente dos varistores e juntas de vedação sem destruí-lo. Devido a sua importância para o sistema elétrico, as principais razões para se monitorar/diagnosticar os pára-raios em serviço são:

- Aumento da confiabilidade dos pára-raios em serviço e redução dos custos operacionais das empresas de energia elétrica;
- Detecção de pára-raios envelhecidos permitindo a retirada na eminência de falha;
- Previsão em alguns casos de possíveis causas de degradação dos pára-raios.

As principais técnicas de monitoração e diagnóstico utilizadas atualmente para os pára-raios de ZnO são:

Medição das perdas dielétricas: Ensaio realizado com a ponte *Doble* (equipamento que mede o fator de potência e as perdas dielétricas). O diagnóstico do pára-raios após o ensaio é feito por comparação dos resultados com valores típicos para pára-raios similares, ou por medições comparativas com unidades adjacentes.

Medição da resistência de isolamento (*Megger*): Este ensaio, da mesma forma que o de medição de perdas dielétricas, é feito por comparação com resultados

de ensaios de aceitação, com valores típicos para pára-raios similares, ou por medições comparativas com unidades adjacentes.

Medições termográficas (termovisão): A termografia é uma técnica já consagrada em diversos serviços de manutenção de equipamentos elétricos, tendo grande praticidade de uso e a vantagem de não exigir o desligamento dos equipamentos sob inspeção. Nas medições termográficas são obtidas “fotografias” da temperatura na superfície do pára-raios, com o objetivo de localizar pontos quentes. Cuidados especiais de leitura devem-se tomar, uma vez que pequenos diferenciais de temperatura podem indicar início de defeitos nos pára-raios.

Medição e decomposição harmônica da corrente de fuga resistiva: Medição realizável no campo tem o objetivo de monitorar a evolução da corrente de fuga que circula nos varistores e que circula externamente sobre a porcelana. O método de monitoração através da medição corrente resistiva exige cuidados quando a tensão aplicada possui um componente de 3ª harmônica. Uma onda de tensão distorcida com 5% de 3ª harmônica pode proporcionar uma corrente de fuga com a componente de 3ª harmônica variando de 5 μA a 70 μA , dependendo do ângulo relativo entre a componente fundamental e a componente de 3ª harmônica (Heinrich & Hinrichsen, 2001). Quando a onda de tensão é distorcida pela presença de 3ª harmônica existem componentes de 3ª harmônica na parte da corrente de fuga capacitiva e também na parte da corrente de fuga resistiva, não é possível separar as duas componentes por meio de análise harmônica. Está descrita em (Lundquist, 1990) uma técnica para compensar a contribuição capacitiva da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga.

Nas medições de corrente de fuga resistiva é vital que se façam medições logo após a entrada em operação do pára-raios. Estas medições devem ser efetuadas regularmente (recomendação do fabricante entre 3 e 6 meses), especialmente em locais onde existe muita poluição causada por indústrias ou salinidade (Sobrinho, 2001). O diagnóstico após o ensaio de medição da corrente resistiva é feito por comparação dos resultados com os valores da corrente de fuga resistiva quando o pára-raios estava novo.

O próximo capítulo apresentará uma revisão bibliográfica sobre os métodos que utilizam a medição da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva como parâmetro para monitoramento dos pára-raios de ZnO.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Introdução

Este capítulo descreve uma breve revisão bibliográfica sobre harmônicas, harmônicas em pára-raios, métodos de medição da corrente de fuga e uma abordagem a uma nova metodologia proposta para obtenção da corrente de fuga resistiva nos pára-raios de ZnO.

2.1 Harmônicas

O sistema elétrico de geração e distribuição, bem como as instalações consumidoras são projetadas para operar com tensões e correntes senoidais. Entretanto, alguns equipamentos do próprio sistema, notadamente as cargas, deformam os sinais senoidais puros. Equipamentos como: computadores, reatores eletrônicos, variadores de velocidade e fontes de alimentação variável, em geral, todos os equipamentos baseados em componentes de eletrônica de potência tais como diodos, tiristores, transistores, triacs, diacs, produzem perturbações nos sinais de tensão e corrente. A essas perturbações dá-se o nome de distorção harmônica. (Moreno, 2001)

Como mencionado anteriormente, a distorção na forma de onda da corrente é provocada principalmente pela carga, ao passo que a distorção de tensão é

produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação. Essa situação se agrava paulatinamente uma vez que, se a tensão é deformada, as correntes nas cargas também se deformam e, se as correntes se deformam, as tensões se deformam mais ainda e assim por diante. Após os sinais serem distorcidos ou deformados deixam de ser puramente senoidais, porém ainda periódicos.

As ondas periódicas de forma não-senoidal que aparecem nos sistemas de potência podem ser compostas da superposição de uma componente direta com uma componente senoidal na frequência fundamental, e em um número finito de sinais senoidais cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação, chamadas harmônicas. Assim, um sinal de tensão V_f pode ser expresso conforme Equação 2.1.

$$V_f = V_{f_0} + V_{f_1} \text{sen}(wt + \theta_{f_1}) + \dots + V_{f_n} \text{sen}(nwt + \theta_{f_n}) \quad (2.1)$$

Em que:

- V_f é o valor instantâneo em qualquer tempo t ;
- V_{f_0} é o valor direto ou médio;
- V_{f_n} é o valor máximo da componente de n -ésima harmônica;
- θ_{f_n} define a referência angular relativa e $w = 2\pi f$, em que f é a frequência da componente fundamental.

O sinal V_f da Equação 2.1 é uma representação do sinal no domínio do tempo. Para se determinar o valor dos parâmetros V_{f_n} , θ_{f_n} é necessário utilizar técnicas de análise de sinais, transformando o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Para determinar as componentes harmônicas de um sinal é utilizada uma técnica bastante conhecida, a transformada de Fourier, desenvolvida por Jean Fourier (1768-1830).

Quando um sinal no tempo é transformado para o domínio da frequência, ele é representado pelo espectro harmônico. O chamado espectro harmônico é a representação no domínio da frequência, da forma de onda do sinal em suas componentes harmônicas na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência (Moreno, 2001).

As harmônicas são classificadas quanto às suas ordem, frequência e seqüência. Na Tabela 2.1 são apresentados os parâmetros que classificam as harmônicas para uma frequência de 60 Hz.

Tabela 2.1 - Ordem, frequência e seqüência das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	

Conforme apresentado na Tabela 2.1 as harmônicas podem ser ímpares ou pares. As harmônicas ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral, enquanto que as pares existem quando os sinais apresentam nível cc ou componente contínua.

Quanto à seqüência, as harmônicas podem ser de seqüência positiva, negativa ou nula. Uma analogia de fácil compreensão para se entender o que representa a seqüência das harmônicas é analisar os efeitos da seqüência das harmônicas em um motor assíncrono. Em um motor assíncrono as harmônicas de seqüência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando sobrecorrente nos enrolamentos e aquecimento indesejável. As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando o motor e também causando aquecimento indesejado. As harmônicas de seqüência nula não provocam efeitos no sentido do motor, porém somam-se algebricamente no condutor neutro. (Moreno, 2001).

2.2 Teorema da Amostragem

A transformação de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência requer inicialmente que o sinal no tempo seja discretizado. Ao processo de discretização do sinal dá-se o nome de amostragem. Amostragem é o processo básico para a transmissão de um sinal na forma digital, na qual uma forma de onda ou função temporal contínua é discretizada no tempo de forma a permitir posteriormente sua perfeita reconstrução (Pollock, 1999).

Contudo, para que seja possível a perfeita reconstrução de um sinal é essencial que a função temporal seja limitada em frequência ou harmônica, isto é, sua transformada de Fourier é zero exceto em um intervalo finito do espectro harmônico.

Segundo o teorema de Nyquist, para amostrar um sinal temporal contínuo limitado em frequência f em Hertz (ou $\omega = 2\pi f$ rad/s) e, posteriormente, reconstruí-lo perfeitamente, a mínima frequência de amostragem necessária é de $2f$ Hertz (ou 2ω rad/s), ou seja, o dobro da largura de banda do sinal. A frequência de amostragem é definida por $f_A = 1/\Delta T$, onde ΔT representa o intervalo de tempo entre a aquisição de dois pontos consecutivos do sinal. Na Figura 2.1 é apresentado a discretização de um sinal senoidal a uma frequência de amostragem de $f_A = 1/\Delta T$ Hz.

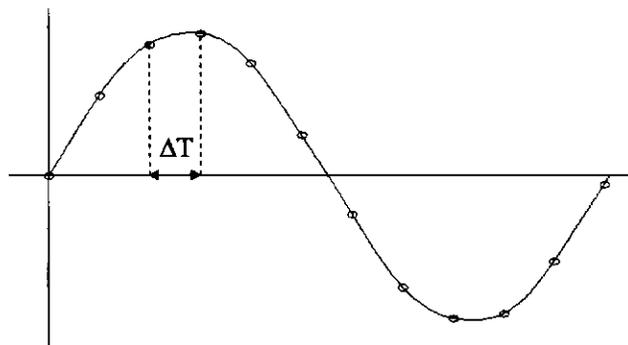


Figura 2.1 – Discretização de um sinal senoidal, amostrado a taxa de $1/\Delta T$ Hz.

2.3 Harmônicas em pára-raios

Com o envelhecimento do pára-raios, há o aumento gradual da corrente de fuga e o conseqüente aumento da componente resistiva com o tempo. O aumento pode conduzir à instabilidade térmica do pára-raios e sua falha completa. O aumento da corrente de fuga é mais significativo na componente resistiva da corrente, principalmente na componente de 3ª harmônica. Assim, através da análise do sinal da componente resistiva da corrente de fuga pode-se monitorar o estado de degradação do pára-raios (Shirakawa et al, 1988).

Para a análise do estado da degradação de um pára-raios através da análise harmônica é sugerido que sejam realizadas medições de corrente de fuga resistiva antes que o pára-raios seja conectado ao sistema elétrico. Caso o pára-raios de ZnO já esteja instalado, a sua componente resistiva da corrente deve ser medida em um tempo mais curto possível. A medição inicial com o pára-raios novo é a melhor referência para comparação com futuras medições. Devido à forte influência da temperatura

sobre a componente resistiva da corrente, é recomendável a correção do valor para corrente medida para uma temperatura padronizada.

Um grande problema para o monitoramento de pára-raios baseados em análise da harmônica de 3ª ordem da corrente resistiva tem sido a presença de harmônicas de 3ª ordem no sinal da tensão. As harmônicas na tensão aumentam ainda mais a distorção do sinal de corrente do varistor. Considerando um pára-raios com uma corrente capacitiva de 1 mA de pico, 1 % de harmônica de 3ª ordem no sinal de tensão gera uma corrente capacitiva de aproximadamente 30 μ A de pico, que apresenta a mesma ordem de magnitude de um sinal típico de corrente resistiva do pára-raios (Lundquist, 1990). Assim, podem ser introduzidos erros na determinação da componente de 3ª ordem da corrente resistiva.

Serão apresentados a seguir alguns métodos utilizados para obtenção da corrente de fuga resistiva em pára-raios de ZnO.

2.4 Métodos de medição da corrente de fuga resistiva

Para a análise do espectro harmônico da corrente de fuga resistiva, e conseqüentemente o estado do pára-raios, é necessário inicialmente separar as componentes capacitiva e resistiva que compõem a corrente de fuga total do pára-raios. Devido à impossibilidade de se medir isoladamente apenas a componente resistiva é necessária a implementação de um circuito para obtenção da componente resistiva.

2.4.1 Técnica da compensação - *Leakage Current Monitor* - LCM

Em 1990, as empresas ABB e Transinor desenvolveram, conjuntamente, um novo método para medição da corrente resistiva com compensação da componente de 3ª harmônica presente na tensão. O método é baseado em uma técnica de compensação onde a influência na corrente resistiva devido a harmônica de 3ª ordem presente na tensão é minimizada (Lundquist, 1990).

Para a compensação da harmônica de 3ª ordem da tensão, é obtido um sinal de tensão através de um sensor de campo elétrico conectado na base do pára-raios, conforme apresentado na Figura 2.2.

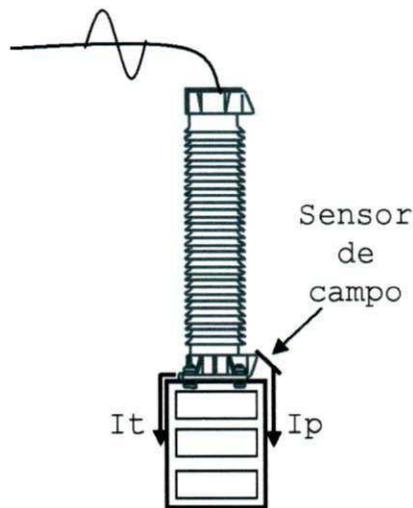


Figura 2.2 – Medição da corrente total e corrente de um sensor de campo na base do pára-raios. (Lundquist, 1990).

As harmônicas de 3ª ordem da tensão geram uma corrente capacitiva de 3ª ordem (I_{3c}) de mesma frequência (Lundquist, 1990). Desse modo, determinando I_{3c} e a corrente total de 3ª ordem (I_{3t}), pode-se determinar a corrente resistiva de terceira ordem (I_{3r}), conforme Equação 2.2.

$$\bar{I}_{3r} = \bar{I}_{3t} - \bar{I}_{3c} \quad (2.2)$$

Então, para se determinar a corrente resistiva de 3ª ordem faz-se necessário medir as componentes I_{3t} e I_{3c} . Pelo método desenvolvido, a componente I_{3t} é medida através de um sensor de corrente tipo alicate amperímetro. A componente I_{3c} é obtida a partir da corrente I_p , a corrente I_p é medida através do sensor de campo elétrico localizado na base do pára-raios, Figura 2.2. A relação entre as correntes I_c e I_p foi obtida através de ensaios experimentais, e é expressa conforme Equação 2.3.

$$\bar{I}_{3c} = 0,75 \cdot \frac{I_{1t}}{I_{1p}} \bar{I}_{3p} \quad (2.3)$$

Assim, a componente de 3ª da corrente resistiva pode ser determinada conforme Equação 2.4.

$$\bar{I}_{3r} = \bar{I}_{3t} - 0,75 \cdot \frac{I_{1t}}{I_{1p}} \bar{I}_{3p} \quad (2.4)$$

A partir do valor da componente de 3ª da corrente resistiva é feita uma estimativa do valor de pico da corrente resistiva.

Na Figura 2.3 são apresentadas as partes constituintes do LCM. O equipamento é composto de três partes principais:

- Um sensor de corrente conectado a um transformador de corrente.
- Um sensor de campo elétrico, conectado ao sensor de corrente via cabo coaxial e um adaptador.
- Um instrumento para processamento dos sinais dos sensores e cálculo da corrente resistiva.

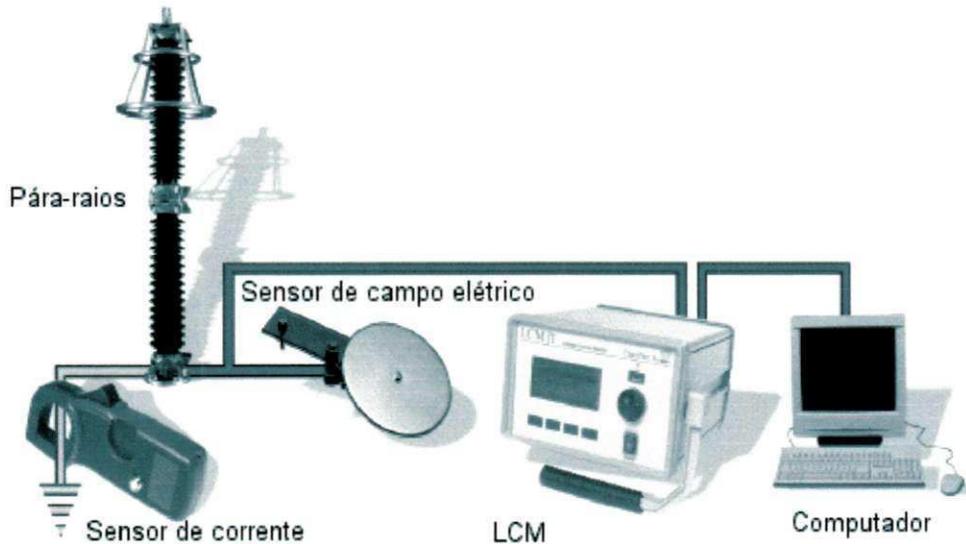


Figura 2.3 – Partes constituintes do LCM. (TransiNor, 1999)

Os valores medidos podem ser lidos no painel do equipamento ou transferidos a um PC para impressão e criação de um banco de dados ou ainda para apresentação gráfica.

A precisão dos resultados depende da configuração do para-raios e dos níveis da tensão aplicada. A margem de erro na relação entre a corrente resistiva total e a componente resistiva de 3ª harmônica pode ser de 20 a 25 % dependendo da tensão de carregamento do para-raios, entretanto, em medições comparativas para um mesmo para-raios os resultados são mais precisos (Lundquist, 1990).

Apesar de o método apresentar eficiência comprovada, o método é limitado para medições comparativas, ou seja, na primeira medição com para-raios novo admite-se que a corrente de fuga resistiva inicial é de 0,3 p.u. Caso o valor da corrente ultrapasse 1,0 p.u. ao longo de sua vida útil, o para-raios deve ser retirado de serviço (TransiNor, 1999). Segundo o fabricante do equipamento, os resultados de medições com o LCM apresentam melhores resultados para os para-raios da ABB a uma temperatura ambiente de 20°C.

Para uma maior eficiência no monitoramento do pára-raios, o fabricante do LCM recomenda que sejam realizadas regularmente, medições de corrente de fuga resistiva em pára-raios localizados em ambientes com altos níveis de poluição atmosférica, como também após situações especiais de faltas no sistema causando sobretensões temporárias de elevada amplitude e/ou longa duração, que impõem solicitações severas aos pára-raios.

2.4.2 Detector portátil usando um sensor de corrente tipo alicate amperímetro

Em 1988, Shirakawa e outros desenvolveram um método para medição da corrente resistiva de 3ª harmônica. Trata-se de um equipamento portátil que se utiliza um sensor de corrente tipo alicate amperímetro para medição da corrente de fuga total do pára-raios. O equipamento se baseia na análise da 3ª harmônica do fluxo da corrente de fuga total dos pára-raios.

O sinal de corrente total é obtido, filtrado e amplificado. Depois de filtrado e amplificado o sinal de corrente é convertido em um sinal de tensão proporcional ao pico da 3ª harmônica da corrente total, V_c . O sinal V_c é comparado a uma curva de referência medida em laboratório, a partir da curva de referência e do sinal V_c é determinado o valor da corrente resistiva. Na Figura 2.4 são apresentadas as partes constituintes do sistema detector. O equipamento é composto de duas partes principais:

- Um sensor de corrente;
- Um sistema detector contendo filtro passa-faixa e amperímetros.

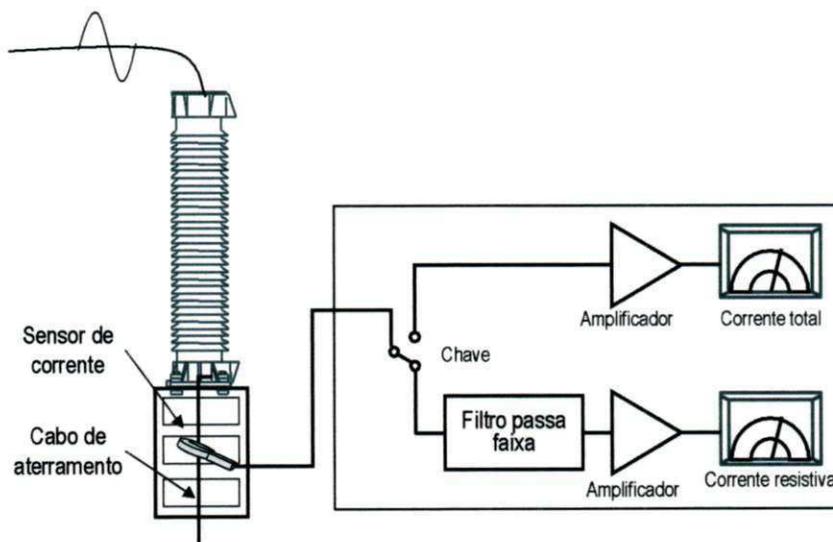


Figura 2.4 – Sistema detector de corrente total em pára-raios de ZnO (Shirakawa, 1988).

Os valores medidos podem ser lidos no painel do equipamento através de amperímetros ou transferidos a um osciloscópio. A precisão dos resultados depende da amplitude da componente de 3ª harmônica na tensão do sistema, e quanto menor a corrente de fuga resistiva maior a margem de erro. Como exemplo, um sinal de tensão do sistema com conteúdo de 3ª harmônica de 1,5 %, para uma corrente de fuga resistiva de 0,1 mA o erro de medição pode variar de 20 a 40 % (Shirakawa, 1988).

O método apresenta alta dependência da qualidade do sinal da tensão, a presença de harmônicas de 3ª ordem no sinal da tensão pode provocar altos níveis de imprecisão nos resultados. Além disso, o método usa uma curva de referência (tensão-corrente resistiva) que pode induzir erros ainda maiores, dado que pára-raios com as mesmas características de fabricação podem apresentar diferenças significativas nas curvas características tensão-corrente.

2.4.3 Método de medição - compensação diferencial capacitiva

Conforme apresentado na Revisão Bibliográfica, a corrente total (i_t) que circula pelo varistor de ZnO apresenta duas componentes (i_c e i_a), componentes capacitiva e resistiva respectivamente.

Assim, para se obter a corrente resistiva “ i_a ” faz-se necessário cancelar a componente “ i_c ” da corrente total “ i_t ”. Na Figura 2.5 é apresentado o circuito para medição da corrente resistiva em pára-raios, ponte diferencial. O circuito é baseado no método de compensação diferencial utilizando-se de um ramo adicional formado por um capacitor para alta tensão e um resistor para baixa tensão para cancelar a componente capacitiva.

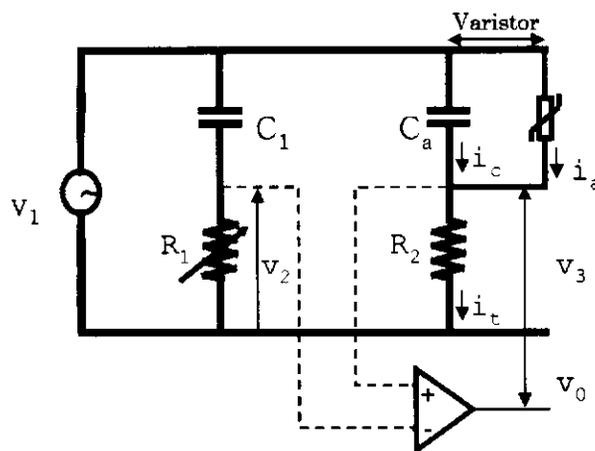


Figura 2.5 - Circuito para medição da corrente resistiva de um varistor de ZnO (Naidu & Srivastava, 1987).

A corrente resistiva é determinada quando os sinais v_1 e v_0 estão em fase. Os sinais são colocados em fase através do ajuste do resistor R_1 .

A equação diferencial para a tensão de saída v_0 , é obtida conforme apresentado na Equação 2.5.

$$v_o = R_2 \cdot C_a \cdot \frac{d}{dt}[v_1 - v_3] - R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{d}{dt}[v_1 - v_2] + R_2 \cdot i_a \quad (2.5)$$

Quando a ponte diferencial está em equilíbrio, tem-se: $R_2 C_a = R_1 C_1 = T$, então:

$$T \cdot \frac{dv_o}{dt} + v_o = R_2 \cdot i_a \quad (2.6)$$

Utilizando o capacitor C_1 de modo que $\omega_h \cdot T \ll 1$, onde ω_h representa a frequência de maior ordem do sinal v_0 , então, o primeiro termo da Equação 2.3 pode ser cancelado (Naidu & Srivastava, 1987).

Desse modo, a corrente resistiva é dada por:

$$i_a = \frac{v_o}{R_2} \quad (2.7)$$

Na análise precedente foi assumido que o varistor apresenta uma capacitância (C_a) praticamente constante e que o resistor R_s é praticamente nulo quando comparado com o resistor não linear R_p . Como se trata de uma ponte com compensação capacitiva, o circuito não é influenciado pela presença de harmônicas na tensão do sistema, isto é, as harmônicas presentes no sinal de tensão não provocam erros significativos na medição da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva.

O método apresenta resultados mais confiáveis que os métodos anteriormente mencionados, visto que os sinais são medidos diretamente. Entretanto, a precisão dos resultados é altamente dependente da qualidade do capacitor de compensação C_1 , ou seja, C_1 deve possuir impedância tal que $1/\omega C \gg R$.

Ao se utilizar um capacitor com tangente de perdas ($\tan \delta$) de 0,01, a relação entre os valores exatos e medidos pode chegar a 23 % para a componente de 3ª harmônica (Naidu & Srivastava, 1987).

Embora o circuito mostrado na Figura 2.5 apresente resultados satisfatórios nas medições, há alguns inconvenientes. Para se obter resultado confiável nas medições é necessário que o valor da resistência R_1 seja ajustada a cada aquisição dos sinais. Este procedimento torna o circuito inadequado para medições durante um

período de tempo relativamente longo. Outros inconvenientes são: a verificação se o sinal da corrente resistiva está em fase com o sinal da tensão de entrada é feita através da análise visual, o que pode induzir a aquisição de sinais imprecisos da corrente resistiva. Além disso, o circuito se torna inadequado para medições de corrente de pára-raios em serviço, devido à necessidade do ramo do capacitor de compensação C_1 e do resistor R_1 , limitando o circuito para ensaios em laboratório.

O erro apresentado nos resultados deve-se ao fato de considerar que a corrente resistiva que circula pelo ramo do capacitor de compensação C e do resistor R é nula.

2.4.4 Método da ponte virtual - uma nova metodologia

Conforme demonstrado anteriormente, o método da compensação diferencial apresenta resultados confiáveis, e mais precisos que os métodos LCM e detector portátil, salvo algumas limitações apresentadas.

De posse que o método da compensação capacitiva diferencial apresenta resultados confiáveis, e com o objetivo de superar os inconvenientes e limitações apresentadas pelo método, uma nova abordagem foi sugerida e implementada. A nova abordagem propõe a eliminação física do capacitor de compensação do circuito apresentado na Figura 2.5.

Na Figura 2.6 é apresentado o circuito para medição da corrente resistiva com o ramo RC pontilhado, sendo inserido no circuito para fins didáticos.

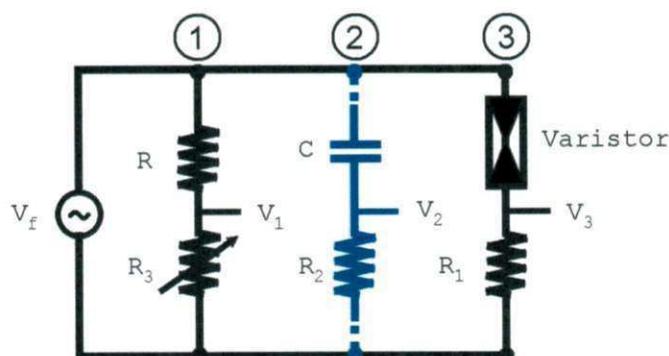


Figura 2.6 - Circuito para medição da corrente resistiva em varistores de ZnO - Método de medição utilizando compensação diferencial capacitiva virtual.

Na implementação sugerida, a compensação capacitiva será feita através de rotinas computacionais, utilizando um capacitor ideal ($\tan \delta = 0$). Com isso, torna-se necessário medir apenas o sinal V_f (forma de onda da tensão aplicada ao varistor ou

pára-raios) e o sinal de corrente total no varistor. A implementação proposta torna adequada a medição com compensação diferencial capacitiva para pára-raios em serviço, além de minimizar os erros apresentados quando se utiliza o capacitor “fisicamente”. Nas medições de pára-raios em serviço, o sinal de corrente pode ser medido com um alicate amperímetro de alta precisão e o sinal de tensão coletado de um transformador de potencial, próximo ao pára-raios.

O método implementado é aplicável para medições em laboratório bem como aos pára-raios instalados em subestações, desde que seja possível medir os sinais de tensão e corrente. Os valores medidos são adquiridos por um osciloscópio digital e transferidos a um PC para o cálculo da corrente resistiva.

A implementação do sinal do ramo RC torna-se possível utilizando transformada de Fourier e técnicas de análise de circuitos de primeira ordem. O programa computacional para o cálculo do sinal da corrente resistiva é dividido em duas etapas, como segue:

- Simulação de um ramo RC a ser utilizado na compensação capacitiva da corrente de fuga total e,
- Realização de operações matemáticas com os sinais e determinar o sinal da corrente resistiva.

Simulando o sinal V_2

Para o cálculo do sinal V_2 (sinal virtual do ramo RC) através de simulação computacional é necessário adquirir e digitalizar previamente a forma de onda do sinal da fonte (V_f). Tendo o sinal V_f , determinam-se as amplitudes e fase das harmônicas. Assim, o sinal V_2 pode ser expresso conforme a Equação 2.8.

$$V_2 = \frac{V_{f1}}{|Z_1|} \text{sen}(wt + \theta_{f1} + \phi_1) + \frac{V_{f2}}{|Z_2|} \text{sen}(2wt + \theta_{f2} + \phi_2) + \dots + \frac{V_{fn}}{|Z_n|} \text{sen}(nwt + \theta_{fn} + \phi_n). \quad (2.8)$$

Em que, $Z_n = R_2 - j \cdot (1/m\omega C)$, $|Z_n|$ é o valor absoluto de Z_n e ϕ_n é o ângulo de Z_n .

Equacionamento para obtenção da corrente resistiva

O equacionamento para obtenção da corrente de fuga resistiva através da ponte virtual está apresentado nas Equações 2.6 a 2.10, como segue. Considerando-se que os sinais V_2 e V_3 apresentam componentes resistiva e capacitiva, eles podem ser expressos conforme as Equações 2.9 e 2.10.

$$V_2 = V_{2r} + jV_{2c} \quad (2.9)$$

$$V_3 = V_{3r} + jV_{3c} \quad (2.10)$$

Variando-se as resistências dos resistores R_1 e R_2 de modo que $V_{2c} = V_{3c}$ e realizando uma subtração entre as Equações 2.9 e 2.10, tem-se:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = V_{2r} - V_{3r} \quad (2.11)$$

Observa-se na Equação 2.11 que o sinal V_{23} apresenta somente parte real. Para se obter o sinal proporcional a corrente resistiva no varistor (V_{3r}) é necessário cancelar a componente V_{2r} do sinal V_{23} . Sendo os valores de R_2 e C conhecidos, determina-se a componente V_{2r} do sinal de tensão V_2 . Subtraindo-se o sinal V_{2r} do sinal V_{23} , tem-se:

$$V_{23} - V_{2r} = (V_{2r} - V_{3r}) - V_{2r} = -V_{3r} \quad (2.12)$$

O V_{3r} apresenta a mesma forma de onda do sinal de corrente de fuga resistiva (i_a), assim, a corrente resistiva pode ser expressa conforme a Equação 2.13.

$$i_a = \frac{V_{3r}}{R_1} \quad (2.13)$$

Na Figura 2.7 é apresentada a seqüência computacional em diagrama de blocos para a obtenção da corrente de fuga resistiva. Para o cálculo da forma de onda de V_2 , o valor da capacitância do capacitor de compensação C é admitido constante. Nos ensaios em laboratório e nas simulações implementas utilizou-se uma capacitância de 1 200 pF. Mantendo-se o valor da capacitância constante, o valor da resistência do resistor R_2 é calculado através de iterações, até que os sinais V_{23} e V_f estejam em fase. A seqüência de passos desenvolvida pela rotina é:

- O usuário define o valor inicial de R_2 e C (Figura 2.6);
- Calcula-se o sinal V_2 ;
- Calcula-se o sinal V_{23} ($V_2 - V_3$);
- Verifica se os sinais V_{23} e V_f estão em fase, caso os sinais estejam em fase o programa calcula a corrente resistiva (Equações 2.12 e 2.13), caso não estejam em fase há um incremento no valor da resistência de R_2 até que os sinais V_{23} e V_f estejam em fase.

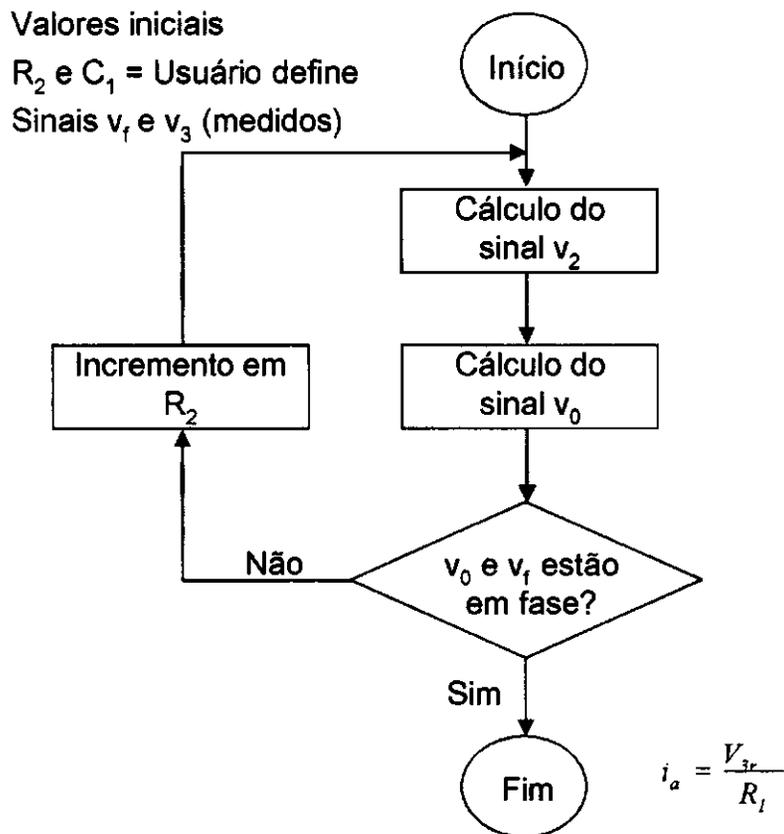


Figura 2.7 - Seqüência computacional em diagrama de blocos para a obtenção da corrente resistiva.

Validação

Conforme apresentado anteriormente, o método proposto consta da simulação de um ramo RC, a ser utilizado na compensação capacitiva da corrente de fuga total, como também, realiza operações matemáticas com os sinais medidos e simulados para se determinar o sinal da corrente resistiva do pára-raios. Desse modo, o método foi validado inicialmente utilizando um circuito RC. Para comparar os sinais medidos e simulados foi utilizado um capacitor de $10 \pm 5\% \mu\text{F}$ e quatro resistores de $150 \pm 5\% \Omega$, cada. Na Figura 2.8 é apresentado um circuito RC a ser validado. Foram utilizados quatro resistores para o aumento da potência do ramo RC. Foi aplicado um sinal de tensão V_f de 14,7 V (RMS). Para fins de comparação e validação da rotina, foi medido o sinal de tensão nos resistores R e o sinal de tensão V_f da fonte. A análise harmônica do sinal de tensão aplicado foi realizada e identificou a fundamental de 60 Hz e harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

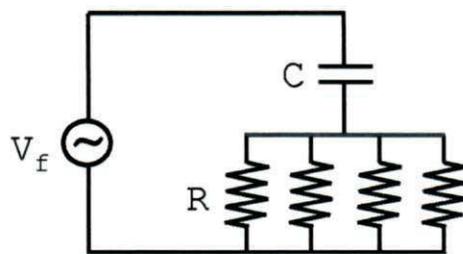


Figura 2.8 - Circuito RC a ser validado.

Através da rotina computacional desenvolvida foi determinado o espectro harmônico do sinal de tensão V_f e simulado o sinal de tensão nos resistores R. Na Figura 2.9 são apresentados os sinais medidos e simulados nos resistores R.

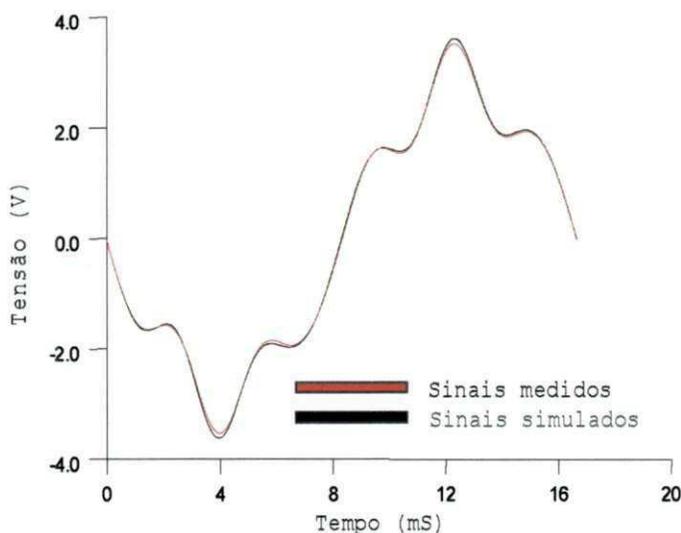


Figura 2.9 - Sinais de tensão no resistor R.

O segundo ensaio foi realizado empregando-se o circuito de compensação diferencial apresentado na Figura 2.6. O circuito utiliza uma capacitância de 1 200 pF, e uma resistência (R_2) de 270 Ω , um varistor com tensão de operação contínua de 6 kV e um resistor variável (R_1). Foi aplicada sobretensão de 8,3 kV (RMS). A análise harmônica do sinal de tensão aplicado identificou a fundamental de 60 Hz e harmônicas de 3ª e 5ª ordem, com baixa amplitude. O circuito foi ajustado para permitir a obtenção da corrente resistiva no varistor. Medições experimentais foram realizadas e os sinais de tensão V_1 , V_2 e V_3 do circuito da Figura 2.6 foram adquiridos.

Através da rotina computacional desenvolvida foi determinado o espectro harmônico do sinal de tensão V_f , e simulado o sinal de tensão no resistor R_2 . Os sinais medidos, de tensão no ramo do capacitor e de corrente resistiva no varistor, foram comparados com os sinais gerados pela rotina computacional e estão apresentados nas

Figura 2.10 e Figura 2.11, respectivamente. A discrepância entre os sinais apresentados na Figura 2.10 pode ser atribuída às perdas do capacitor de alta tensão.

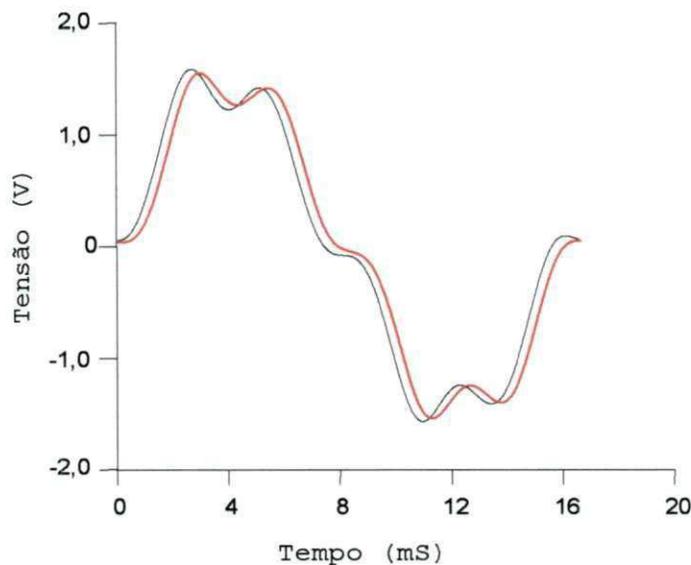


Figura 2.10 - Sinais de tensão no resistor R₂, ramo do capacitor.

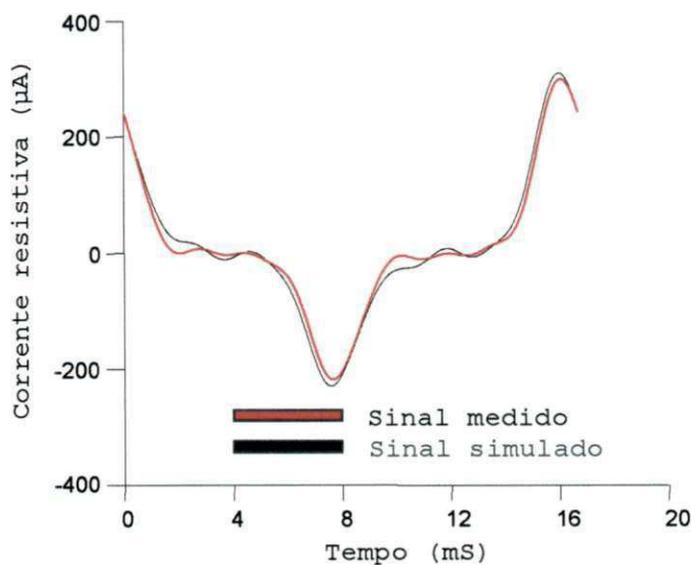


Figura 2.11 - Sinais de corrente resistiva no varistor.

Embora ainda não se tenha realizado medições em campo (subestação) para se avaliar a precisão do método, os resultados obtidos em laboratório induzem a prever resultados no mínimo mais precisos que o LCM. Há duas razões que dão suporte a esta afirmação:

1. Nas medições em campo será utilizado um sensor de corrente para se medir a corrente total, como o LCM também utiliza o mesmo princípio para medição da corrente total, logo, os erros seriam equivalentes;

2. A compensação da corrente capacitiva com o LCM é obtida através de um sensor de campo, que também apresenta erros. Com o método da ponte virtual a compensação capacitiva é obtida através de uma ponte diferencial, cujo princípio de obtenção da corrente resistiva foi comprovado analiticamente nas Equações 2.5 a 2.7. Na ponte virtual ao invés de se utilizar um capacitor real, que apresenta $\tan \delta$, utiliza-se um capacitor virtual ideal, que não apresenta $\tan \delta$. Utilizando-se o método da ponte virtual, o erro apresentado na compensação capacitiva da corrente depende da precisão ao se obter o sinal da tensão aplicada ao pára-raios. Nas medições em campo o sinal da tensão aplicada ao pára-raios será obtido a partir de um transformador de potencial de medição, cuja margem de erro é inferior a 1%. Assim, estima-se que o erro na determinação da corrente resistiva será inferior a 1%.

Benefícios do método implementado

- Acompanhamento da evolução da degradação do pára-raios através da análise harmônica da corrente de fuga resistiva sem interferir no sistema;
- O método de medição (ponte virtual) é independente da frequência, ou seja, a influência das harmônicas da tensão na corrente capacitiva do pára-raios é compensada pelo capacitor do ramo RC;
- O programa para o cálculo da corrente resistiva é de fácil utilização;
- Determinação da componente resistiva da corrente de fuga;
- Os sinais necessários para o cálculo da corrente resistiva são medidos diretamente, sendo mínimas as interferências dos equipamentos adjacentes;
- O erro apresentado nos resultados depende do grau de precisão do transformador de potencial e da precisão do sensor de corrente.

Na Tabela 2.2 é apresentado um comparativo entre os quatro métodos mencionados para medição da corrente resistiva em pára-raios.

Tabela 2.2 – Comparativo entre quatro métodos utilizados para medição da corrente resistiva

	LCM	Amplificador diferencial	Detector portátil	Ponte virtual
Compensação de harmônicas na tensão	Sim (aproximação)	Independente da frequência	Não	Independente da frequência
Equipamentos necessários	LCM (Sensor, medidor de corrente, equipamento para processamento dos sinais)	Implementável somente em laboratório	Sensor de corrente, filtro passa faixa, equipamento para cálculo da corrente resistiva.	Computador, Osciloscópio digital, Sensor de corrente de precisão.
Determinação da componente de 3ª harmônica	Medição da corrente total e compensação da corrente capacitiva	Análise harmônica do sinal de corrente resistiva	Medição da corrente total e estimativa da corrente resistiva.	Análise harmônica da corrente resistiva
Monitoramento em serviço	Sim	Não	Sim	Sim

Os resultados evidenciam que o método proposto é eficiente e minimiza os na determinação do sinal da corrente resistiva, quando comparado aos outros métodos apresentados. Assim, por ser um método com características próprias para instalação em laboratório e em campo, uma das aplicações principais da ponte virtual é o monitoramento da corrente de fuga de pára-raios em serviço.

O próximo capítulo apresentará os materiais e métodos utilizados na realização dos ensaios de envelhecimento acelerado com tensão alternada e impulsos de corrente atmosférica.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Introdução

Este capítulo descreve os materiais e os métodos utilizados na validação de um parâmetro capaz de monitorar com eficiência a degradação dos pára-raios de ZnO. O trabalho compreende uma parte experimental, e outra parte constituída do desenvolvimento e implementação de uma rotina computacional e estudos de caso. A parte experimental consta de ensaios de levantamento da curva característica v-i dos pára-raios, ensaios de envelhecimento acelerado com tensão aplicada na frequência industrial variando-se o tempo de aplicação e ensaios de envelhecimento acelerado com aplicação de impulsos atmosférico. A segunda etapa consiste da implementação e estudos de caso através de um programa computacional para obtenção e determinação o comportamento da corrente resistiva do pára-raios e seus harmônicos.

3.1 Materiais

A avaliação do processo de degradação dos pára-raios de ZnO através da análise da componente resistiva da corrente de fuga se faz necessária para o acompanhamento da evolução da deterioração desde o estágio inicial, varistores

novos, até o estágio final, varistores deteriorados devido ao estresse elétrico (impulsos atmosféricos e/ou sobretensão).

Na pesquisa serão utilizados 04 pára-raios novos, com invólucro de material polimérico, cada pára-raios é formado por 02 varistores tipo ZnO. Nas Figuras 3.1a e 3.1b são mostradas duas fotografias dos pára-raios utilizados. Na Figura 3.1a é mostrada uma fotografia do pára-raios novo e seus acessórios. Os pára-raios foram abertos e retirados os varistores para realização de ensaios em cada varistor. Na Figura 3.1b é mostrada uma fotografia com os respectivos varistores que o compõem e restos do revestimento polimérico.

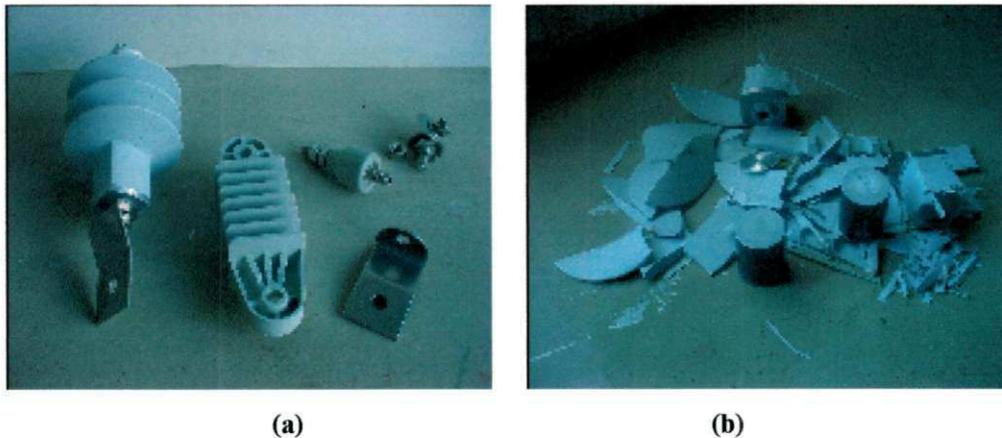


Figura 3.1 – Fotografias do pára-raios utilizado - (a) Pára-raios novo e (b) Pára-raios aberto.

Amostras – Varistores utilizados

Os varistores em geral são fabricados com aproximadamente 90 a 95 % de óxido de zinco e de 10 a 5 % por óxidos dopantes (referências – Franco, 1993; Matsouka, 1971; Philipp e Levinson, 1977), conforme apresentado no capítulo da revisão bibliográfica. Os varistores utilizados nos ensaios medem 38 mm de diâmetro e 46 mm de altura. Na Figura 3.2a é mostrado o desenho da configuração do varistor e suas dimensões. Na Figura 3.2b é mostrada uma fotografia do varistor.

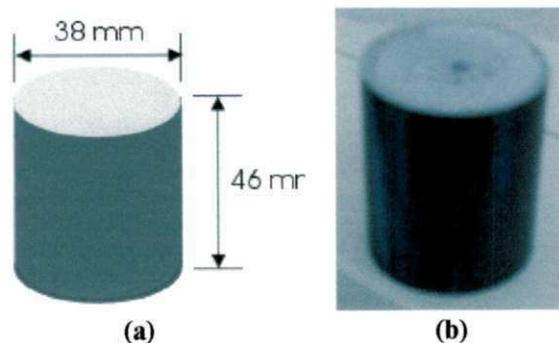


Figura 3.2 – Varistor utilizado nos ensaios - (a) Desenho do varistor e (b) Fotografia do varistor.

Na Tabela 3.1 são apresentados os dados com os principais parâmetros do varistor utilizado.

Tabela 3.1 – Principais características dos varistores.

Item:	Dado característico	
Parte ativa:	Óxido de Zinco	
Tipo de revestimento:	Polimérico	
Corrente nominal de descarga:	10 kA	
Capacidade de absorção de energia:	3,6 kJ/kV	
Tensão nominal:	7,5 kV	
Tensão de operação contínua:	6 kV	
Tensão residual impulso atmosférico:	5 kA:	19,55 kV
	10 kA:	21,0 kV
	20 kA:	23,85 kV
Massa:	291,35 g	

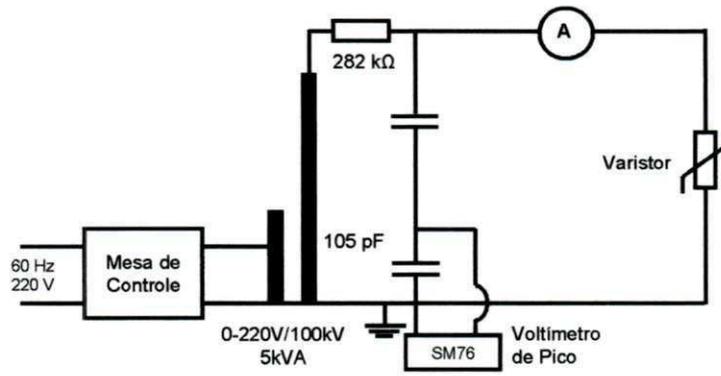
3.2 Métodos

Inicialmente serão realizados ensaios para o levantamento dos dados característicos dos varistores, espectro harmônico da corrente de fuga resistiva e curva v-i. Os dados obtidos nos ensaios servirão como referência para avaliar o comportamento da corrente resistiva antes e após os ensaios de estresse elétrico.

3.2.1 Medição da curva v-i

No ensaio para obtenção da característica v-i dos varistores, o circuito utilizado inclui uma mesa de controle com um transformador variável 0-220/0-100 kV – 5 kVA, um resistor de 282 k Ω para limitação da corrente no secundário do transformador, um divisor capacitivo para a medição da tensão aplicada ao varistor e um amperímetro para medição da corrente no varistor. Nas Figura 3.3a, 3b e 3c são apresentados o esquema do circuito e uma fotografia do arranjo experimental montado em laboratório e mesa de controle respectivamente.

As curvas características v-i (R_{MS}) serão obtidas pela aplicação de tensão alternada na frequência industrial ao varistor. Através da mesa de controle é possível variar o nível de tensão aplicado. Para medição da tensão aplicada ao varistor será utilizado um voltímetro de pico. O voltímetro de pico mede o valor de pico da tensão dividido por raiz de dois. Para medição da corrente será utilizado um multímetro. O nível de tensão é aumentado gradativamente até que o varistor atinja o desencadeamento térmico (*thermal runaway*) ou avalanche térmica.



(a)



(b)

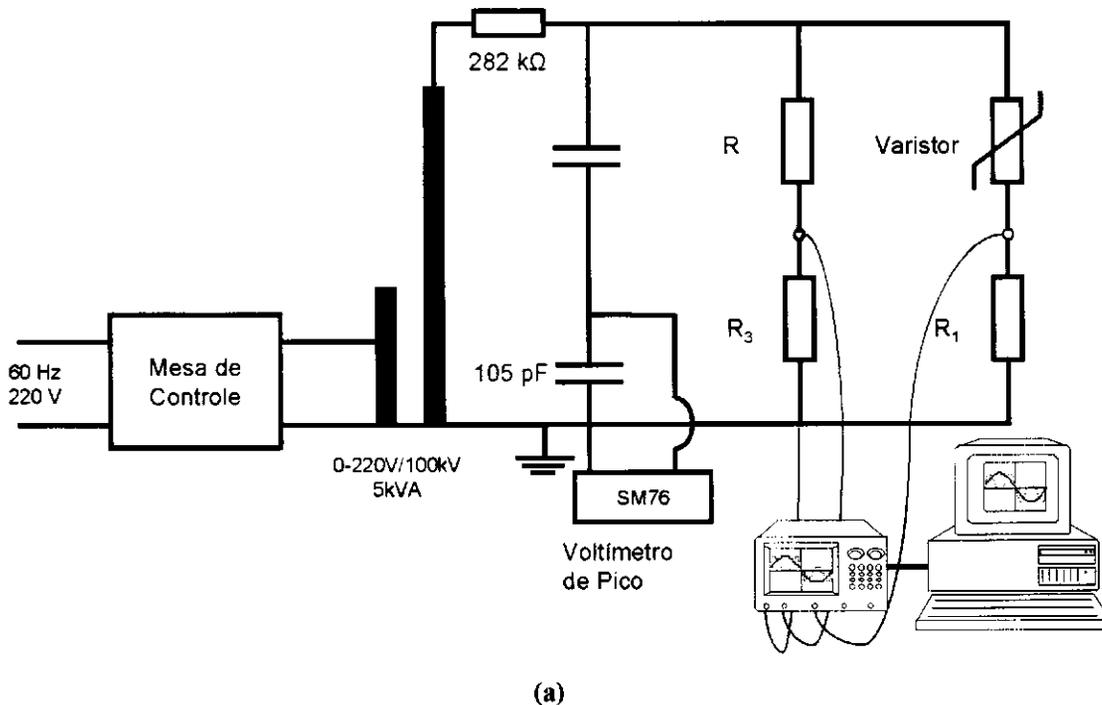


(c)

Figura 3.3 – Circuito para obtenção da característica v-i - (a) Desenho do circuito, (b) Fotografia do circuito e (c) mesa de controle.

3.2.2 Medição da corrente resistiva

A medição da componente resistiva da corrente total será realizada utilizando-se o método de compensação capacitiva diferencial virtual – método da ponte virtual desenvolvido neste trabalho. O método da ponte virtual foi adotado por apresentar resultados em laboratório mais precisos que os demais métodos estudados, conforme apresentado no capítulo Métodos de medição e análise harmônica da corrente resistiva. Para obtenção da corrente resistiva são adquiridos os sinais da tensão aplicada ao pára-raios e da corrente total do pára-raios. Para aquisição dos sinais é utilizando o sistema de aquisição de dados, o sinal no tempo é amostrado a uma taxa de amostragem de 100 kHz, ou seja, segundo o teorema de Nyquist pode-se recuperar o sinal até uma componente harmônica de frequência de 50 kHz sem perdas de informação do sinal original. Os sinais adquiridos (tensão aplicada ao pára-raios e corrente de fuga total) são utilizados como dados de entrada e processados pela rotina computacional (ponte virtual) que calcula o sinal da corrente resistiva do varistor. O princípio de funcionamento da ponte virtual está descrito no capítulo Métodos de medição e análise harmônica da corrente resistiva. O circuito de compensação virtual inclui os mesmos equipamentos do circuito de compensação exceto o capacitor de compensação. Na Figura 3.4a é mostrado o esquema do circuito utilizado. Na Figura 3.4b é mostrada uma fotografia do circuito.





(b)

Figura 3.4 - Circuito para medição da tensão e corrente total de um varistor - (a) Desenho do circuito e (b) Fotografia do circuito.

Na medição da corrente resistiva utilizando o circuito de compensação diferencial virtual é aplicado um sinal de tensão alternada na frequência industrial ao varistor. O valor da tensão de operação contínua do varistor será adotado como o valor RMS do sinal de tensão aplicado ao varistor nas medições da corrente resistiva. Com o auxílio do osciloscópio e do sistema de aquisição obtêm-se os sinais nos terminais dos resistores R_1 (sinal de corrente total do varistor) e R_3 (sinal da tensão aplicada ao varistor). Os sinais obtidos e os valores das resistências R_1 e R_3 são utilizados como dados de entrada na rotina computacional para o cálculo da corrente resistiva no varistor. Os dados obtidos são processados pela rotina que calcula e fornece o sinal e o espectro harmônico da corrente resistiva.

3.2.3 Ensaios de envelhecimento acelerado

O objetivo dos ensaios de envelhecimento é acelerar o processo de degradação dos varistores através da aplicação de sobretensões e impulsos de corrente, de forma programada.

Ensaios de sobretensão

O ensaio de aplicação de sobretensão nos varistores consiste em aplicar uma sobretensão que proporcione o aquecimento do bloco varistor durante um intervalo de tempo pré-estabelecido. Durante a realização do ensaio, os níveis de sobretensão aplicados e a corrente total que circula pelo varistor são monitorados. O

arranjo experimental para aplicação de sobretensão nos varistores inclui os mesmos equipamentos do circuito de compensação exceto o capacitor de compensação. Na Figura 3.4a é mostrado o esquema do circuito utilizado. Na Figura 3.4b é mostrada uma fotografia do circuito.

No ensaio de sobretensão é aplicado ao varistor um sinal de tensão alternada na frequência industrial. O valor RMS do sinal de tensão aplicado apresenta um valor de tensão superior ao valor da tensão de operação contínua do varistor, caracterizando uma sobretensão. O nível de sobretensão aplicado ao varistor é monitorado a partir do valor da corrente total do varistor, ou seja, aplicando-se uma sobretensão capaz de proporcionar um valor de corrente total pré-estabelecido. Com o auxílio do osciloscópio e do sistema de aquisição, os sinais são monitorados (medidos) a cada 10 minutos. Na Figura 3.5 é apresentada a seqüência esquemática de aplicação de sobretensão a ser aplicada aos varistores.



- 1 – Aplicação de sobretensão
- 2 – Resfriamento natural por 1 dia

Figura 3.5 – Seqüência esquemática de aplicação de sobretensão.

Ensaio de impulsos atmosféricos

O gerador de impulsos Haeffely disponibilizado pelo LAT/DEE/UFCG será utilizado nos ensaios de envelhecimento acelerado com aplicação de impulsos de alta corrente. O gerador reproduz impulsos de corrente exponenciais normalizados, com forma de onda $4/10 \mu\text{s}$ e $8/20 \mu\text{s}$ (descargas de alta corrente e descargas atmosféricas respectivamente). O gerador pode ser montado com até 8 estágios (oito capacitores de $2 \mu\text{F}$), totalizando uma corrente impulsiva de até 160 kA. Na Figura 3.6 é mostrada uma fotografia do gerador de impulso de corrente utilizado.



Figura 3.6 - Gerador de impulso de corrente

Na Figura 3.7 é mostrado o arranjo do gerador de impulsos de corrente. A tensão de carregamento pode ser ajustada até 100 kV. O valor da tensão de carregamento é escolhido na mesa de controle. A tensão é elevada gradualmente no tempo pré-definido através do transformador de alta tensão e do diodo retificador (D) que alimenta um banco de capacitores (C1) em tensão contínua. O diodo retifica a onda de tensão e dependendo da sua polarização é possível obter o carregamento dos capacitores com tensão positiva ou negativa. O *spark-gap* ou centelhador (SFS) controla a ignição da descarga por meio do eletrodo de gatilhamento e do circuito de gatilhamento, assim, o banco de capacitores é descarregado na tensão determinada. O gerador também possui uma indutância de choque (Lc), uma resistência de amortecimento de corrente (Rd), uma resistência no primário do transformador de alimentação (R), o elemento OT (objeto de teste), no caso o varistor e o resistor shunt Rv que disponibiliza o sinal do impulso de corrente.

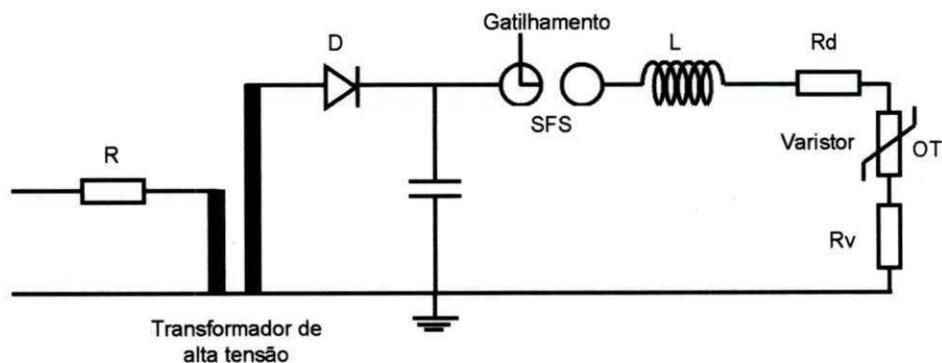
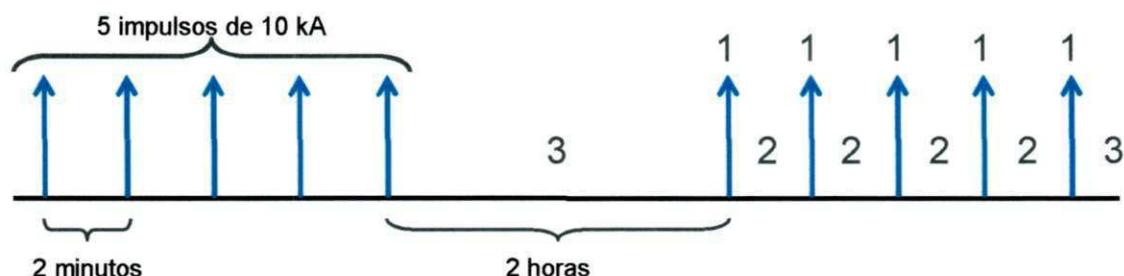


Figura 3.7 - Arranjo do circuito do gerador para reprodução de impulso de corrente.

Ensaio de aplicação de impulsos atmosféricos foi escolhido para promover a degradação dos varistores. Ele consiste em aplicar uma determinada seqüência de impulsos pré-determinada com propósito de acelerar o processo de degradação. Cada seção de ensaio para aplicação de impulsos atmosféricos é formada por grupos de 5 impulsos com forma de onda de 8/20 μ S e amplitude de aproximadamente 10 kA, com polaridade positiva e intervalo de aplicação entre impulsos de 2 minutos. Na Figura 3.8 é mostrado o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente.



- 1 – Aplicação de um impulso de corrente, com forma de onda 8/20 μ S, 10 kA
- 2 – Resfriamento natural por 2 minutos
- 3 – Resfriamento para a temperatura ambiente por 2 horas

Figura 3.8 – Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos.

Na realização dos ensaios foi utilizado um arranjo com cinco capacitores de 2 μ F. A tensão de carregamento dos capacitores necessário para proporcionar uma amplitude de aproximadamente 10 kA foi de 36,5 kV. O valor da tensão de carregamento dos capacitores foi obtido através de ensaios utilizando um varistor-reserva com características idênticas aos demais, utilizado exclusivamente para esta finalidade.

O método de monitoração da degradação dos pára-raios de ZnO foi dividido em 2 etapas:

1ª etapa – Levantamento das características iniciais.

- Fazer levantamento das características v-i com sinais de tensão e corrente alternada de todos os blocos.
- Realizar ensaios de verificação de níveis de harmônicos.

2ª etapa - Ensaio de envelhecimento

- Tensão alternada
 - Ensaio de sobretensão aplicada;
 - Realizar ensaios de verificação de níveis de harmônicos.

- Impulso de corrente
 - Ensaios de impulso corrente, polaridade positiva com intensidade de 10 kA.
 - Realizar ensaios de verificação de níveis de harmônicos.

O próximo capítulo apresentará as análises e discussões dos resultados obtidos experimentalmente e os estudos de casos das análises das correntes resistivas e seus harmônicos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Introdução

Os resultados e análises dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização, sobretensão e impulsos atmosféricos realizados no LAT/DEE/UFCG serão apresentados neste capítulo. Com o objetivo de quantificar o envelhecimento/degradação dos varistores foi feita a mediação e a análise harmônica da corrente resistiva antes e após a aplicação das sobretensões, bem como, antes e após cada seção de aplicação de impulsos de corrente atmosférica. O objetivo é identificar, a partir dos ensaios realizados, que parâmetros podem ser monitorados para o diagnóstico da degradação dos pára-raios de ZnO. Serão apresentados os resultados dos ensaios de levantamento da curva característica $v-i$, ensaios de envelhecimento acelerado com tensão aplicada na frequência industrial e ensaios de envelhecimento acelerado com aplicação de impulsos atmosférico. Na obtenção do sinal da corrente resistiva foi utilizado o método da ponte virtual, método de medição da corrente resistiva de comprovada precisão, desenvolvido neste trabalho.

4.1 Ensaios de sobretensão e análise do sinal da corrente resistiva

Os ensaios de envelhecimento acelerado com tensão alternada têm como objetivo provocar a degradação dos varistores com aplicação de tensão alternada durante um determinado intervalo de tempo. A degradação acelerada ocorre devido ao esforço elétrico provocado pela circulação de uma corrente de alta intensidade e o respectivo aquecimento do bloco varistor. No capítulo Materiais e Métodos são apresentados a metodologia utilizada, o circuito implementado para o ensaio de sobretensão, Figura 3.3(a), 3.3(b) e 3.3(c). Os níveis de sobretensão e de corrente de fuga total foram monitorados e a aquisição dos sinais foi feita em intervalos de 10 minutos.

Durante os ensaios de sobretensão com o intuito de provocar a degradação dos varistores, observou-se que eles não apresentavam alteração significativa na corrente de fuga, com isso, seria necessário um tempo relativamente longo, aproximadamente 4 meses de ensaios ininterruptos para garantir a degradação de todos os varistores, o que na prática não era possível, visto que os equipamentos necessários para os ensaios não eram usados exclusivamente para esta pesquisa. Assim, foram realizados ensaios de degradação com tensão alternada em 3 blocos varistores.

O nível da tensão aplicada aos varistores foi determinado nos ensaios de caracterização dos blocos – medição da curva $v-i$ –, de modo a proporcionar uma corrente de fuga suficiente para provocar o aquecimento/degradação do bloco varistor.

Serão mostrados a seguir os resultados obtidos nos ensaios de sobretensão alternada.

Varistor V1

Na Figura 4.1 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de sobretensão no tempo. As sobretensões são aplicadas em níveis ou patamares diferentes. Na Figura 4.2 é mostrado o comportamento da corrente de fuga total com o tempo, para o varistor V1. Devido às flutuações da tensão provocadas pela própria alimentação, pelas perdas no transformador de elevação e pelo próprio afundamento da tensão provocado pela ação do varistor, os valores das intensidades das correntes apresentados são médias obtidas em cada período.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios observa-se que:

- No patamar 1, a tensão eficaz aplicada (8,02 kV) ao varistor proporcionou uma intensidade de corrente fuga total de 378 μA , eficaz. Para uma tensão de 6 kV, o varistor apresentou inicialmente uma corrente de 300 μA . Comparando os níveis de tensão e corrente aplicados, observa-se que o aumento na corrente de fuga (300 μA para 378 μA) foi praticamente proporcional ao aumento da tensão aplicada (6 kV para 8,02 kV). Deste modo, pode-se concluir que o nível de tensão aplicado ainda se encontra na região linear da curva característica do varistor. Como níveis de tensão aplicados na região linear não provocam degradação significativa, pode-se concluir que o esforço ainda não foi suficiente para provocar a degradação do varistor.
- No patamar 2, a tensão eficaz aplicada foi de 9,96 kV. Observa-se que enquanto a tensão sofreu um aumento de cerca de 0,25 vezes, a corrente aumentou mais de 27 vezes comparando-se com os valores obtidos no patamar 1. Deste modo, pode-se concluir que o nível de tensão aplicado se encontra na região não-linear da curva característica do varistor e que o esforço elétrico já foi suficiente para provocar a degradação, como pode ser visto posteriormente através da análise de harmônicas.
- No patamar 3, a tensão eficaz aplicada foi de 10,35 kV. Observa-se que enquanto a tensão sofreu um aumento de cerca de 35%, a corrente aumentou mais de 30 vezes comparando-se com os valores obtidos no patamar 1. Assim, pode-se concluir que o varistor se encontra na região não-linear da sua curva característica e que o esforço foi suficiente para provocar a degradação, como pode ser visto posteriormente através da análise de harmônicas.
- No patamar 4, a tensão eficaz aplicada foi de 8,85 kV. Observa-se que embora a tensão aplicada seja menor que no patamar 3 a intensidade da corrente de fuga eficaz é maior quando comparada com os valores obtidos do patamar 3, comprovando que o varistor se encontra degradado. Na análise visual do varistor, após o ensaio, foram constatadas ocorrências de descargas laterais, indicando que o varistor apresentava um estado de degradação elevado, como pode ser observado na Figura 4.3.

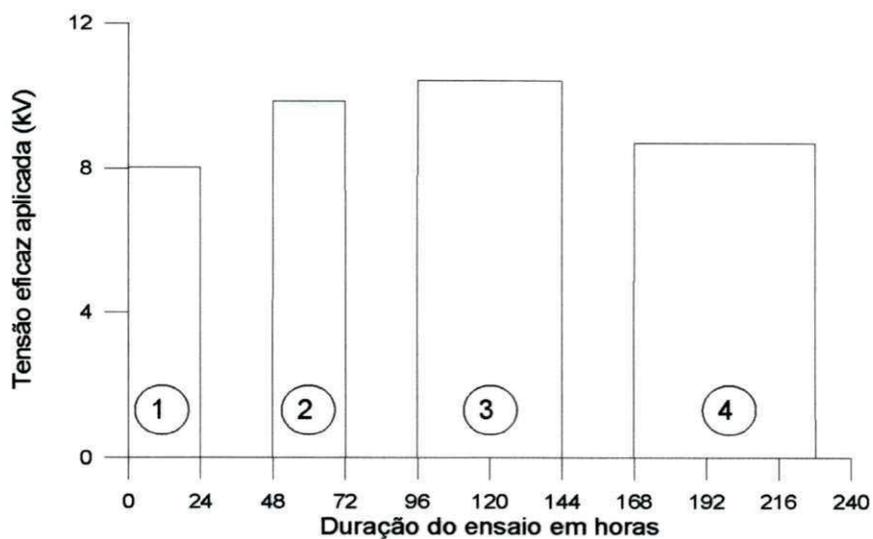


Figura 4.1 – Diagrama do ensaio de sobretensão aplicada versus tempo - varistor V1.

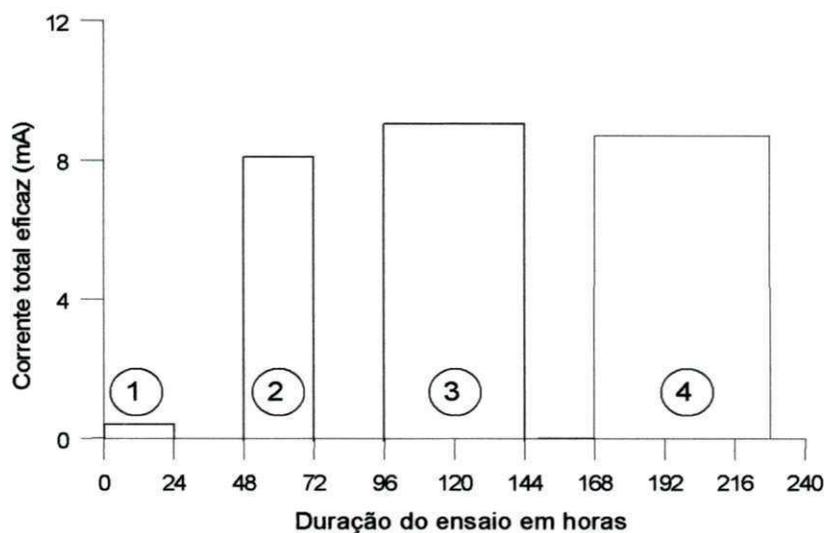


Figura 4.2 – Corrente de fuga total no varistor V1 no ensaio de sobretensão.



Figura 4.3 – Varistor V1 - descarga lateral devido a estresse elétrico.

Nos ensaios de sobretensão do varistor V1 foi constatado um fenômeno estudado por (Fujikawa, 1982), descrito no item 1.2 do capítulo Revisão Bibliográfica. Durante o ensaio observou-se que a corrente de fuga no varistor diminuía até atingir um estágio de regime permanente. Este fenômeno pode ser observado na Figura 4.4. As oscilações na intensidade da corrente podem ter sido provocadas pela flutuação da tensão da fonte de alimentação.

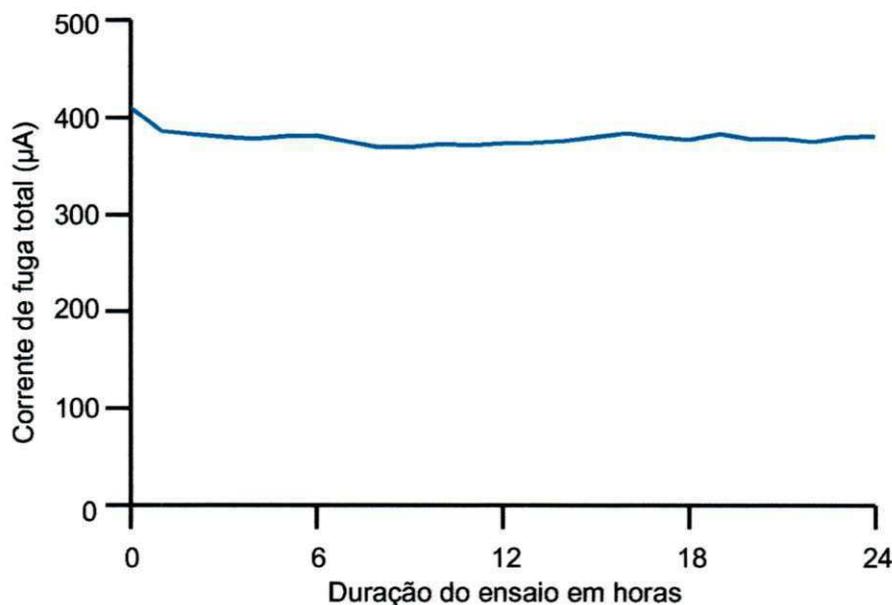


Figura 4.4 – Comportamento da corrente de fuga total no patamar 1 de V1.

Com o objetivo de quantificar o envelhecimento do pára-raios foi feita a análise harmônica da corrente resistiva antes e após a aplicação das sobretensões (patamares). A Figura 4.5 apresenta a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V1 após os ensaios de envelhecimento com sobretensão aplicada. São indicadas na Figura 4.5 as amplitudes da componente de 3ª harmônica para o varistor novo e após os patamares 1, 2 e 3.

Analisando o gráfico da Figura 4.5, observa-se que a amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva apresenta um pequeno aumento na sua intensidade.

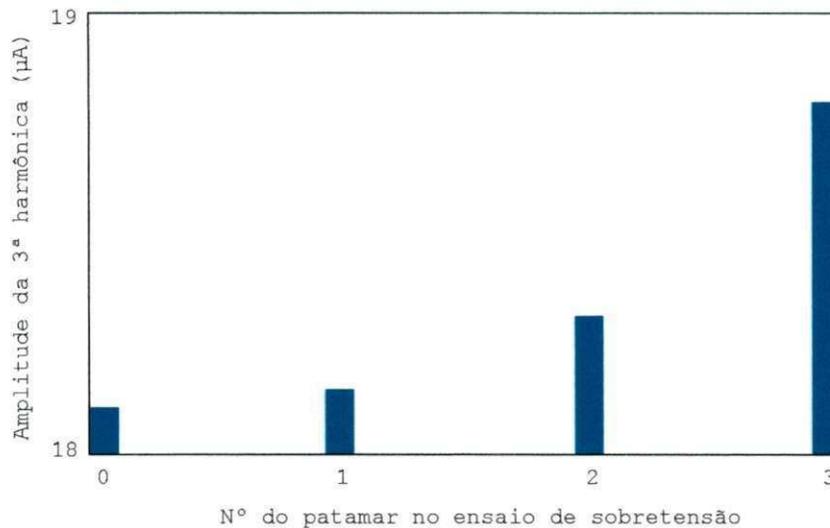


Figura 4.5 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V1 após ensaios de sobretensão aplicada.

Não foi possível realizar as medições e conseqüentemente realizar a análise de harmônicas após o patamar 4, devido à falha lateral no varistor V1. A falha (descarga lateral) no varistor deve-se a possíveis falhas no material isolante que recobre a superfície do varistor, com isso, houve o desvio de correntes para a superfície do varistor.

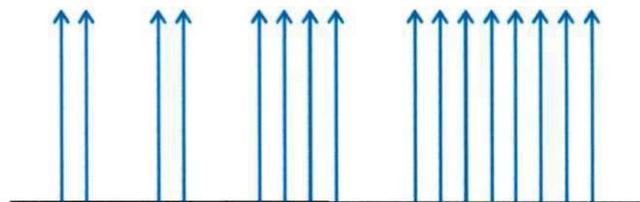
4.2 Ensaios de impulsos de corrente

Os ensaios de envelhecimento acelerado com impulsos de corrente têm como objetivo provocar a degradação dos varistores. A degradação acelerada ocorre devido ao esforço elétrico provocado pela circulação de uma corrente de alta intensidade e o respectivo aquecimento instantâneo do bloco varistor. No capítulo Materiais e Métodos são apresentados a metodologia utilizada e o circuito implementado para o ensaio de impulsos de corrente atmosférico, Figura 3.7.

Os ensaios de impulsos atmosféricos nos varistores consistem em aplicar uma determinada seqüência de impulsos com o objetivo de acelerar o processo de degradação do varistor. Cada seção do ensaio é formada por grupos de 5 impulsos com forma de onda de 8/20 µS e amplitude de aproximadamente 10 kA, com polaridade positiva, com intervalo de aplicação entre impulsos de 2 minutos, conforme no descrito no item Ensaio de impulsos atmosféricos, no capítulo Materiais e Métodos.

Varistor V2

Na Figura 4.6 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente realizado com o varistor V2. Foram aplicados no total 80 impulsos de corrente ao varistor V2.

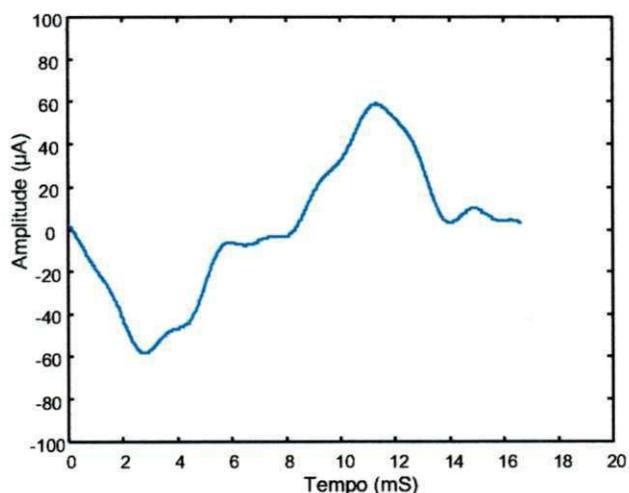


Grupos de 5 impulsos de 10 kA

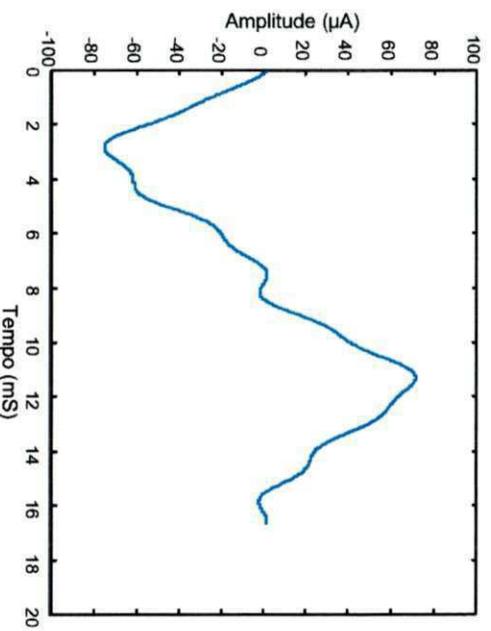
Figura 4.6 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos no varistor V2.

Com o objetivo de quantificar o envelhecimento do pára-raios foi feita a análise harmônica da corrente resistiva antes, nos intervalos entre 2 grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

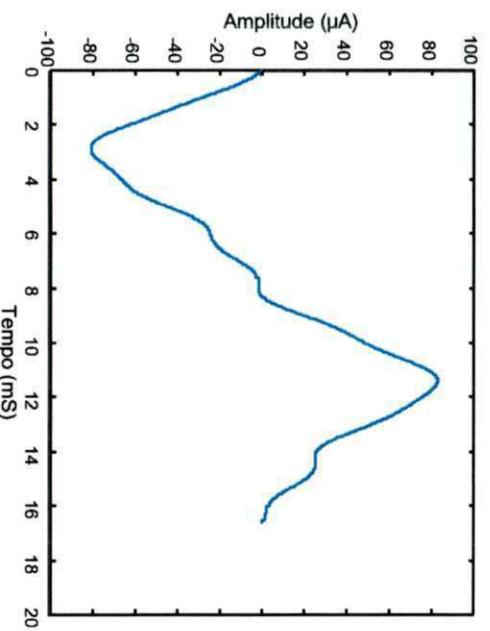
Nas Figura 4.7(a) a 4.7(d) são apresentados os sinais de corrente resistiva do varistor novo, após 2 grupos, após 4 grupos e após 8 grupos de 5 impulsos de 10 kA, para o varistor V2. Observa-se que o pico da corrente resistiva é aumentado a cada nova seção de ensaio, indicando que o valor da corrente resistiva está aumentando após cada ensaio.



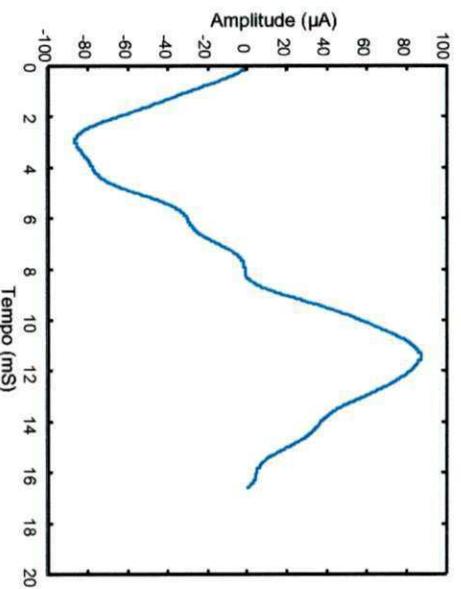
(a) – Sinal de corrente resistiva de V2 novo.



(b) – Sinal de corrente resistiva de V2 após 2 grupos de 5 impulsos de 10 kA.



(c) – Sinal de corrente resistiva de V2 após 4 grupos de 5 impulsos de 10 kA.



(d) – Sinal de corrente resistiva de V2 após 8 grupos de 5 impulsos de 10 kA.

Figura 4.7(a), (b), (c) e (d) - Sinais de corrente resistiva de V2 antes, nos intervalos entre 2 grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

Na Figura 4.8 é apresentada a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V2 antes, nos intervalos entre grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

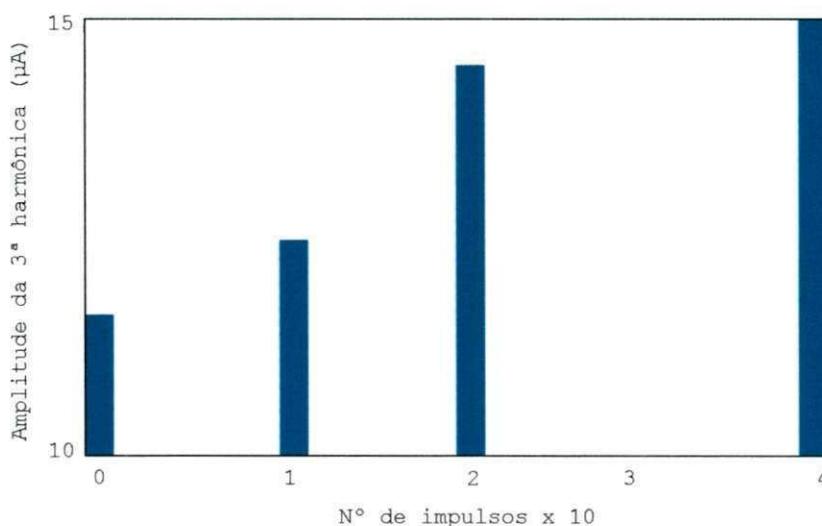


Figura 4.8 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V2 após ensaios de impulsos atmosféricos.

Analisando a evolução do valor da corrente resistiva eficaz do varistor V2, observa-se um aumento da mesma com o número dos impulsos aplicados. Quando o varistor se encontrava novo, a corrente total eficaz era de 298,83 µA, a corrente resistiva eficaz era de 43,51 µA e a amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva era de 11,62 µA. Após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente, a corrente total eficaz apresentou um pequeno aumento para 300,52 µA, que representa um aumento de 0,60 %. A corrente resistiva eficaz aumentou para 51,71 µA, representando um aumento de 18,91 %. A amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva aumentou para 14,93 µA, um aumento de 28,40 %. Ou seja, embora as grandezas analisadas tenham sofrido aumento, este aumento foi mais significativo na componente de 3ª harmônica da corrente resistiva, evidenciando que a componente de 3ª harmônica da corrente resistiva é o indicador de degradação mais elucidativo.

Após o final da quarta seção de ensaios de impulsos (8 grupos), devido à alta intensidade da corrente de fuga pelo varistor, não foi possível aplicar a tensão de operação contínua (6 kV), na qual são feitas as aquisições dos sinais para as análises de harmônicas. Na realização do ensaio para verificação dos níveis de harmônicas, devido ao alto nível de degradação, o varistor apresentava para uma tensão eficaz aplicada de 5 kV uma corrente de fuga total superior a 9 mA. Para efeitos de

comparação, a corrente de fuga do varistor quando novo para este nível de tensão era de aproximadamente 250 μA . No ensaio de verificação de harmônicas, o alto nível de degradação do varistor impôs a presença de harmônicas no sinal de tensão da fonte de alimentação, logo, a análise do espectro harmônico da corrente resistiva não é confiável e não foi realizada.

Os impulsos de corrente atmosféricos aplicados ao varistor provocaram degradação interna e local, com o surgimento de caminhos preferências para condução da corrente, os caminhos preferenciais provocaram a diminuição da impedância do varistor e um conseqüente aumento da corrente de fuga. Foram constatadas ainda descargas laterais no varistor. A falha (descarga lateral) no varistor deve-se a possíveis falhas no material isolante que recobre sua superfície, com isso, houve o desvio de correntes para a superfície.

Varistor V4

Os parâmetros (corrente total, corrente resistiva e componente de 3ª harmônica da corrente resistiva) não foram analisados para o varistor V4, pois ele foi danificado (quebra na superfície) após a aplicação dos 10 primeiros impulsos de corrente. A falha ocorrida no varistor V4 deve ter sido ocasionada por defeito no processo de fabricação ou nos ensaios de impulsos de alta corrente nos ensaios de rotina após sua fabricação. O defeito na fabricação permitiu a ocorrência de caminhos preferenciais com concentração de alta corrente e o respectivo aquecimento local. O aquecimento local provoca a dilatação diferenciada no interior e uma conseqüente quebra do bloco. Na Figura 4.9 é mostrada a fotografia do varistor quebrado após os ensaios de impulsos de corrente.

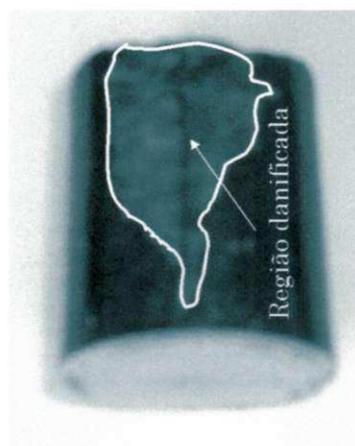


Figura 4.9 - Fotografia ilustrativa do varistor V4 após os ensaios de impulsos de corrente.

Varistor V5

Na Figura 4.10 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente realizado com os varistores V5. Foram aplicados 160 impulsos a cada um dos varistores V5.

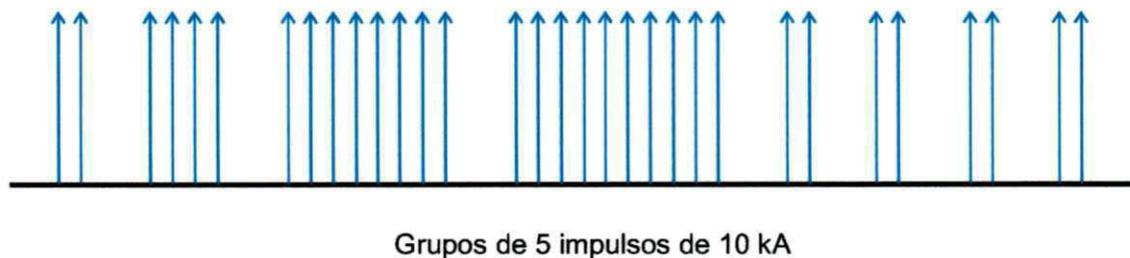
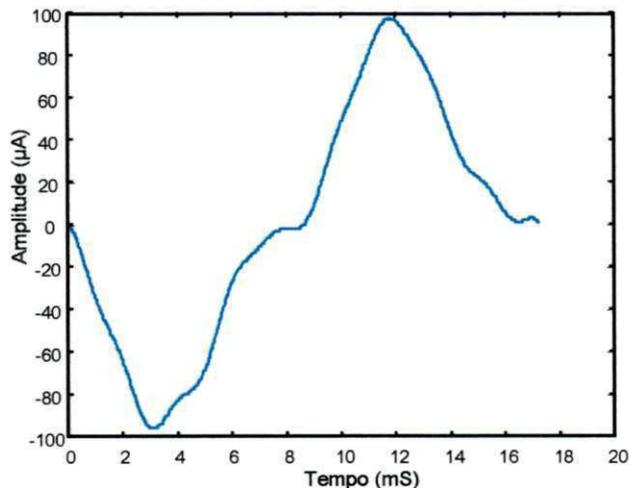
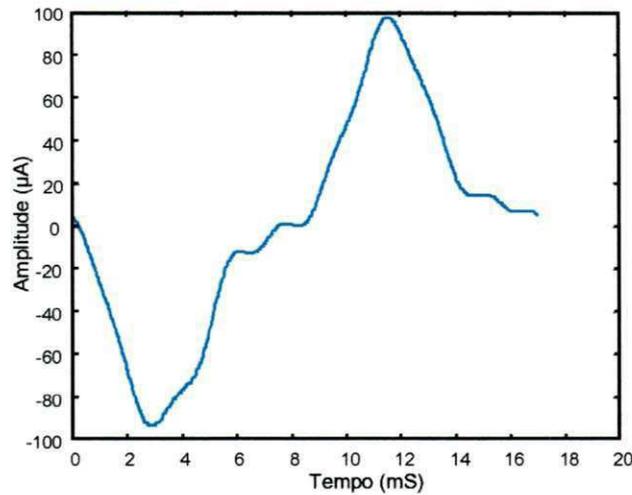


Figura 4.10 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos nos varistores V5.

Nas Figura 4.11(a) e 4.11(b) é apresentado o comportamento do sinal da corrente resistiva antes e após os ensaios de envelhecimento com impulso atmosférico para o varistor V5. Devido a grande quantidade de gráficos obtidos nos ensaios de medição e análise de harmônicas do varistor V5, serão mostrados apenas os sinais da corrente resistiva do varistor no estágio inicial (varistor novo) e após o último ensaio de envelhecimento acelerado.



(a) - Sinal de corrente resistiva de V5 novo.



(b) - Sinal de corrente resistiva do varistor V5 após 32 grupos de 10 impulsos de 10 kA.

Figura 4.11 – Comportamento do sinal de corrente resistiva de V5 após seções de impulsos.

A Figura 4.12 apresenta a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V5 antes, nos intervalos entre grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

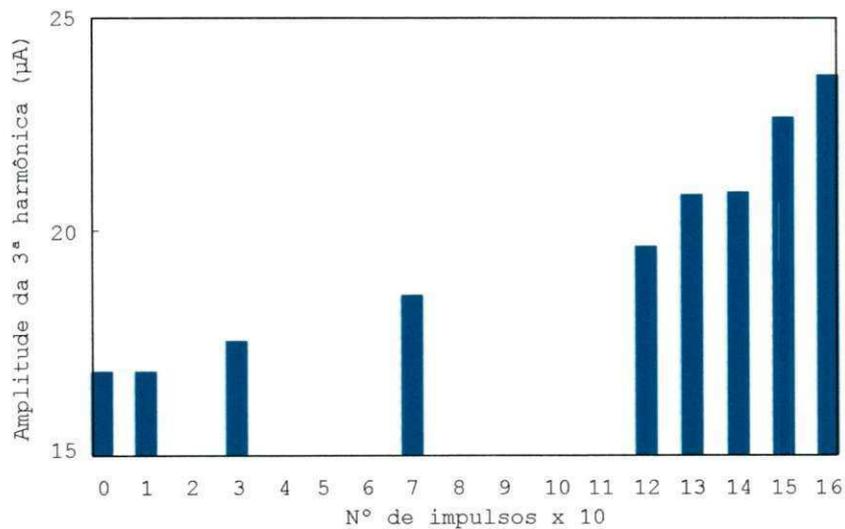


Figura 4.12 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V5 após ensaios de impulso atmosférico.

Analisando a evolução do valor da corrente resistiva eficaz do varistor V5, é evidenciado um aumento da mesma. Quando o varistor estava novo, a corrente total eficaz era de 301,61 μA , a corrente resistiva eficaz era de 44,15 μA e a amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva era de 17,22 μA . Após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente, a corrente total eficaz aumentou para 321,94 μA , um aumento de 6,70%. A corrente resistiva eficaz aumentou para 51,71 μA , um aumento de 17,10%. A amplitude da componente de 3ª harmônica da

corrente resistiva aumentou para $23,51 \mu\text{A}$, um aumento de $36,50 \%$. Ou seja, embora as grandezas analisadas tenham sofrido aumento, este aumento é mais significativo na componente de 3ª harmônica da corrente resistiva.

Varistor V6

Na Figura 4.13 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente realizado com os varistores V6. Foram aplicados 140 impulsos a cada um dos varistores V6.

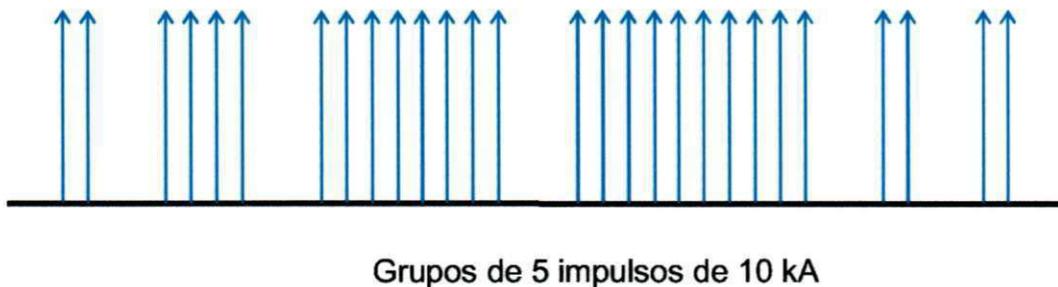
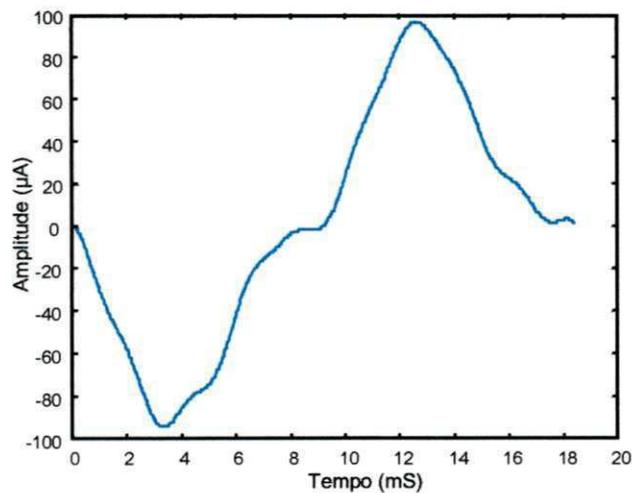
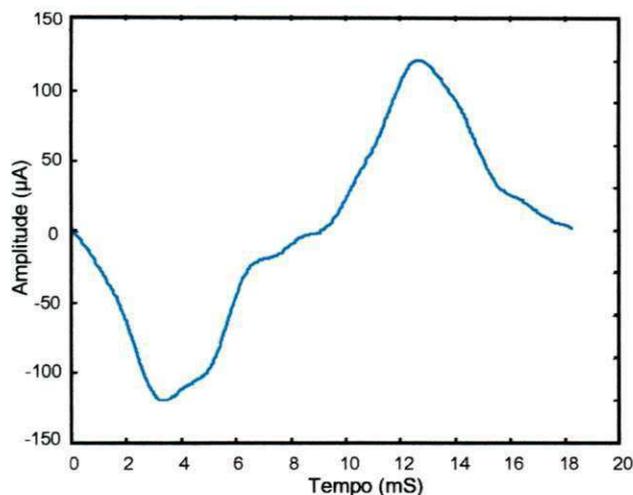


Figura 4.13 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos nos varistores V6.

Nas Figura 4.14(a) e 4.14(b) é apresentado o comportamento do sinal da corrente resistiva antes e após os ensaios de envelhecimento com impulso atmosférico para o varistor V6.



(a) - Sinal de corrente resistiva de V6 novo.



(b) - Sinal de corrente resistiva do varistor V6 após 28 grupos de 10 impulsos de 10 kA.

Figura 4.14 – Comportamento do sinal de corrente resistiva de V6 após seções de impulsos.

A Figura 4.15 apresenta a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V6 antes, nos intervalos entre grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

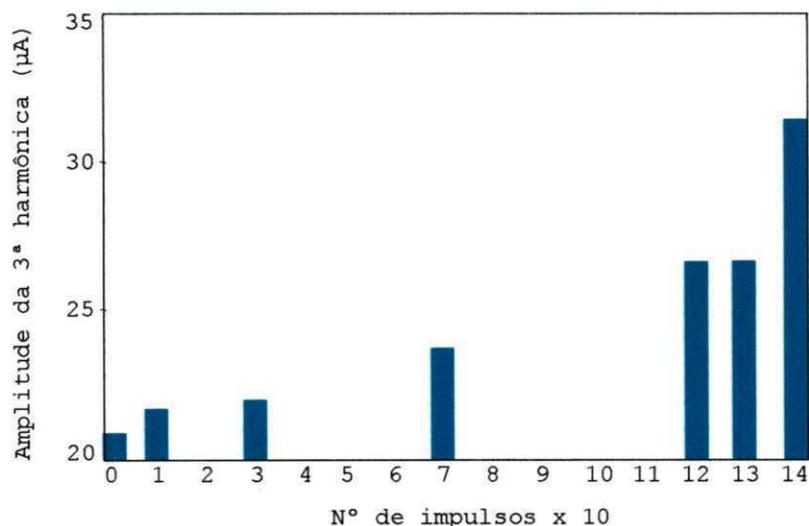


Figura 4.15 - Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva de V6 após ensaios de impulso atmosférico.

Analisando a evolução do valor da corrente resistiva eficaz do varistor V6, observa um aumento da mesma. Quando o varistor estava novo, a corrente total eficaz era de 309,43 µA, a corrente resistiva eficaz era de 50,67 µA e a amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva era de 20,79 µA. Após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente, a corrente total eficaz aumentou para 346,87 µA, um aumento de 12,10 %. A corrente resistiva eficaz aumentou para

67,75 μA , um aumento de 33,70 %. A amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva aumentou para 31,43 μA , um aumento de 56,70 %.

Conforme apresentado na análise dos parâmetros do varistor V5 após os ensaios de envelhecimento acelerado, a degradação do bloco varistor provoca o aumento da corrente de fuga resistiva, sendo mais significativo o aumento da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva.

O número de impulsos atmosféricos aplicados aos varistores V5 e V6, embora em maior quantidade que nos demais varistores, não provocaram falhas físicas (quebras, caminhos preferenciais ou descargas laterais). Contudo, quando se analisa os parâmetros (corrente resistiva e 3ª harmônica da corrente resistiva) fica evidenciada um princípio de degradação dos dois blocos.

Varistor V3

O varistor V3 foi submetido a esforços de sobretensão e de impulsos conforme será descrito abaixo. A metodologia aplicada aos esforços de sobretensões está descrita no item Ensaio de sobretensão do capítulo Materiais e Métodos. A metodologia aplicada aos esforços de corrente de impulsos está descrita no item Ensaio de impulsos atmosféricos do capítulo Materiais e Métodos.

Os esforços elétricos provenientes das sobretensões aplicadas ao varistor V1 não provocaram uma variação na amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva significativa, após a aplicação dos patamares 1, 2 e 3. Então, com o objetivo de acelerar o processo de degradação dos varistores foram aplicados níveis de sobretensão mais elevados ao varistor V3.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios observa-se que:

- No patamar 1, a tensão eficaz aplicada (8,73 kV) no varistor proporcionou uma intensidade de corrente de 859 μA , eficaz. O varistor apresentou inicialmente uma corrente de 317 μA para 6 kV. Observa-se que enquanto a tensão sofreu um aumento de cerca de 45% a corrente aumentou mais de 270%, comparando-se com os valores obtidos para uma tensão de 6 kV. Assim, pode-se concluir que o varistor já se encontra na região não-linear da sua curva característica.
- Nos patamares 2, 3, 4 e 5 o nível de tensão aplicado foi praticamente constante. Nos patamares 2 e 3, os valores da tensão eficaz aplicada foram de 10,27 kV e 9,89 kV, respectivamente. Observa-se que enquanto a tensão

aplicada (patamar 3) diminuiu cerca de 4% comparando-se ao patamar 2, a corrente total aumentou em cerca de 40%, passando de 3,83 mA para 5,36 mA. Assim, pode-se concluir que os esforços elétricos dos patamares 1 e 2 já foram suficientes para dar início ao processo de degradação do varistor.

- Comparando os patamares 2 e 4, que apresentam valores da tensão eficaz aplicada de 10,27 kV e 10,26 kV, respectivamente. Observa-se que enquanto a tensão se manteve praticamente constante, a corrente total praticamente duplicou o valor, passando de 3,83 mA para 7,54 mA, que representa um aumento de 97%. Assim, pode-se concluir que os esforços elétricos provocaram degradação no varistor.

- Comparando os patamares 2 e 5, que apresentam valores da tensão eficaz aplicada de 10,27 kV e 10,41 kV, respectivamente. Observa-se que enquanto a tensão aumentou pouco mais de 1%, a corrente total aumentou em mais de 250%, passando de 3,83 mA para 9,81 mA, que representa um aumento de 156%. Assim, pode-se concluir que os esforços elétricos dos patamares 1, 2, 3, 4 e 5 foram suficientes para provocar degradação no varistor.

Na Figura 4.16 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de sobretensão para V3. Na Figura 4.17 é apresentado o comportamento a corrente total no varistor durante o ensaio de sobretensão para V3.

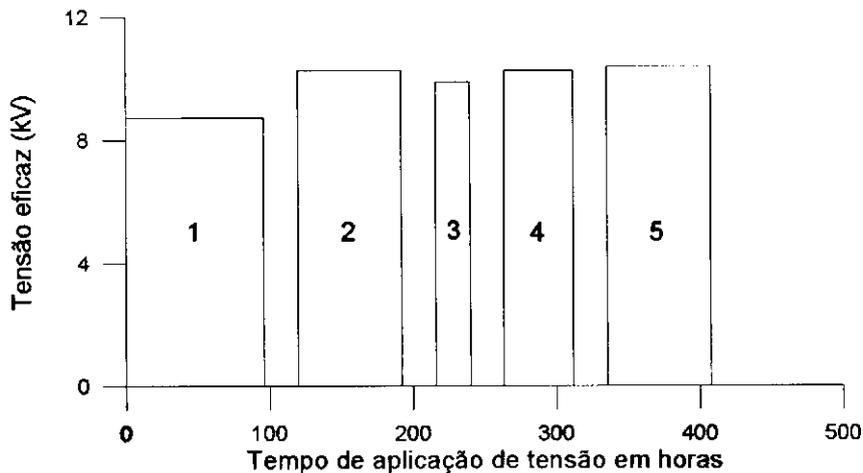


Figura 4.16 – Diagrama esquemático do ensaio de sobretensão aplicada ao varistor V3.

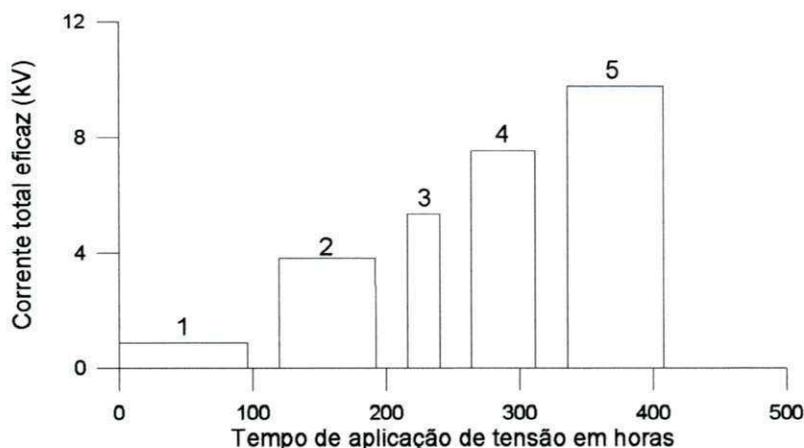


Figura 4.17 – Diagrama esquemático da evolução da corrente total no ensaio de sobretensão aplicada ao varistor V3.

Comparando a Figura 4.16 e a Figura 4.17 observa-se que na medida em que há o aumento do número de horas de tensão aplicada ao varistor V3, há o aumento gradual da corrente total. Assim, pode-se concluir que os esforços elétricos do ensaio de sobretensão foram suficientes para provocar degradação do varistor V3. Na análise visual do varistor V3, após o ensaio, foram constatados indícios de descargas laterais, indicando que o varistor apresentava início de degradação. Como as marcas provocadas pelas descargas laterais eram pequenas, não foi possível fazer o registro fotográfico das mesmas.

Na Figura 4.18 é apresentado o comportamento da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V3 antes, após os patamares e ao final do ensaio de envelhecimento com sobretensão aplicada. O zero no eixo das abscissas indica a medição da 3ª harmônica do varistor novo.

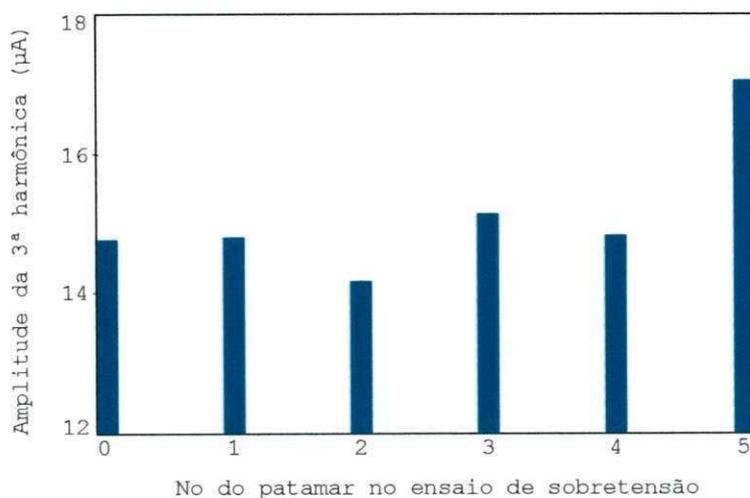


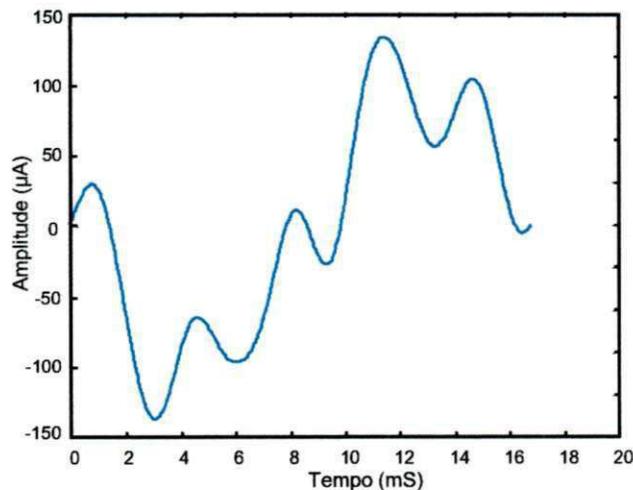
Figura 4.18 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V3 após ensaios de sobretensão aplicada.

Analisando o gráfico da Figura 4.18 que se refere a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva no varistor V3, observa-se que a corrente de 3ª harmônica da corrente resistiva sofreu alteração entre os patamares de 1 a 5, com pequenas variações entre 14 e 15 μA . Após o patamar número 5 foi apresentando um pequeno acréscimo na amplitude da corrente de 3ª harmônica que atingiu aproximadamente 17 μA .

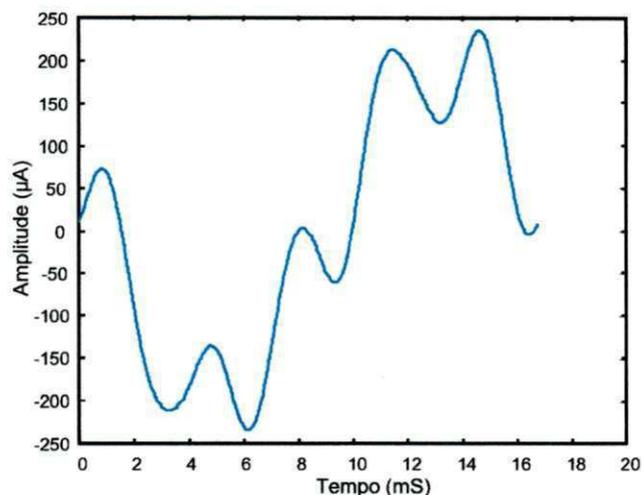
De posse dos resultados obtidos nos ensaios de sobretensão constata-se que o grau de degradação dos varistores após os ensaios de sobretensão foi devido principalmente às pequenas descargas laterais apresentadas, não sendo evidenciado aumento significativo na componente de 3ª harmônica da corrente resistiva.

A falha lateral no varistor V3 deve-se a possíveis falhas no material isolante que recobre a superfície do varistor, com isso, houve o desvio de correntes para a superfície do varistor.

Nas Figura 4.19(a) e 4.19(b) são apresentados os sinais da corrente resistiva antes e após os ensaios de envelhecimento com tensão alternada para o varistor V3.



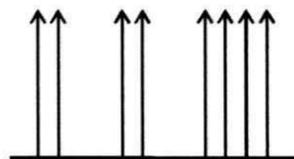
(a) – Sinal de corrente resistiva de V3 novo.



(b) – Sinal de corrente resistiva de V3 após 5º patamar de sobretensão.

Figura 4.19 - Sinais de corrente resistiva de V3 antes e após os ensaios de envelhecimento com sobretensão alternada.

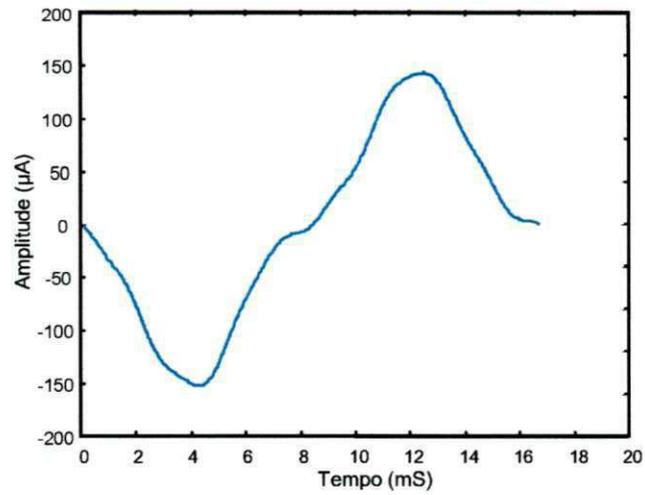
Mesmo como varistor apresentando um início de falhas na sua superfície lateral, ele foi submetido a ensaios de impulsos de corrente atmosféricos. Na Figura 4.10 é apresentado o diagrama esquemático do ensaio de impulso de corrente realizado com o varistor V3, sendo aplicados um total 40 impulsos de corrente.



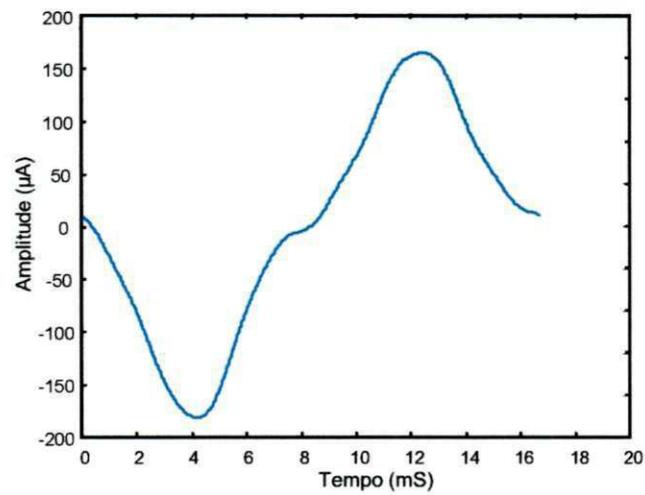
Grupos de 5 impulsos de 10 kA

Figura 4.20 - Seqüência esquemática de aplicação dos grupos de impulsos no varistor V3.

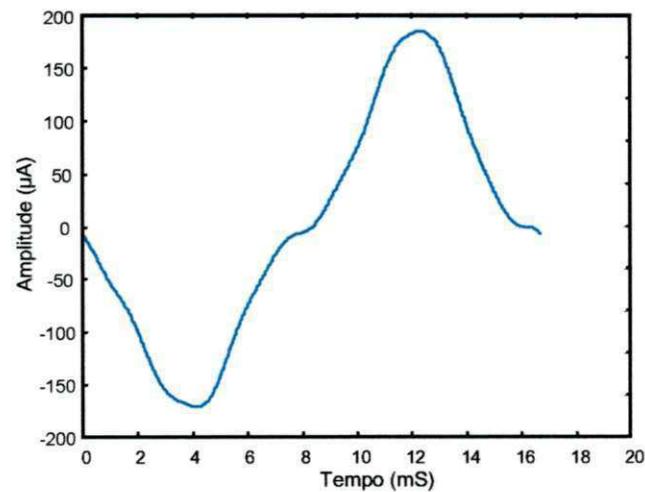
Nas Figura 4.21(a) a 4.21(d) são apresentados os sinais de corrente resistiva do varistor após os ensaios de sobretensão, após a aplicação de 2 grupos de impulsos, após 4 grupos e após 8 grupos de 5 impulsos de 10 kA, para o varistor V3. Observa-se que o pico da corrente resistiva é aumentado a cada nova seção de ensaio, indicando que o valor da corrente resistiva está aumentando após cada ensaio. Na Figura 4.21(d) é constatada a degradação do varistor V3, quando o varistor apresentava uma corrente total maior que 5 mA.



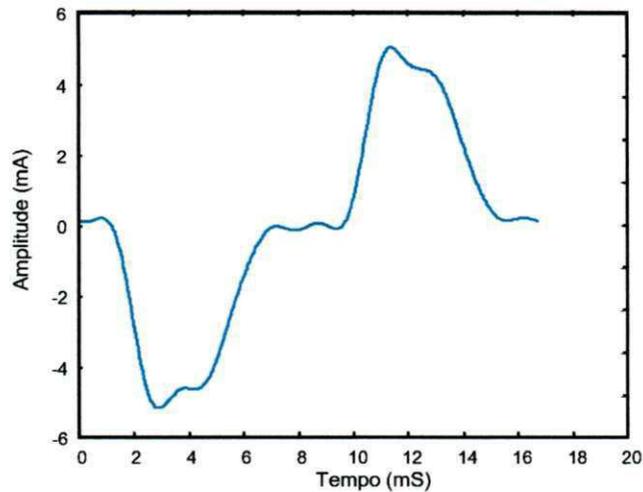
(a) – Sinal de corrente resistiva de V3 antes dos ensaios de impulsos de corrente.



(b) – Sinal de corrente resistiva de V3 após 2 grupos de 5 impulsos de 10 kA.



(c) – Sinal de corrente resistiva de V3 após 4 grupos de 5 impulsos de 10 kA.



(d) - Sinal de corrente resistiva de V3 após 8 grupos de 5 impulsos de 10 kA.

Figura 4.21(a), (b), (c) e (d) - Sinais de corrente resistiva de V2 antes, nos intervalos entre 2 grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

Na Figura 4.22 é apresentada a evolução da amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V3 antes, nos intervalos entre grupos e após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente atmosféricos.

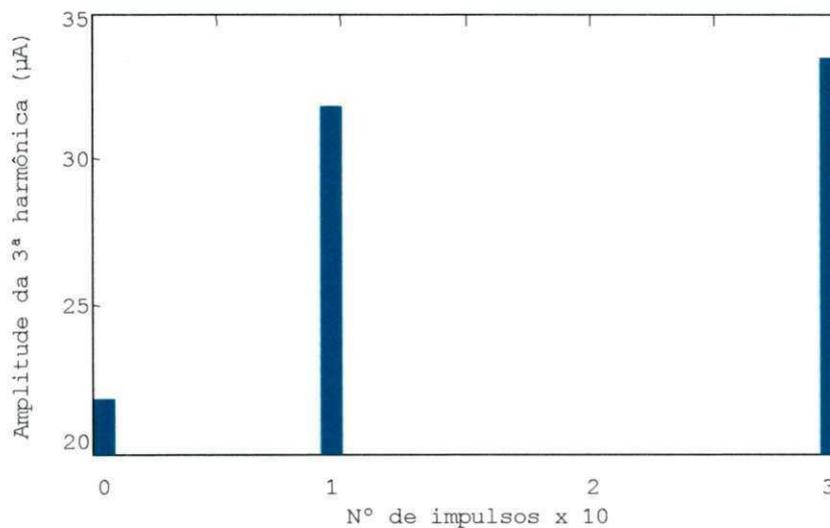


Figura 4.22 – Evolução da amplitude do 3ª harmônica da corrente resistiva do varistor V2 após ensaios de impulsos atmosféricos.

Os ensaios de impulsos atmosféricos foram realizados 45 dias após o último patamar de sobretensão. Comparando os gráficos da Figura 4.22 e Figura 4.18, observa-se que a componente de 3ª harmônica da corrente resistiva após os ensaios de sobretensão (Figura 4.18) apresenta uma amplitude de aproximadamente 17 µA, e antes dos ensaios de impulsos atmosféricos (Figura 4.22), já apresentava uma componente de 3ª harmônica com uma amplitude de aproximadamente 22 µA, isto se

deve possivelmente aos efeitos da umidade nas características do varistor ou liberação de oxigênio da sua configuração molecular de parte do volume do varistor, isto é, o grão de ZnO que é considerado um semiconductor com a liberação do oxigênio passa a ser Zn, que é um metal e por conseguinte um condutor (Gupta, 1985).

Analisando a evolução do valor da corrente resistiva eficaz do varistor V3, observa um aumento da mesma com o número dos impulsos aplicados. Após os ensaios de envelhecimento com tensão alternada, a corrente total eficaz era de 303 μA , a corrente resistiva eficaz era de 86,59 μA e a amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva era de 25,96 μA . Após os ensaios de envelhecimento com impulsos de corrente, a corrente total eficaz aumentou para 2,88 mA. A corrente resistiva eficaz aumentou para 2,65 mA. A amplitude da componente de 3ª harmônica da corrente resistiva aumentou para 1,49 mA. Ou seja, embora as grandezas analisadas tenham sofrido aumento em grande escala, este aumento foi mais significativo na componente de 3ª harmônica da corrente resistiva. Na Figura 4.22, a amplitude da componente de 3ª da corrente resistiva após o terceiro ensaio (4 grupos de impulsos) não foi apresentada graficamente, devido ao alto valor de sua amplitude, comparando-se com os resultados anteriores apresentados por V3.

4.3 Ensaio de caracterização – medição da curva v-i

Os ensaios de caracterização elétrica de varistores e de pára-raios têm como objetivo a obtenção da curva v-i e a análise dos parâmetros tensão e corrente. Os ensaios foram realizados em varistores novos e paulatinamente estressados até o estágio final, varistores deteriorados. O objetivo do levantamento da curva v-i dos varistores é observar se a degradação provoca alterações na mesma. Os ensaios foram realizados conforme descrito no capítulo Materiais e Métodos. Nas Figura 3.3a, 3b e 3c são apresentados o esquema do circuito utilizado na medição das curvas características v-i.

As curvas características v-i do varistor V1 novo e degradado, após os ensaios elétricos de envelhecimento são apresentadas na Figura 4.23. O varistor V1 foi estressado com sobretensão alternada. Após os ensaios de envelhecimento acelerado com o varistor V1 foi constatada visualmente, uma variação na curva v-i. Na Figura 4.23 são apresentadas as curvas v-i para valores de pico de tensão e corrente. Para uma tensão de pico ($6\sqrt{2}$ kV), o varistor V1 apresentou após os ensaios de

envelhecimento um aumento cerca de 7 vezes maior se comparado com a corrente no estado novo, evidenciando um alto nível de degradação.

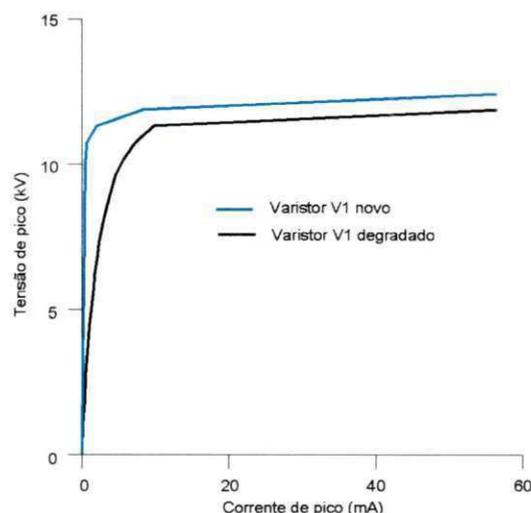


Figura 4.23 - Curvas v-i do varistor V1 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

As curvas características v-i do varistor V2 novo e degradado, após os ensaios elétricos de envelhecimento são apresentadas na Figura 4.24. O varistor V2 foi estressado com impulsos de corrente. Após os ensaios de envelhecimento acelerado com o varistor V2 foi constatada visualmente, uma variação na curva v-i, superior a variação do varistor V1. Na Figura 4.24 são apresentadas as curva v-i para valores de pico de tensão e corrente. Para uma tensão de pico ($5\sqrt{2}$ kV), o varistor V2 apresentou após os ensaios de envelhecimento uma corrente superior a 40 mA de pico, não sendo possível devido a ruídos no sinal da fonte aplicar a tensão de pico ($6\sqrt{2}$ kV). Conforme evidenciado através da análise visual da curva v-i, o varistor V2 apresentou alto nível de degradação, superior ao nível apresentado pelo varistor V1.

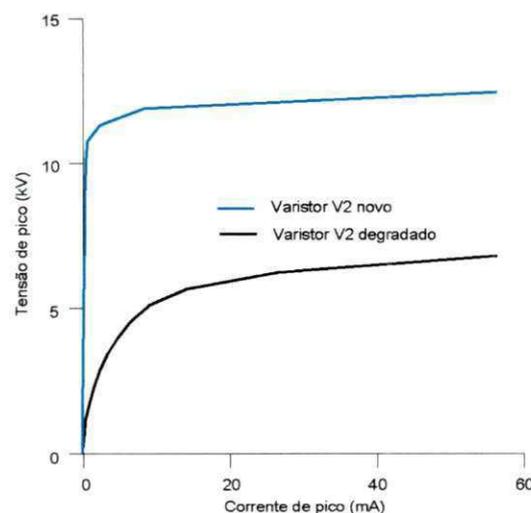


Figura 4.24 - Curvas v-i do varistor V2 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

As curvas características v-i do varistor V3 novo e degradado, após os ensaios elétricos de envelhecimento são apresentadas na Figura 4.25. O varistor V3 foi estressado com sobretensão alternada e impulsos de corrente. Após os ensaios de envelhecimento acelerado com o varistor V3 também foi constatada variação visual na curva v-i. Na Figura 4.25 são apresentadas as curvas v-i para valores de pico de tensão e corrente. Para uma tensão de pico ($6\sqrt{2}$ kV), o varistor V3 apresentou após os ensaios de envelhecimento uma corrente maior que 4 mA, apresentando uma corrente de fuga total de pico cerca de 10 vezes maior se comparado com a corrente no estado novo, evidenciando um alto nível de degradação.

Os impulsos de corrente atmosféricos aplicados ao varistor provocaram degradação interna e local, com o surgimento de caminhos preferências para condução da corrente, os caminhos preferenciais provocaram a diminuição da impedância do varistor e um conseqüente aumento da corrente de fuga no varistor. Como a corrente em tensão alternada é pequena, o seu efeito só pode ser visto através de uma análise minuciosa. Foram observados pontos escuros na superfície metalizada. A quebra do varistor é obtida se o mesmo for submetido a impulsos de alta corrente, que provoca uma dilatação térmica diferencial. Foram constatadas ainda descargas laterais no varistor. A falha (descarga lateral) no varistor deve-se a falhas no material isolante que recobre sua superfície, com isso, houve o desvio de correntes para a superfície do varistor.

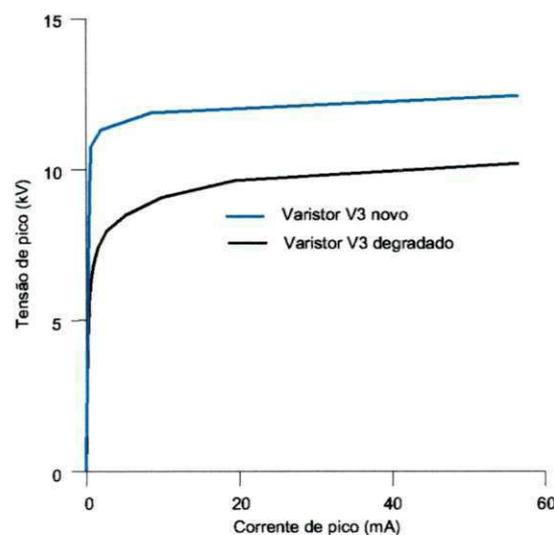


Figura 4.25 - Curvas v-i do varistor V3 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

As curvas características v-i dos varistor V5 e V6 novos e degradados, após os ensaios elétricos de envelhecimento são apresentadas na Figura 4.26 e

Figura 4.27, respectivamente. Os varistores foram estressados impulsos de corrente. Após os ensaios de envelhecimento acelerado os varistores V5 e V6 não apresentaram variação significativa nas curvas v-i (Figura 4.26 e 4.27) respectivamente. Para uma tensão de pico ($6\sqrt{2}$ kV), os varistores V5 e V6 apresentaram após os ensaios de envelhecimento uma variação de 6,70 % e 12,10 % respectivamente, quando comparado com a corrente de fuga dos varistor V5 e V6 novos. Embora o número de impulsos aplicado ao varistor V6 tenha sido menor que o número de impulsos aplicado ao varistor V5, foi constatado um nível de degradação maior no varistor V6. A partir dos resultados obtidos para os varistores V5 e V6, pode-se concluir que varistores fabricados sob as mesmas condições de dopagem e temperatura de aquecimento, podem apresentar características distintas.

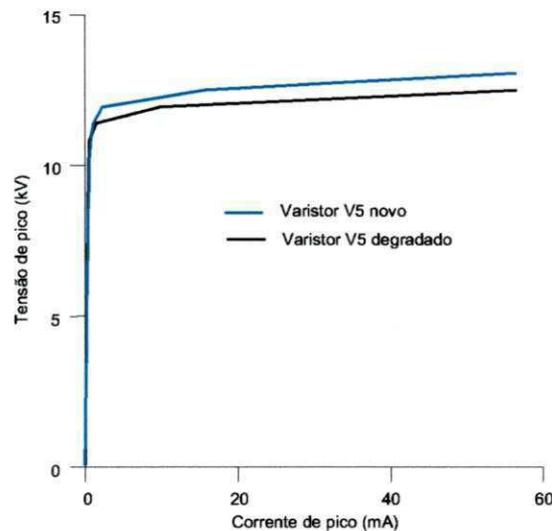


Figura 4.26 - Curvas v-i do varistor V5 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

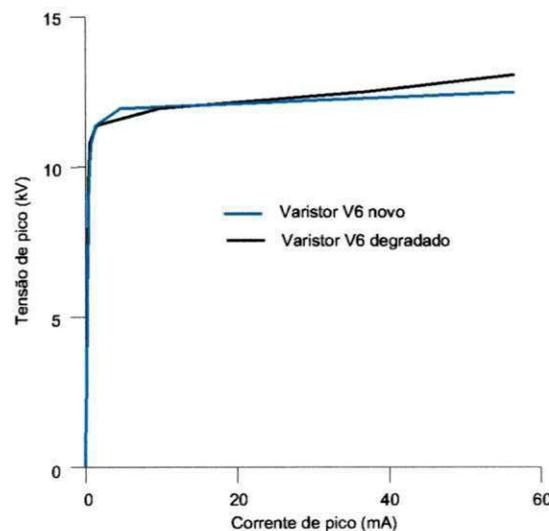


Figura 4.27 - Curvas v-i do varistor V6 antes e após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Na Figura 4.28 é apresentada a variação das componentes (tensão aplicada, corrente capacitiva, corrente total e corrente resistiva) para o varistor V2. Observa-se que a componente resistiva da corrente aumenta em proporções maiores que os demais parâmetros analisados. Observa-se ainda, que a corrente capacitiva aumenta em proporções semelhantes à tensão aplicada ao varistor, o que condiz com o modelo do varistor apresentado na Figura 1.10 da Revisão Bibliográfica, onde segundo o modelo o varistor possui uma capacitância praticamente linear.

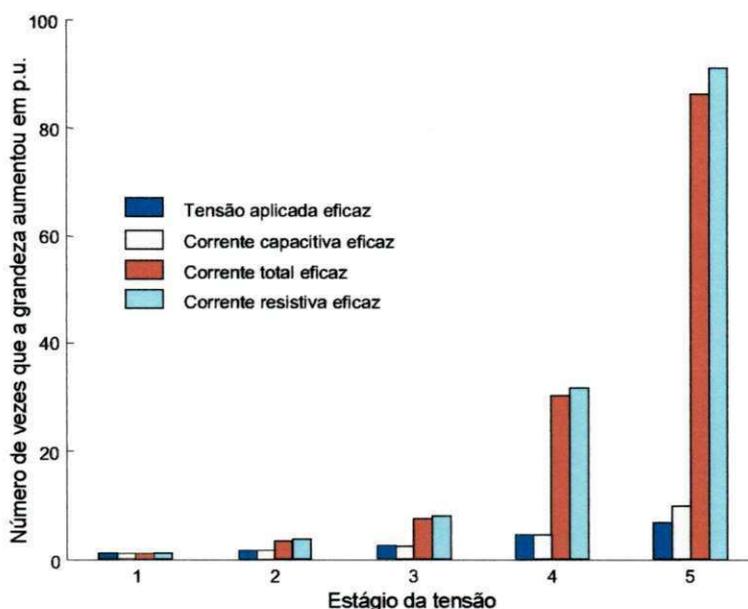


Figura 4.28 – Comportamento das correntes no varistor V2 com o aumento da tensão após os ensaios de envelhecimento acelerado.

Os resultados obtidos nos ensaios de envelhecimento evidenciam uma estreita relação entre os níveis de degradação dos varistores com a evolução da corrente resistiva, sendo a componente de 3ª harmônica, a componente mais suscetível ao aumento. Desse modo, os parâmetros (corrente resistiva e componente de 3ª harmônica da corrente resistiva) apresentam-se como indicadores eficientes no monitoramento de pára-raios de ZnO.

A nova metodologia (método da ponte virtual) desenvolvida e adotada neste trabalho para medição da corrente resistiva tem se apresentado eficiente, com uma implementação mais simples e obtendo resultados em laboratório mais precisos que os métodos atualmente utilizados. Além disso, o método apresenta menores custos que os demais. Embora ainda não tenham sido realizadas medições em campo, estima-se obter um grau de precisão resultados equivalentes aos obtidos em laboratório.

Os ensaios de envelhecimento dos blocos varistores foram realizados como método de sondagem da evolução da degradação. Assim, os ensaios com aplicação de sobretensão em tensão alternada não foram plenamente elucidativos, pois, na tentativa de se obter uma degradação em um curto intervalo de tempo provocou-se uma degradação superficial, com ruptura do revestimento isolante do varistor e o aparecimento de descargas laterais. Como a degradação ocorreu na superfície do varistor, ela não proporcionou o envelhecimento desejado das barreiras intergranulares que separam o grão de ZnO, responsáveis pelo processo de condução e de alta não-linearidade do varistor, com isso, a degradação não foi bem evidenciada na análise de harmônicas. Os ensaios com impulsos de corrente atmosféricos foram elucidativos, provocando um nível de degradação maior que nos ensaios com tensão alternada.

O próximo capítulo apresentará as conclusões e as contribuições deste trabalho, bem como as sugestões para futuros trabalhos na área do monitoramento de pára-raios de ZnO com análise da corrente resistiva.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos nos ensaios de envelhecimento evidenciam uma estreita relação entre os níveis de degradação dos varistores com a evolução da corrente resistiva, sendo a componente de 3ª harmônica, a componente mais suscetível ao aumento. Desse modo, os parâmetros (corrente resistiva e componente de 3ª harmônica da corrente resistiva) apresentam-se como indicadores eficientes no monitoramento de pára-raios de ZnO.

A nova metodologia (método da ponte virtual) desenvolvida e adotada neste trabalho para medição da corrente resistiva se apresenta eficiente, com uma implementação mais simples e obtendo resultados em laboratório mais precisos que os métodos atualmente utilizados. Além disso, o método apresenta menores custos que os demais.

O método da ponte virtual por ser embasado no método de compensação diferencial capacitiva, princípio de obtenção da componente resistiva da corrente de fuga analiticamente comprovado, não deixa dúvidas quanto a sua eficácia.

Embora ainda não tenham sido realizadas medições em campo, estima-se obter resultados equivalentes aos obtidos em laboratório, visto que serão utilizados para medição sensor de corrente e transformador de potencial de alta precisão.

5.2 Limitações

Como um trabalho de pesquisa em andamento, algumas limitações foram apresentadas:

- Para obter resultados confiáveis que indiquem um relacionamento direto entre a amplitude das harmônicas da corrente resistiva e o nível de degradação dos pára-raios de ZnO é necessário um número maior de amostras de varistores, varistores de dimensões diferentes e uma quantidade maior de ensaios.
- Os ensaios com aplicação de sobretensão em tensão alternada não foram plenamente elucidativos. A aplicação da sobretensão não proporcionou o envelhecimento desejado das barreiras intergranulares que separam o grão de ZnO, com isso, a degradação não foi bem evidenciada na análise de harmônicas.

5.3 Sugestões

Tendo em vista as dificuldades encontradas, propõem-se os seguintes trabalhos:

- Aprofundar os estudos sobre degradação de varistores através da medição e análise espectral da corrente de fuga resistiva com um número maior de ensaios de envelhecimento, podendo assim obter resultados que indiquem um relacionamento direto entre a amplitude das harmônicas e os níveis de degradação dos varistores.
- Desenvolver o programa para medição da corrente de fuga resistiva em linguagem compilável.
- Utilizar inteligência artificial, como redes neurais para automatizar a obtenção do sinal da corrente resistiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CESI, Pára-raios de alta tensão. Seminário para engenheiros da Chesf, Recife-Pe, março, 1989.
- C. Heinrich, V. Hinrichsen, "Diagnostics and monitoring of metal oxide surge arresters in high-voltage networks," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, nº 1, pp. 138 - 143, Jan. 2001.
- Costa, Edson G.; Lima, Aleksandro G.; Naidu, S. R. An electrothermal model for complete metal oxide surge arresters. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999.
- D'Ajuz, Ary, Resende, F. M.; Carvalho, F. M. S.; Nunes, I. G.; Amon Filho, J.; Dias, L. E. N.; Pereira, M. P.; Kastrup Filho, O.; Morais, S. de A. "Equipamentos elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro, FURNAS, 1985.
- Desoer, C. A. e Kuh, E. S., Teoria básica de circuitos. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1969.
- Eda, Kazuo, Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents, Journal of materials science 20, USA, 1985
- Franco, J. L., Estudo das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas. Dissertação de mestrado, UFPB, 1993.
- Fujiwara, Y., Shibuya, Y., Imataki, M., e Nitta, T., Evaluation of surge degradation of metal oxide surge arrester, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PAS-101, No. 4, April, 1982.

- Gupta, T. K. & Carlson, W. G., A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor, *Journal of materials science* 20, USA, 1985.
- Gupta, T. K., Application of zinc oxide surge varistors, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 73, n.7, p.1817-1840, 1990.
- Hinrichsen, Volker. "Metal-Oxide surge arresters fundamentals". Berlin, 2001.
- Kobayashi, M.; Mizuno, M.; Hayashi, M. and Sughita, Y., "Metal oxide surge arrester," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 21, nº 6, Dec. 1986.
- Lahti, K., Kannus, K. e Nousiainen, K. Diagnostic methods in revealing internal moisture in polymer housed metal oxide surge arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 951-956, 2002.
- Lander, C. W., *Eletrônica industrial – Teoria e aplicações*, 2ª edição, São Paulo, Makron Books, 1996.
- Lundquist, L; Stenstrom, L.; Schei, A. & Hansen, B., New method for measurement of the resistive leakage currents of metal oxide arresters in service, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, nº 4, pp. 138 - 143, Oct. 1990.
- MATLAB for Windows User's Guide, The Math Works Inc., 1991
- Matsuoka, M., Nonohmic properties of zinc oxide ceramics, *J. Appl. Phys*, 56(10), november 1984.
- Moreno, Hilton, "Harmônicas nas instalações elétricas" *Procobre Brasil*, São Paulo, SP, novembro de 2001.
- Naidu, S. R. & Srivastava, K. D., The validity of circuits for measuring the resistive leakage current of zinc oxide arresters, 5th ISH, paper 82.12, Braunschweig, Aug. 1987.
- Shirakawa, S. et al, Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, nº 3, pp. 998 - 1003, July. 1988.
- Sobrinho, P. F. P., et al (2001). Avaliação do estado e do comportamento de pára-raios de média e alta tensão, dos tipos de carboneto de silício (SiC) e de óxido metálico de zinco (ZnO), Seminário interno de manutenção de subestações CTEEP e EPTE.

Steinfeld, K., Presentation - Design of Metal Oxide Surge Arresters, Siemens, Berlin, Germany, 2002.

Surge Arrester Monitor application of LCM - Leakage Current Monitor, TransiNor, January 1999.

Westinghouse Electric Corporation, Gapless surge arresters for power systems applications EPRI-EL-3166, Project 657-1, final Report, vol 1 e 2, september, 1983.