

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA
NO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS À
BASE DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO)**

RANIERE F. D. FARIAS

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO - 1994**

RANIERE FERNANDO DOMINGOS FARIAS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA NO
PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS À
BASE DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO)**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : PROCESSAMENTO DE ENERGIA

ORIENTADORES :

**SREERAMULU RAGHURAM NAIDU - PhD
EDSON GUEDES DA COSTA - MESTRE**

**CAMPINA GRANDE-PB
FEVEREIRO - 1994**



F224a Farias, Raniere Fernando Domingos.
Avaliação do efeito da temperatura no processo de degradação dos pára-raios à base de óxido de zinco (ZnO) / Raniere Fernando Domingos Farias. - Campina Grande, 1994.
83 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1994.
"Orientação : Prof. Dr. Sreeramulu Raghuram Naidu, Prof. M.Sc. Edson Guedes da Costa".
Referências.

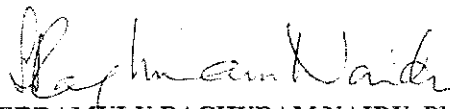
1. Pára-Raios. 2. Processo de Degradação. 3. Efeito da Temperatura. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Naidu, Sreeramulu Raghuram. II. Costa, Edson Guedes da. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 616.316.933(043)

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA NO PROCESSO
DE DEGRADAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO)

RANIERI FERNANDO DOMINGOS FARIAS

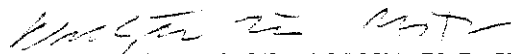
Dissertação Aprovada em 23.02.1994



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB
Orientador



EDSON GUEDES DA COSTA, Mestre, UFPB
Orientador



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



LUÍS RENATO DE ARAÚJO PONTES, Dr.Ing., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Fevereiro - 1994

DEDICATÓRIA

A meus pais: Luiz Domingos dos Santos e Maria Bernadete Farias Santos; Irmãos: Robson, Roosevelt, Richard, Rommel e em especial a Ermíria Teodora das Neves e Maria Domingos Paraguai (in memory) pelo inestimável incentivo e compreensão durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À DEUS.

Aos meus orientadores pela experiência, crítica e sugestões demonstradas ao longo do trabalho.

Meu agradecimento especial ao mestre prof. Edson Guedes da Costa, pelo incentivo, dedicação e orientação que em hipótese alguma deixaram de existir, possibilitando o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Agradeço ao prof^o. José Maurício Gurgel pelas discussões e sugestões na elaboração final deste trabalho.

À prof. Lisiane N. L. Santana e à Eng^a. Núbia S. Dantas pelo apoio, incentivo e sugestões.

Agradeço à CHESF, na pessoa do Eng^o. José Ramalho da Costa pela gentileza de fornecer os equipamentos necessários à realização dos experimentos.

Aos técnicos e funcionários do Laboratório de Alta Tensão - UFPB, pela participação nas montagens experimentais.

E a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na elaboração deste trabalho.

SIMBOLOGIA EMPREGADA

- V - tensão
- I - corrente
- E - campo elétrico
- J - densidade de corrente
- α - coeficiente de não linearidade
- P_G - potência gerada
- yE_{0.5} - campo elétrico aplicado
- I_r - densidade de corrente resistiva
- a - área
- P_D - potência dissipada
- R_T - resistência térmica
- T_e - temperatura do pára-raios
- T_a - temperatura ambiente
- P_R - potência reserva
- P_l - potência limite
- C_p - calor específico
- P_o - potência gerada inicial
- K_{Te} - taxa constante de variação da energia de ativação das reações químicas
- t_l - tempo de vida útil
- i_{rt} - densidade de corrente resistiva no tempo t
- i_{ro} - densidade de corrente resistiva no tempo inicial
- L - comprimento
- ρ - densidade do material

- Q - energia de ativação
- K - constante de Boltzmann
- Kc - condutividade térmica
- ca - corrente alternada
- cc - corrente contínua
- Uin - tensão de entrada
- Uo - tensão da saída
- osc - osciloscópio

ÍNDICE DE TABELAS

- TABELA I - Variação da componente de fuga resistiva
potência ca dissipada para os ensaios
com tensão aplicada de $0.75V_{ref}$,
temperatura ambiente, 80 e 60°C . 49
- TABELA II - Variação da componente de fuga resistiva
e potência ca dissipada para os ensaios
com tensão de $0.75V_{ref}$ e $0.85V_{ref}$ na
temperatura ambiente, 60 e 80°C. 50
- TABELA III - Variação percentual da componente de
fuga resistiva e potência ca dissipada
para os ensaios com $0.80V_{ref}$ e
 $0.75V_{ref}$ nas temperaturas ambiente e
80°C. 51
- TABELA IV - Variação da componente de fuga
resistiva e potência ca dissipada para
diversos níveis de tensões com
aplicação conjunta de impulsos de alta
corrente na temperatura ambiente. 55

TABELA V - Variação da corrente de fuga resistiva e potência ca dissipada para os ensaios com tensão de $0.75V_{ref}$ associado a aplicação de impulsos de corrente à temperatura ambiente e $60^{\circ}C$. 62

TABELA VI - Variação da corrente de fuga resistiva e potência ca dissipada nas tensões de 0.85 , 0.80 e $0.75 V_{ref}$ associada a impulsos de alta corrente na temperatura ambiente, 60 e $80^{\circ}C$. 64

TABELA VII - Esforços elétricos e térmicos e suas variações nas diversas etapas. 74

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Curva característica densidade de corrente (A/cm^2) versus campo elétrico (V/cm), Gupta (1990). 08
- Figura 2.2 - Curva característica $E \times J$ dos elementos óxidos de zinco (ZnO) e carboneto de silício (SiC), Sakshaug et alii (1977). 10
- Figura 2.3 - Potência gerada e potência dissipada versus recíproco da temperatura absoluta, Carlson et alii (1986). 18
- Figura 2.4 - Variação da corrente de fuga devido à elevação da temperatura proveniente do surto transitório, Gupta (1990). 24
- Figura 2.5 - Característica $V \times I$ antes e após a aplicação dos esforços elétricos, Gupta (1990). 28
- Figura 2.6 - Fenômenos da degradação na curva $V \times I$ causadas por polarização cc e ca, Eda (1980). 29
- Figura 3.1 - Curva térmica da estufa tensão versus temperatura. 33

Figura 3.2 - Curva de resfriamento da estufa no tempo (min.).	33
Figura 3.3 - Diagrama do circuito principal do gerador de impulso de corrente HAFELLY - 100 KV, 50 KJ.	35
Figura 3.4 - Circuito completo de tensão alternada utilizando o método convencional.	36
Figura 3.5 - Arranjo esquemático para medições da corrente de fuga resistiva utilizando amplificador diferencial.	38
Figura 4.1 - Variação percentual da componente de fuga resistiva em função da temperatura.	41
Figura 4.2 - Curva de variação da componente de fuga resistiva e pu versus temperatura.	42
Figura 4.3 - Variação percentual da componente resistiva em pu versus temperatura.	43
Figura 4.4 - Forma de onda característica da componente de fuga resistiva em "casamento" com a tensão alternada.	44

Figura 4.5 - Forma de onda da corrente de fuga total do varistor e sinal de entrada alternado.	44
Figura 4.6 - Variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura.	46
Figura 4.7 - Curva de variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura.	48
Figura 4.8 - Curva de variação da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.	54
Figura 4.9 - Curva comparativa da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.	56
Figura 4.10 - Taxa de crescimento da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.	58
Figura 4.11 - Variação percentual da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.	60
Figura 4.12 - Curva comparativa das correntes de fuga resistiva em pu versus temperatura com impulsos aplicados em intervalos de 30 e 15 minutos.	60

Figura 4.13 - Curva de variação da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.	63
Figura 4.14 - Curva comparativa da componente de fuga resistiva para os ensaios realizados com a temperatura ambiente controlada em 60°C.	66
Figura 4.15 - Variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura para os ensaios realizados com a temperatura ambiente controlada em 80°C.	67
Figura 4.16 - Curva de variação da componente resistiva (mA) versus raiz quadrada do tempo $\text{min}^{1/2}$.	69
Figura 4.17 - Curvas de potência gerada (P_G) e potência dissipada (P_D) e potência limite (P_l) em W/cm versus recíproco da temperatura absoluta em 10^{-3}K^{-1}	70
Figura 4.18 - Energia envolvida ao longo das etapas experimentais 4.1; 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5.	73
Figura 4.19 - Histograma das potências médias envolvidas nas etapas 4.1; 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5.	75

RESUMO

Neste trabalho estudou-se o efeito da temperatura no processo de degradação dos pára-raios à base de óxido de zinco quando submetidos a estresses elétricos e térmicos. Os esforços elétricos empregados foram a tensão continuamente aplicada e impulsos de alta corrente com forma de onda padrão $8 \times 20 \mu\text{s}$, polaridade positiva e corrente de descarga de 10 KA. Os esforços térmicos foram obtidos por meio de uma estufa especialmente projetada com controle interno de temperatura.

As amostras ensaiadas, num total de 19 com corrente de descarga diferente são provenientes de dois fabricantes. As amostras varistoras foram submetidas a cinco tipos de esforços:

- aplicação permanente da tensão ca na temperatura ambiente;
- aplicação permanente da tensão ca com a temperatura ambiente modificada em 60°C e 80°C ;
- aplicação permanente da tensão ca associada à aplicação de impulsos de alta corrente na temperatura ambiente;
- aplicação permanente da tensão ca mais impulsos de alta corrente com a temperatura ambiente em 60°C e 80°C ;
- a etapa final foi semelhante a anterior mas, com a temperatura fixada em 60° e, posteriormente, 80°C .

Deste estudo, constatou-se a existência de uma faixa limite de energia sob a qual os varistores iniciam o fenômeno da instabilidade térmica, resultando em degradação e perda de suas propriedades varistoras. Os resultados também demonstraram que o fenômeno da instabilidade térmica

necessariamente não resulta na duplicação da corrente de fuga resistiva, apesar das condições extremas de temperatura ambiente utilizadas. Porém, existe um limite máximo na corrente de fuga resistiva que condiciona a perda da estabilidade térmica ao dispositivo pará-raios.

ABSTRACT

The effect of temperature on the degradation of ZnO-based nonlinear resistors has been reported in this thesis. The nonlinear resistors have been subjected to thermal and electrical stresses. The electrical stresses consisted of a continuously applied alternating voltage and 10 KA, positive polarity, standard (8 x 20 μ s) current impulses. An electric oven with temperature control was used for simulating the thermal stresses.

A total de 19 samples provided by two different manufacturers were used in this study. The samples were subjected to five different types of stresses:

- alternating voltage applied at ambient temperature;
- alternating voltage applied at temperatures of 60°C and 80°C;
- alternating voltage applied at ambient temperature with the periodic application of current impulses;
- alternating voltage applied at temperature of 60° and 80°C with the periodic application of current impulses;
- same as above but with the ambient temperature maintained at 60° and 80°C, respectively.

Thermal instability was observed whenever the energy absorbed by the nonlinear resistors exceed a limiting value. Degradation and loss of the nonlinear properties of the resistors followed thermal instability. It was also observed that there is a limiting value of the resistive leakage current at which thermal instability is initiated.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	01
1.1 - Introdução	01
1.2 - Objetivos	02
1.3 - Apresentação do Trabalho	03
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 - Introdução	04
2.2 - Varistores à base de óxido de zinco (ZnO)	07
2.3 - Propriedades Elétricas dos Elementos não Lineares (ZnO)	07
2.3.1 - Região Linear de Baixa Corrente	09
2.3.2 - Região Não Linear	10
2.3.3 - Região Linear de Alta Corrente	11
2.4 - Propriedades Físicas e Químicas	12
2.5 - Parâmetros Elétricos Fundamentais	12
2.5.1 - Coeficiente Não Linear (α)	12
2.5.2 - Tensão de Referência	13
2.5.3 - Tensão Residual	14
2.5.4 - Corrente de Fuga	14
2.5.5 - Vida Útil	15
2.5.6 - Absorção de Energia	21
2.6 - Confiabilidade do Varistores	26
2.6.1 - Mecanismo de Degradação	27

2.6.2 - Modelos de Falhas devido aos Processos de Degradação	29
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 - Amostras e os Esforços Elétricos e Térmicos	31
3.2 - Arranjos Experimentais	34
3.2.1 - Gerador de Impulso de Corrente	34
3.2.2 - Circuito de Tensão Alternada	36
3.2.3 - Circuito de Comutação e Controlador Digital de temperatura.	38
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com tensão Continuamente Aplicada na Temperatura Ambiente.	40
4.2 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada na Temperatura Ambiente Modificada.	45
4.3 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada associada a Impulsos de Alta Corrente na Temperatura Ambiente.	52
4.4 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada associada a Impulsos de corrente na Temperatura Ambiente Modificada.	57

4.5 - Análise e Discussão do Processo de Degradação através da Tensão Continuamente Aplicada, Impulsos de Corrente com a Temperatura Ambiente Controlada.	65
4.6 - Procedimento para Cálculo e Estimativa do Tempo de Vida Útil Aproveitável dos Pára-Raios.	68
4.7 - Análise e Discussão dos Níveis de Energia e Potência Média Envolvidas nos Experimentos.	71
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	76
CAPÍTULO VI - SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS FUTURAS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 - Introdução

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.

Na década de 70, o desenvolvimento de resistores não lineares, baseado no óxido de zinco, modificou inteiramente a tecnologia de construção dos pára-raios. Devido à sua elevada característica não-linear, este tipo de pára-raios permitiu sua fabricação desprovida de centelhadores de qualquer espécie, D' Aluz et alii (1987) e Gupta (1990). Inúmeras são as vantagens apresentadas por este tipo de pára-raios em comparação ao seu antecessor, os pára-raios à base de carboneto de silício (SiC). A alta capacidade de absorção de energia e sua performance em operação têm trazido enormes benefícios quando instalados em sistemas de alta-tensão em corrente contínua (HVDC), subestações isoladas a SF₆ ou mesmo na proteção de bancos capacitores série, Verdolin et alii (1991).

1.2 - Objetivos

Os varistores à base de ZnO são dispositivos cerâmicos constituídos de material policristalino com aproximadamente 95 % de óxido de zinco e o restante de outros óxidos. Sendo um material cerâmico, seu envelhecimento depende da presença de um campo elétrico que, associado com a temperatura, acelera o processo de degradação pela transferência de material, Bogoroditsky et alii (1979). Sempre que um varistor de óxido metálico absorve um surto de energia, ocorre um acréscimo em sua temperatura, proporcional à quantidade de energia absorvida. Considerando que os varistores na região de baixa corrente apresentam o coeficiente de variação da temperatura negativo, ou seja, o coeficiente de perdas ativas positivo, o aumento na temperatura é acompanhado por um aumento nas perdas ativas que, se não efetivamente neutralizadas por um perfeito sistema de transferência de calor, resultará na instabilidade térmica do varistor ocasionando a ruptura térmica, Gupta (1990).

A degradação dos varistores vem sendo intensivamente estudada pela curva de balanço de energia gerada e dissipada. A capacidade térmica do pára-raios é representada pelas curvas de perdas ativas no disco varistor e pela capacidade de dissipação do invólucro do pára-raios, Gupta (1990), Eda (1989) e Lat (1983), resultando na possibilidade da estimativa do tempo de vida útil, Carlson et alii (1986).

O objetivo deste trabalho foi portanto, avaliar o efeito da temperatura no processo de degradação dos pára-raios à base de óxido de zinco a partir das curvas da corrente de fuga resistiva e da Potência Gerada, determinação de um nível de energia ou potência na qual o pára-raios apresenta o processo de instabilidade térmica, além do estudo da estimativa do tempo de vida útil dos pára-raios.

1.3 - Apresentação do Trabalho

No Capítulo II, faz-se uma breve revisão sobre a evolução dos supressores de surtos e em seguida sobre os pára-raios à base de óxido de zinco com suas principais propriedades, tais como coeficiente de não linearidade (α), capacidade de absorção térmica, tensão de referência, corrente de fuga, vida útil, etc. No Capítulo III, são apresentados e comentados os diversos circuitos elétricos utilizados ao longo de todo processo experimental. Os resultados e discussões dos ensaios realizados encontram-se no Capítulo IV. No Capítulo V, são descritas as conclusões obtidas neste trabalho. Algumas importantes sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo VI.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo faz-se uma breve revisão da evolução dos supressores de surtos de tensão e posteriormente sobre os pára-raios à base de óxido de zinco (ZnO), objetivo principal deste estudo.

2.1 - Introdução

Apesar dos sistemas elétricos operarem em regime permanente na maior parte do tempo, eles devem ser projetados para suportar as piores solicitações. Estas solicitações extremas são normalmente produzidas durante situações transitórias nos sistemas. Conseqüentemente, o projeto de um sistema de potência é determinado prioritariamente pelas condições transitórias do que pelo seu comportamento em regime permanente, D' Aluz et alii (1987).

A evolução dos supressores de surtos mostra, inicialmente, a utilização dos centelhadores com a finalidade de proteção dos sistemas elétricos. Os centelhadores são dispositivos de fácil construção mecânica porém com muitas deficiências elétricas. Eles são constituídos de dois eletrodos separados entre si. O espaçamento entre os eletrodos é ajustado em função da tensão de ignição desejada. Um dos eletrodos está diretamente conectado à fase do sistema e o outro está ligado à terra, portanto é necessária a instalação de três centelhadores por conjunto. Atualmente, os centelhadores são utilizados nos sistemas onde não se requer uma boa coordenação de isolamento; são também usados como proteção de retaguarda ou onde o custo do equipamento a ser protegido não compensa a instalação de pára-raios.

As várias deficiências elétricas dos centelhadores sempre foram motivo de preocupação para os responsáveis pelo bom funcionamento dos sistemas elétricos. Vários estudos foram feitos, no início do século, com a

finalidade de se conseguir dispositivos mais eficientes e que se adaptem às exigências da proteção dos sistemas elétricos. Os estudos levaram ao desenvolvimento do pára-raios à base de carboneto de silício (SiC) ou pára-raios convencional. O carboneto de silício (SiC) é um material semicondutor que apresenta a propriedade de variar a resistividade, dependendo da tensão aplicada.

Basicamente, o pára-raios de carboneto de silício é constituído de discos (blocos ou pastilhas) com resistência não linear, conectados em série com centelhadores. Ao ser atingido por uma sobretensão, os gaps são curto-circuitados e a diferença de potencial atinge os blocos. Como os blocos de carboneto de silício modificam sua resistência dependendo da tensão aplicada, a sobretensão pode escoar mais facilmente para a terra. Após o período de sobretensão, torna-se necessário restabelecer o nível de isolamento para o qual o sistema foi projetado. Com o auxílio dos blocos de carboneto de silício, os gaps tornam-se novamente um circuito aberto com o restabelecimento das propriedades dielétricas do ar. Esta configuração simples do pára-raios convencional é utilizada em baixa e média tensão, onde o nível básico de isolamento com relação à tensão nominal é alto. Em baixas e médias tensões, o maior esforço elétrico para o isolamento do equipamento provém das sobretensões de origem atmosférica.

Com a evolução da tecnologia, uma nova configuração de pára-raios convencional foi desenvolvida com o objetivo de provocar menores tensões residuais bem como apresentar também uma maior capacidade de absorção de energia. Esta configuração apresenta modificações nos gaps e por isso recebeu a denominação de pára-raios de gap ativo. A função primordial do gap ativo é permitir o alongamento do arco. O alongamento do arco é imposto pela ação do campo magnético gerado pela própria corrente na frequência industrial. Este tipo de pára-raios proporciona a utilização de resistores de

menor valor ôhmico, pois a corrente subsequente na frequência industrial é limitada, tanto pelo arco voltaico nos gaps, como pelos elementos resistivos não lineares. A utilização de elementos resistivos de menor resistência acarreta uma menor tensão residual e, conseqüentemente, os níveis de isolamento dos equipamentos a serem protegidos podem ser reduzidos, D'Aluz et alii (1987).

Apesar dos avanços tecnológicos obtidos nos pára-raios de carboneto de silício, eles ainda apresentam diversos inconvenientes: baixa não linearidade, sendo obrigatório o uso de centelhadores; o arco voltaico provoca erosão nos centelhadores, modificando as condições preestabelecidas; forte influência da poluição sob a tensão disruptiva; alta taxa de variação da tensão com o tempo (spike); baixa confiabilidade devido à presença de multicomponentes, etc.

No final da década de 60, Matsouka (1971), descobriu que as cerâmicas à base de óxido de zinco apresentavam características varistoras, isto é, não obedeciam à lei de ohm, caracterizando-se por apresentar uma alta não linearidade na relação corrente-tensão. Inicialmente os varistores foram empregados nos circuitos eletrônicos, como elementos de proteção contra surtos de tensão. Como os varistores apresentavam alta não linearidade e também grande capacidade de absorção de calor, os fabricantes de equipamentos elétricos de alta tensão iniciaram os estudos técnicos visando a sua utilização nos sistemas elétricos de potência. Em 1977, foram lançados no mercado os primeiros pára-raios à base de óxido de ZnO.

Os pára-raios à base de óxido de zinco, também denominados de pára-raios de óxido metálico, apresentam inúmeras vantagens em relação ao seu antecessor, o pára-raios convencional. Dentre elas, podem-se destacar: nível de proteção bem definido, pois não apresenta dependência estatística no nível de tensão de ruptura nos gaps; alta não linearidade, assegurando tanto um nível de proteção bem definido como limitando os níveis dos surtos; a redução

dos níveis dos surtos possibilita também redução dos níveis básico de isolamento dos equipamentos a serem protegidos com a conseqüente redução dos custos; a poluição ambiental afeta com menor intensidade a distribuição de tensão ao longo do pára-raios, entretanto aumenta também a corrente de fuga; elevada capacidade de absorção de energia, permitindo ser utilizado em sistemas elétricos onde a energia dos surtos de manobras é elevada. Além disto, devido sua alta capacidade de absorção de energia torna-se possível reduzir o número de colunas utilizada em paralelo, minimizando os custos.

2.2 - Varistores à Base de Óxido de Zinco (ZnO)

A terminologia varistor é empregada para os componentes, dispositivos ou equipamentos que possuem a característica de variar a sua resistência ou resistividade, em função do nível de tensão aplicada.

A utilização de varistores com alta não linearidade modificou totalmente a tecnologia de construção dos pára-raios, possibilitando a retirada dos gaps. A instalação do pára-raios sem gaps entre a fase e a terra origina a circulação de uma corrente de fuga. Esta corrente, necessariamente, tem que ser de baixo valor, para minimizar as perdas de energia e reduzir o deterioramento ou envelhecimento precoce do dispositivo varistor.

2.3 - Propriedades Elétricas dos Elementos não Lineares (ZnO)

A maioria das propriedades elétricas dos elementos não lineares à base de óxido de zinco pode ser obtidas da representação gráfica que mostra a relação entre a tensão e a corrente, $V \times I$ ou campo elétrico e a densidade de corrente, $E \times J$, como preferem alguns autores, Gupta (1990), Levinson et alii (1985) e Eda (1989). Uma curva típica mostrando a característica varistora dos

elementos não lineares à base de óxido de zinco é mostrada na Figura 2.1. A curva apresenta-se dividida em três regiões distintas. A primeira região é denominada de região linear de baixa corrente ou região de pré-ruptura. A segunda região, na parte intermediária da curva, apresenta as propriedades não lineares e é conhecida como região de ruptura. Os pára-raios operam nesta região. Na terceira região, os elementos não lineares novamente obedecem à lei de ohm. A terceira região é conhecida por região linear de alta corrente ou região de **up turn**.

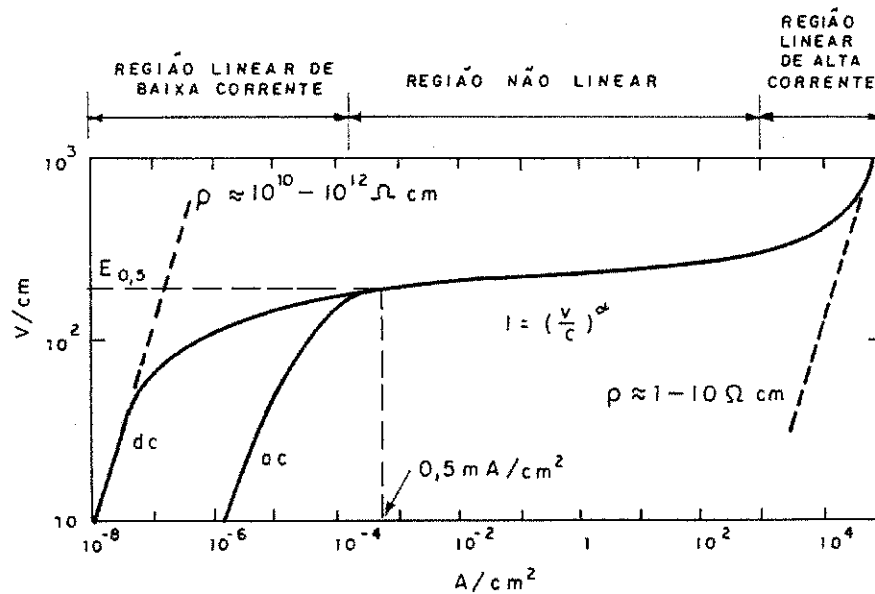


Figura 2.1 - Curva característica Densidade de Corrente (A/cm^2) versus Campo Elétrico (V/cm). A Curva é separada em três regiões: pré-ruptura, não-linear e linear de alta corrente, Gupta (1990).

A seguir descrevem-se as características e as propriedades de cada região.

2.3.1 - Região Linear de Baixa Corrente

A região linear de baixa corrente é definida, Gupta (1990), como tendo uma densidade de corrente limitada em 10^{-4} A/cm². A corrente de fuga flui permanentemente através dos elementos não lineares à base de óxido de zinco. A circulação da corrente de fuga provoca perdas e aquecimento nos elementos, portanto, torna-se necessário que a corrente de fuga seja a mínima possível. Além das perdas por efeito joule, uma alta corrente de fuga acelera a degradação dos elementos não lineares.

Com baixa intensidade do campo elétrico, a corrente de fuga é essencialmente capacitiva, mas quando o campo elétrico sofre algum incremento, a corrente torna-se predominantemente resistiva. A componente resistiva da corrente de fuga total origina-se na condução eletrônica e iônica através dos elementos não lineares. A componente capacitiva tem sua origem explicada nos mecanismos da condução dos varistores.

Na região linear de baixa corrente, a corrente de fuga apresenta uma dependência exponencial com a temperatura, como mostra a Figura 2.2. A análise da dependência da resistividade dos varistores à base de ZnO com a temperatura, indica que o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura é negativo. Portanto, um aumento da temperatura nos dispositivos varistores proporciona uma redução na sua resistividade e, em consequência, um aumento na corrente de fuga resistiva.

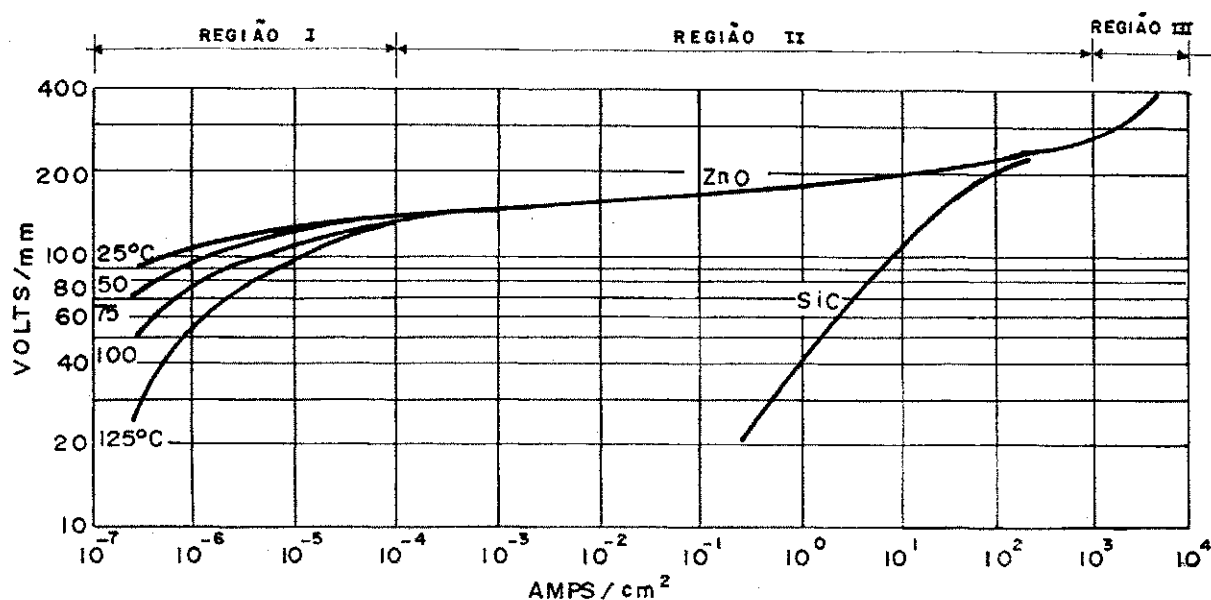


Figura 2.2 - Curva característica E x J dos elementos óxido de zinco e carboneto de silício, Sakshaug et alii (1977).

2.3.2 - Região Não Linear

A região não linear ou de ruptura estende-se de 10^{-4} A/cm² a 10^3 A/cm² na qual qualquer incremento no campo elétrico provoca um substancial aumento na densidade de corrente. A operação dos pára-raios acontece nesta região, pois os elementos não lineares apresentam-se visivelmente diferentes de qualquer outro dispositivo eletro-eletrônico. A corrente de descarga é predominantemente resistiva e não apresenta dependência com a temperatura, Gupta (1990) e Gupta et alii (1981). Através da Figura 2.2 pode-se melhor definir os limites desta importante região onde são definidos vários parâmetros importantes, como o coeficiente não linear α e a tensão residual.

2.3.3 - Região Linear de Alta Corrente

A região linear de alta corrente é definida quando a densidade de corrente supera 10^3 A/cm² e apresenta características ôhmicas, porém o crescimento da tensão é mais rápido. Sua importância se fundamenta por definir o limite da tensão de proteção do equipamento.

Nesta região observa-se uma pequena dependência da corrente com a temperatura. Diferentemente da região linear de baixa corrente, através desta região, os varistores apresentam um pequeno coeficiente positivo para a temperatura. Em estudos experimentais, Franco (1993), verificou-se um pequeno aumento da tensão residual com o aumento da temperatura. As pesquisas revelaram um aumento da ordem de 0.8 a 2 % da tensão residual com a temperatura em 60°C em relação à temperatura ambiente, para uma corrente de descarga nominal de 10 KA e forma de onda padrão 8 x 20 μ s.

2.4 - Propriedades Físicas e Químicas

As propriedades físicas dos elementos não lineares à base de óxido de zinco têm sido estudadas extensivamente, Gupta (1990), Eda (1978), Levinson et alii (1975) e Franco (1993), e uma grande diversidade de modelos foram propostos para explicar os possíveis mecanismos de condução. As propriedades químicas dos elementos não lineares à base de óxido de zinco estão intimamente relacionadas com a composição, processo de sinterização, temperatura, etc. A literatura neste campo também é vasta, Matsuoka (1971), Eda (1989) e Franco (1993), não sendo assuntos relevantes para este trabalho.

2.5 - Parâmetros Elétricos Fundamentais

O estudo dos pára-raios à base de ZnO está condicionado aos parâmetros relacionados com as várias regiões da curva característica, mostrada na Figura 2.1. Um pára-raios desejável deve possuir alto valor do coeficiente não linear, alta capacidade de absorção de energia, baixo valor da corrente de fuga, tensão de referência compreendendo uma pequena faixa de transição do comportamento linear para o não linear, sendo esta transição rápida e suave, baixa tensão residual, distribuição de tensão equalizada o máximo possível, vida útil longa, etc. A seguir alguns destes importantes tópicos.

2.5.1 - Coeficiente Não Linear (α)

O coeficiente não linear (α) é um dos mais importantes parâmetros dos pára-raios, pois indica o grau de não linearidade na relação Tensão x Corrente, influencia no valor da tensão residual e no nível de proteção dos pára-raios. O coeficiente é definido na região não linear da curva característica E x J ou V x I. A relação E x J independe das dimensões dos elementos não lineares. O valor do coeficiente é obtido através de pontos definidos ao longo da região não linear da curva E x J (Fig. 2.1) sendo dada por :

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{J_2}{J_1}\right)}{\log\left(\frac{E_2}{E_1}\right)} \quad [01]$$

onde a faixa de determinação de α corresponde a um campo elétrica E_1 para uma densidade de corrente J_1 de 0.5 mA/cm^2 e E_2 para uma densidade de corrente J_2 de 250 A/cm^2 .

A curva $E \times J$ é obtida pela aplicação de tensão alternada ou contínua para baixas densidades de correntes e aplicações de impulsos de corrente para determinar pontos da curva $E \times J$, na região de altas densidades de correntes.

2.5.2 - Tensão de Referência

A tensão de referência é um importante parâmetro elétrico dos pára-raios. Como é dependente do método de processamento e da composição empregada na obtenção dos elementos não lineares à base de ZnO, o seu valor varia de fabricante para fabricante, não havendo ainda um consenso. Akamatsu & Leite (1991), relatam as dificuldades das entidades internacionais em engenharia elétrica para se determinar precisamente a tensão de referência. Segundo estes autores, estudos desenvolvidos pelo Comitê Japonês de Eletrotécnica definem a tensão de referência como sendo a tensão de pico entre os terminais de um pára-raios, medida com uma corrente específica na região de baixa corrente. O I.E.E.E. - Institute of Electrical and Electronics Engineers - juntamente com a ANSI - American National Standards Institute - desenvolveram uma norma para pára-raios de óxido metálico. A norma não define de forma explícita a tensão de referência, mas define a tensão nominal do ciclo de operação do pára-raios. O grupo de trabalho WG4 da IEC (1990), vem desenvolvendo um trabalho de normalização, o qual tende a admitir a tensão de referência de um pára-raios como o menor valor do pico, independente da polaridade da tensão de frequência industrial, medida na corrente de referência de um pára-raios, dividido por raiz de dois.

Dependendo da corrente nominal de descarga e/ou da classe de descarga da linha de transmissão, a corrente de referência terá um valor típico de densidade de corrente entre 50 e 2000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, IEC (1990).

Gupta (1990), define a tensão de referência como sendo o valor do campo onde a densidade de corrente atinge 0.5 mA/cm². A tensão de referência é obtida considerando os parâmetros físicos dos elementos (dimensões).

2.5.3 - Tensão Residual

Uma importante característica apresentada pelos varistores à base de ZnO é sua baixa impedância quando da eliminação do surto transitório, 1 a 10 Ωcm , (1990). A baixa impedância concede ao pára-raios valores relativamente baixos da tensão residual. Esta tensão surge entre os terminais do pára-raios quando da passagem da corrente de descarga, D'Aluz et alii (1987). A determinação da tensão residual nos pára-raios à base de ZnO, é de suma importância por representar um dos parâmetros que determinam o nível de proteção. De acordo com Gupta (1990), varistores com maior coeficiente de não-linearidade (α) apresentam um melhor nível de proteção ou um melhor fator de proteção.

2.5.4 - Corrente de Fuga

Os pára-raios à base de óxido de Zinco, sem gaps, estão submetidos à tensão de operação do sistema, portanto, uma pequena corrente de fuga está fluindo permanentemente. A corrente e fuga, como relatado anteriormente, é dependente da tensão aplicada e da temperatura ambiente, como também da formulação dos elementos não lineares, do tempo e do tipo de

aplicação do esforço elétrico.

As observações na corrente de fuga, circulando através de um pára-raios, são feitas principalmente para quantificar a perda ativa gerada, que surge como aquecimento. O aumento da corrente de fuga resistiva com o tempo, constituída pela condução eletrônica e pela condução iônica, pode indicar a degradação dos elementos cerâmicos não lineares pelo transporte de matéria que caracteriza a condução iônica, Bogoroditsky et alii (1979).

A análise da corrente de fuga com a tensão imposta ao pára-raios, indica que é necessário balancear a tensão de trabalho do pára-raios com a magnitude da corrente de fuga. Este balanceamento é feito observando-se a necessidade de um ajuste da tensão de trabalho, aproximando-a o máximo possível do início da região não linear e reduzindo ao máximo a corrente de fuga para evitar uma eventual ruptura térmica, pela excessiva geração de calor.

2.5.5 - Vida Útil

A degradação de um pára-raios é afetada por vários fatores que conseqüentemente reduzem o seu tempo de vida útil. Os resultados experimentais apresentados por Mizuno & Mitani (1981), sugerem que o tempo de vida útil de um pára-raios está diretamente relacionado com a magnitude da componente resistiva da corrente de fuga e com fatores que a afetam, como a temperatura, tensão e tempo. Sakshaug et alii (1977) analisaram a vida útil de um pára-raios através da determinação de uma corrente ou potência limite. Oyama et alii (1982) consideram que um elemento perdeu suas características varistoras, isto é, está tecnicamente "morto", quando sua corrente ou potência duplica-se nas mesmas condições, após o esforço. Porém, Gupta (1990) sugere que um elemento não linear à base de ZnO está tecnicamente "morto" quando a potência gerada torna-se superior à potência

dissipada, em regime permanente. Alguns autores consideram que se o elemento não linear atingir a uma temperatura superior a 200°C a amostra é considerada degradada, Gupta (1990), Mizuno et alii (1981), Eda (1884).

Um método amplamente utilizado, Gupta (1990) e Carlson (1986), para estimar o tempo de vida de um pára-raios à base de óxido de zinco é baseado no conceito de uma potência gerada limite. Normalmente o conceito é compreendido com o auxílio das curvas de potência gerada e dissipada, apresentadas na Figura 2.3. As potências são dadas em escala logarítmica, sendo a potência gerada representada pela linha tracejada e a potência dissipada representada pela linha contínua. Ambas são plotadas em função da temperatura absoluta recíproca.

A potência gerada é dada por:

$$P_G = \frac{1}{2} y E_{0.5} I_r a \quad (\text{Watts / cm}) \quad [02]$$

onde:

$y E_{0.5}$ - Campo Aplicado (KV/cm);

I_r - densidade de corrente resistiva (mA/cm²);

a - área (cm²).

A potência dissipada é dada por :

$$P_D = R_T^{-1} (T_r - T_a) \quad (\text{Watts / cm}) \quad [03]$$

onde:

R_T - Resistência Térmica do pára-raios (°C.W⁻¹);

T_e - Temperatura do pára-raios ($^{\circ}\text{C}$);

T_a - Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

A Figura 2.3 mostra que quando $P_G = P_D$ para uma dada tensão aplicada e uma temperatura ambiente T_a , a temperatura do pára-raios aumenta por efeito joule para T_e . O ponto de equilíbrio A é alcançado para estas condições. Quando um surto atinge os terminais do pára-raios, a sua temperatura cresce. O ponto crítico B representa a condição onde o pára-raios não suporta qualquer incremento adicional de energia. No ponto B também a potência gerada é igual à potência dissipada. Entre os pontos A e B a capacidade de dissipação de calor pelo pára-raios é sempre maior que a potência gerada, isto é, o pára-raios sempre retorna ao ponto original de operação A, após ter experimentado uma excursão transitória da temperatura, devido ao surto de tensão. A região entre os pontos A e B é conhecida como a região de estabilidade do pára-raios. Entretanto, se o surto for de tal magnitude que o pára-raios alcance uma temperatura maior do que a indicada no ponto B, o calor gerado será maior que o dissipado, o dispositivo apresentará desencadeamento térmico e poderá ser destruído. A área entre as curvas P_D e P_G representa a quantidade de potência que o pára-raios é capaz de absorver em forma de surto.

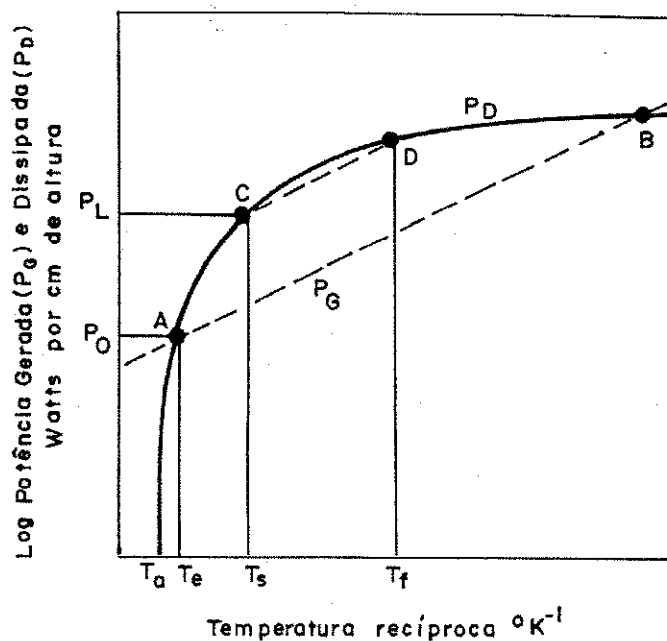


Figura 2.3 - Potência Gerada e Potência Dissipada versus recíproco da temperatura absoluta, ilustrando o conceito de Potência Gerada Limite, Carlson et alii (1986).

Conforme discutido nos itens anteriores, a componente resistiva da corrente de fuga cresce gradualmente com o tempo; como consequência, um aumento gradual da potência gerada também é observado, resultando em um novo ponto de equilíbrio (ponto C). Devido o ponto de equilíbrio modificar-se com o tempo, a potência gerada pode atingir um valor crítico igual à máxima capacidade de dissipação, isto é, um ponto único tangencial da linha P_G na curva P_D . Nessa situação, qualquer incremento na quantidade de potência gerada pode ocasionar a instabilidade térmica do pára-raios.

O tempo transcorrido para que o pára-raios alcance a máxima capacidade de dissipação de potência não descreve adequadamente o seu tempo de vida útil. Isto porque, segundo Carlson et alii (1986), não são feitas considerações sobre a potência que pode ser absorvida pelo pára-raios devido às sobretensões temporárias ou transitórias durante a sua utilização após atingir um certo nível de envelhecimento. Portanto, para estimar o tempo de vida útil

aproveitável dos pára-raios à base de ZnO, Carlson et alli introduziram um conceito de potência gerada limite, que representa uma reserva na capacidade de absorção de energia do pára-raios para uma eventual absorção adicional de potência gerada por transitórios, sendo sua magnitude uma função da capacidade calorífica do pára-raios e do aumento de temperatura permissível.

Observando a Figura 2.3, o tempo de vida útil aproveitável é definido como o período necessário para a potência gerada variar do seu valor inicial P_0 para uma potência limite P_L , no campo constante $yE_{0.5}$ e na temperatura ambiente T_a , também constante. A potência reserva P_R é obtida através da relação:

$$P_R = a \cdot C_p (T_f - T_s) \quad (\text{Joules/cm}) \quad [04]$$

onde:

- T_s - temperatura do pára-raios em P_1 ($^{\circ}\text{C}$);
- $(T_f - T_s)$ - aumento da temperatura permissível ($^{\circ}\text{C}$);
- a - área (cm^2);
- C_p - calor específico ($\text{J cm}^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Estudos experimentais levaram Carlson et alli (1986), a estimar a potência limite (P_L) considerando uma potência reserva com capacidade de absorção de 200 J/cm^3 . Através deste artifício, uma estimativa do tempo de vida útil de um pára-raios foi feita utilizando-se os conceitos de potência gerada limite (P_L), potência gerada inicial (P_0), tensão aplicada, $yE_{0.5}$ e, uma importante constante relacionada com a energia de ativação das reações químicas, K_{te} . A taxa constante de variação K_{te} indica o comportamento da componente de fuga resistiva como função da tensão aplicada, tempo e

temperatura, sendo determinada pela seguinte equação:

$$i_{rt} = i_{ro} + K_{te} \cdot t^{1/2} \quad (\text{mA/cm}^2) \quad [05]$$

onde:

i_{rt} - densidade de corrente resistiva no tempo t ;

i_{r0} - densidade de corrente resistiva no tempo zero;

t - tempo em minutos.

Rearranjando os termos, encontra-se para K_{te} a seguinte relação:

$$K_{te} = \frac{i_{rt} - i_{ro}}{t^{1/2}} \quad (\text{mAcm}^{-2}\text{min}^{-1/2}) \quad [06]$$

Finalmente, utilizando os conceitos de potência gerada no início e no tempo T , equação [02] e da corrente indicada na equação [05], obtém-se:

$$t_l = \left[\frac{2(p_l - p_0)}{y \cdot E_{0.5} \cdot K_{te}} \right]^2 \quad (\text{minutos}) \quad [07]$$

onde:

t_L - tempo de vida útil do pára-raios (min);

K_{Te} - taxa constante relacionada com a energia de ativação das reações químicas ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1/2}$).

A avaliação do tempo de vida de um pára-raios à base de óxido de

zinco (ZnO), através do método desenvolvido por Carlson et alii (1986), é uma estimativa teórica da sua durabilidade e depende de seus parâmetros interagindo mutuamente.

2.5.6 - Absorção de Energia

Os pára-raios estão sujeitos aos mais diversos tipos de surtos, os quais se apresentam com várias formas de ondas, intensidade de corrente e duração. Os surtos ou sobretensões podem ser de origem atmosférica, de manobra ou de chaveamento ou temporários. As sobretensões de origem atmosférica apresentam-se em forma de onda padrão 8 x 20 μ s, sendo mais danosas para os sistemas de baixa e média tensão. As sobretensões de manobra, com forma de onda bem mais longa, podem atingir 10 x 1000 μ s de duração dependendo do nível da tensão e da configuração do sistema em que o pára-raios está instalado. Porém, cuidados especiais devem ser tomados para os sistemas com tensões acima de 230 KV. As sobretensões também podem vir através de ondas repetitivas com duração de vários ciclos, na frequência industrial. Estas sobretensões são conhecidas como sobretensões temporárias; logo, torna-se imprescindível que os pára-raios tenham capacidade de absorver a energia elétrica contida nos surtos e transformá-la em energia térmica.

A capacidade de absorção de energia medida em J/cm^3 é por conseguinte, a segunda mais importante propriedade dos elementos não lineares que compõem o pára-raios. Esta propriedade é de fundamental importância, principalmente na relação dos pára-raios aplicados aos sistemas de extra alta tensão, onde as manobras das linhas longas podem resultar em surtos com altos valores de energia, além das aplicações especiais, como na proteção de bancos de capacitores em série, na proteção de válvulas tiristorizadas e filtros, e nas estações conversoras em alta tensão contínua, G.E. Company (1990). No caso

dos pára-raios à base de ZnO, para se avaliar seguramente a capacidade de absorção de energia, é necessário o estudo do seu principal componente, o elemento varistor especialmente em regime transitório. De acordo com Gupta (1990), a capacidade de absorção de energia de um elemento varistor pode ser calculada da seguinte maneira:

$$E = \frac{J}{A \cdot L} \quad (\text{J} / \text{cm}^2) \quad [08]$$

sendo E a densidade de energia, J a energia absorvida, A área do elemento e L comprimento do elemento. Quando incide um surto sobre o pára-raios, a energia absorvida é dada por:

$$E = \int V \cdot I \cdot dt = C \cdot V \cdot I \cdot T \quad [09]$$

sendo E a energia absorvida, em J/ cm³; V o campo elétrico, em V/cm; I a densidade de corrente, em A/cm²; T o tempo, em s; e C uma constante que depende do formato da onda; C é igual a 1 quando a onda é quadrada.

Considerando que a energia injetada no elemento varistor não seja dissipada para fora, isto é, o sistema é adiabático, a energia crítica por unidade de volume pode ser estimada pelos parâmetros materiais como sendo:

$$E = \rho \cdot C_p \cdot \Delta T = \rho \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad [10]$$

onde ρ é a densidade do material em g/cm³, C_p o calor específico em J/g°C e ΔT ou $T_2 - T_1$, sendo $T_2 > T_1$, o aumento da temperatura devido à absorção de energia. Combinando-se as equações [09] e [10], considerando uma descarga

de onda quadrada, isto é $C = 1$, encontra-se:

$$T_2 - T_1 = \frac{E/L \cdot A}{\rho \cdot C_p} = \frac{V \cdot i \cdot t / L \cdot A}{\rho \cdot C_p} \quad [11]$$

onde $T_2 - T_1$ é a diferença de temperatura devido a absorção de energia. A corrente de fuga devido ao incremento da temperatura pode ser calculada usando a equação de transporte de corrente, Gupta (1990) e Carlson et alii (1986), dada por:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{K \cdot T}\right) \quad [12]$$

onde Q é a energia de ativação. Quando a temperatura cresce de T_1 para T_2 , a corrente I_2 pode ser expressa como:

$$I_2 = \exp\left[\frac{-Q}{K} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad [13]$$

sendo K a constante de Boltzmann. Aplicando logaritmo e rearranjando os termos encontra-se :

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{K \cdot T_1 \cdot T_2}{Q}\right) \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad [14]$$

Do rearranjo das equações [11] e [14], obtém-se:

$$E = \frac{\rho \cdot C_p \cdot K \cdot T_1 \cdot T_2}{Q} \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad [15]$$

A equação [15] representa a soma da energia transitória E que o elemento varistor é capaz de absorver enquanto a temperatura se desloca de T_1 para T_2 , que corresponde à variação da corrente de I_1 para I_2 , como mostra a Figura 2.4.

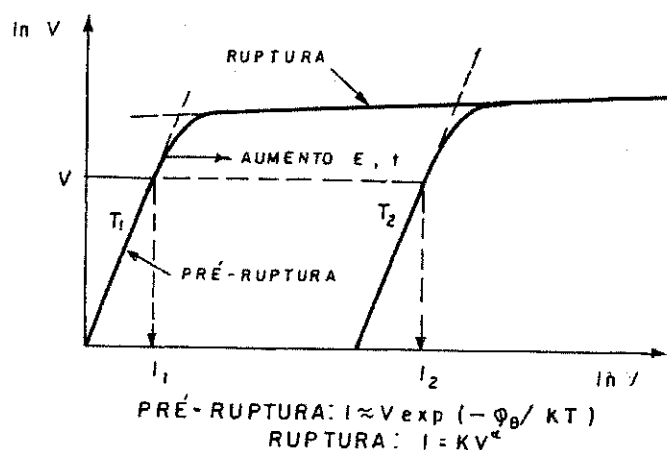


Figura 2.4 - Variação da corrente de fuga devido a elevação da temperatura proveniente do surto transitório, Gupta (1990).

Gupta (1990), cita que várias pesquisas estão sendo realizadas no intuito de aumentar a densidade de energia dos pára-raios, atualmente em torno de 200 a 250 J/cm³. As pesquisas desenvolvidas pela G.E. Company (1990), mostram que a densidade de energia foi aumentada de 170 J/cm³ para 500 J/cm³ através do processamento e aperfeiçoamento nas propriedades térmicas e dos materiais.

Os parâmetros térmicos de maior interesse para o aperfeiçoamento das propriedades varistoras são a condutividade térmica (K_c) e o calor específico (C_p). No caso dos elementos varistores, a condutividade térmica é bastante elevada e, sendo assim, os varistores transferem com facilidade o calor

absorvido para o exterior. O calor específico também é alto e seu valor na temperatura ambiente está em torno de $0.89 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Um alto calor específico aumenta a estabilidade do pára-raios. Portanto, para se ter um pára-raios tecnicamente estável, ele deve, quando da ocorrência de um surto, absorver a energia proveniente do mesmo sem sofrer aumento excessivo na temperatura e dissipar rapidamente a energia para o exterior, Gupta (1990).

Com respeito às características de materiais, pode-se considerar que um bom varistor deve apresentar alto grau de uniformidade na mistura dos óxidos; na densidade e no tamanho dos grãos; baixa porosidade na microestrutura e defeitos químicos na camada intergranular. Um dispositivo sem essas características apresenta uma distribuição variável de temperatura na microestrutura. A irregularidade na distribuição de temperatura deve-se a uma distribuição desigual da corrente sobre a área do elemento varistor. A corrente nos elementos varistores flui sempre pelas regiões de menor resistência, ocasionando os chamados "pontos quentes". Estas regiões apresentam temperaturas bastante elevadas e são as de maior probabilidade de ruptura, Gupta (1990) e G.E. Company (1990).

Quanto ao modo de avaliação dos varistores Verdolin et alii (1991), evidenciam o fato da dispersão existente na característica de absorção de energia, inclusive dentro de um mesmo lote de unidades produzidas, apesar da utilização das mais sofisticadas técnicas de controle de processo atualmente disponíveis. Os varistores são fabricados em lotes e depois de prontos são recolhidas amostras para a realização de um controle de qualidade. O controle de qualidade é realizado através de uma série de ensaios e medições visando aferir seus principais parâmetros. Entretanto, não há uma norma que regulamente quais testes devam ser executados. Cada fabricante tem suas próprias normas e não há um consenso geral a tal respeito. Um fabricante, quando da realização do teste de avaliação da capacidade de absorção de

energia dos seus pára-raios, pode aplicar um pulso curto com alto valor de corrente e outro fabricante aplicar um pulso longo com baixo valor de corrente. Com base nos testes realizados, os valores obtidos pelos diversos fabricantes geralmente são bastantes divergentes. Portanto, um ponto básico que deve ser definido é a normalização dos critérios utilizados para se avaliar a suportabilidade de corrente e energia dos pára-raios à base de óxido de zinco.

Em se tratando da capacidade de absorção de energia, os artigos consultados, Gupta (1990), Mizukoshi et alii e Verdolin (1991), revelam que os varistores projetados com maior capacidade de absorção de energia oferecem substancial redução no tamanho dos pára-raios. Isto porque são reduzidas as quantidades de unidades varistoras, diminuindo acentuadamente os custos. Em contrapartida, varistores com esta característica apresentam temperaturas maiores quando da ocorrência de um surto de corrente.

Como o varistor volta a trabalhar na região de baixa corrente com a temperatura mais elevada, após a absorção do surto, o coeficiente de temperatura negativo característico desta região provoca o crescimento da corrente e, conseqüentemente, a temperatura cresce ainda mais. Este processo de realimentação pode ocasionar uma avalanche e o desencadeamento térmico sem controle (thermal runaway) se o dispositivo não for bem projetado.

2.6 - Confiabilidade dos Varistores

A aplicação de dispositivos de proteção em sistemas de energia elétrica visando assegurar aos equipamentos instalados vida útil prolongada requer destes dispositivos de proteção elevada confiabilidade seja em suas características elétricas ou térmicas. Porém, os pára-raios como dispositivos de proteção são suscetíveis à instabilidade térmica ao longo de sua vida útil, resultando em possível degradação. Nos tópicos seguintes são descritos

alguns tipos de mecanismos de falhas e degradação que reduzem a confiabilidade destes dispositivos varistores.

2.6.1 - Mecanismos de Degradação

Diversas pesquisas, Levinson et alii (1975), Eda (1978), Eda et alii (1980) e Shirley et alii (1979), são direcionadas para o entendimento dos mecanismos de degradação dos varistores. Os estudos e modelos propostos objetivam desvendar os diversos processos físicos e químicos que conduzem à degradação e com isto desenvolver dispositivos que ofereçam maior confiabilidade.

Segundo Levinson & Philips (1985), o fenômeno da degradação nos varistores de ZnO exibe diferentes comportamentos. Primeiro, a taxa de degradação pode ser fortemente influenciada por pequenas variações dos compostos químicos e/ou do processamento do varistor. Segundo, a degradação associada com os diversos tipos de estresse (elétrico, mecânico etc) pode ser rapidamente revertida através de um recozimento em torno de 300 °C. Terceiro, o processo de degradação afeta principalmente a região de pré-ruptura e não o comportamento do varistor para tensões acima da tensão de ruptura.

A discussão sobre os possíveis mecanismos que conduzem à degradação dos dispositivos varistores necessariamente estão condicionados aos tipos de mecanismos de condução existentes em cada região da curva $E \times J$ (Fig. 2.1). Porém, para compreender os mecanismos de condução nos varistores é de fundamental importância conhecer os processos físicos da condução.

A literatura consultada, Gupta (1990); Eda (1989) e Sato et alii (1982), confirma ser a degradação mais evidente na região de baixa corrente

(item 2.5.4), sendo esta região predominantemente controlada pelos contornos dos grãos existente na microestrutura do varistor Eda (1978), afirma ser a degradação um fenômeno relacionado ao contorno do grão. Este comportamento fica mais elucidado através dos estudos realizados por Gupta & Carlson (1983), que submeteram os varistores a esforços estressantes térmicos e elétricos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.5 onde são comparadas as curvas $E \times J$ antes e após o estressamento do varistor.

Um outro importante estudo foi realizado por Eda et alii (1980). Neste estudo, verificou-se que o fenômeno da degradação apresenta diferentes comportamentos na sua característica $V \times I$, quanto ao tipo de tensão ou polarização aplicada. Quando o varistor foi submetido a uma tensão alternada, o fenômeno da degradação na curva $V \times I$ apresentava-se de forma simétrica. Porém, polarizando o varistor com uma tensão contínua, a degradação na curva $V \times I$ se mostra de forma assimétrica. A Figura 2.6, mostra o fenômeno da degradação na curva $V \times I$ devido às tensões de polarização ca e cc.

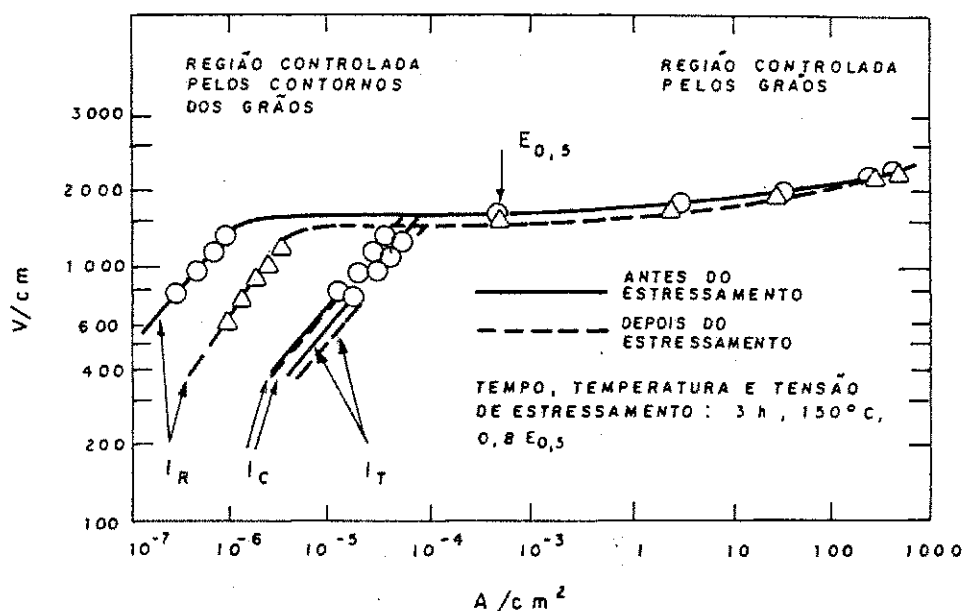


Figura 2.5 - Característica $V \times I$ antes e após a aplicação dos esforços elétricos. Note que o efeito do estressamento é mais pronunciado na região de pré-ruptura, Gupta (1990).

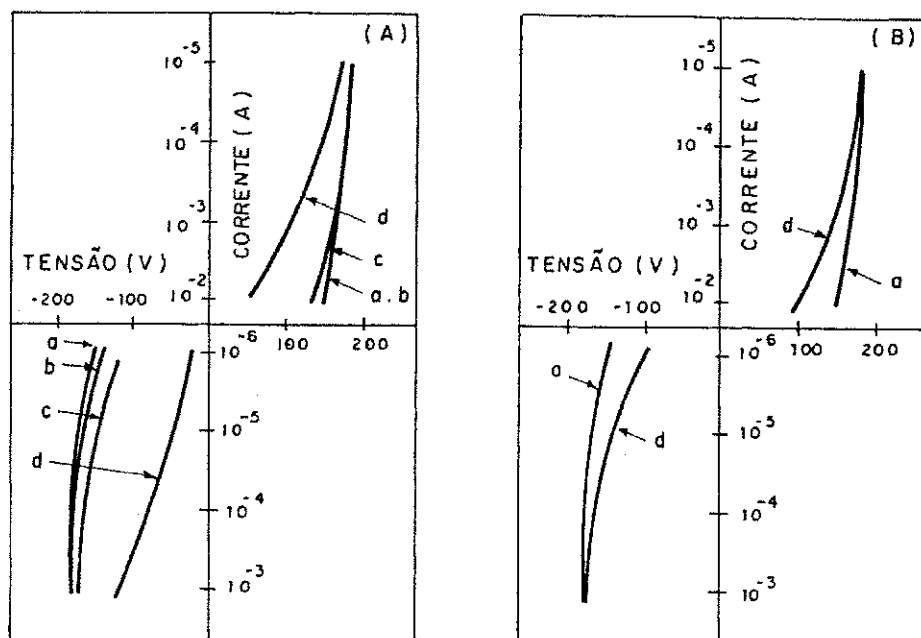


Figura 2.6 - Fenômeno da degradação na curva $V \times I$ causado por : (A) polarização cc de 95 V/mm e (B) polarização ca de 65 V_{rms}/mm em 343 °K, a: início, b: depois de um período de 100 sec, c: depois de um período de 1 h e d: depois de um período de 500 h, Eda et alii (1980).

Algumas teorias são comentadas por Eda et alii (20) e Sato (22) que tentam justificar tais fenômenos através dos mecanismos de condução dos varistores. Entretanto, as teorias apresentadas são incompletas para explicar certos resultados experimentais, como os efeitos dos aditivos e a degradação assimétrica da característica $V \times I$, Eda (1978).

2.6.2 - Modelos de Falhas devido aos Processos de Degradação

Os estudos realizados sobre os modelos de falhas em virtude da degradação do varistor, foram de suma importância para se elevar a

confiabilidade dos dispositivos varistores. Três modelos de falhas foram identificados: a perfuração elétrica, a ruptura física e o desencadeamento térmico (thermal runaway).

A perfuração elétrica é associada com a absorção excessiva de energia durante uma descarga do tipo atmosférico que acontece nas linhas de transmissão. Durante a absorção de energia, a concentração de corrente numa região do dispositivo forma zonas quentes que acarretam falhas eventuais do dispositivo pela formação de um orifício.

A ruptura física está associada a surtos de alta corrente devido ao estresse térmico local. A ruptura física é mais observada em dispositivos de grande porte onde a distribuição de temperatura pode variar consideravelmente sobre sua área.

O desencadeamento térmico está associado com a instabilidade da corrente e da tensão permanentemente aplicada como discutido anteriormente (Tópico 2.5.5 - Vida Útil).

Estudos realizados por Eda (1984), identificaram o efeito de pulsos de corrente e a duração dos pulsos nos modos de falhas. Para pulsos de duração maiores do que $100 \mu\text{s}$, o modelo de falha predominante é o da perfuração. Entretanto, para pulsos menores que $50 \mu\text{s}$, o modelo de falha apresentado na amostra é o de ruptura tipo "cracking". Partindo destas análises, para eliminar os dispositivos defeituosos, diversos fabricantes, utilizam como testes sobretensões de alta corrente. Por exemplo, aplica-se ao dispositivo um surto de 1000 A/cm^2 com forma de onda padrão $8 \times 20 \mu\text{s}$. Deste modo, caso o dispositivo apresentar algum defeito intrínseco, ocorrem falhas instantâneas. Outros testes, dependendo da aplicação, submetem os varistores a uma alta absorção de energia (250 a 300 J/cm^3) eliminando assim os dispositivos inconfiáveis.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo apresenta o procedimento experimental para a análise do efeito da temperatura no processo de degradação dos pára-raios à base de óxido de zinco. Também são enfatizados os materiais utilizados e os métodos aplicados para a medição dos parâmetros elétricos e térmicos envolvidos no processo de degradação.

3.1 - Amostras e os Esforços Elétricos e Térmicos

Os varistores, elementos não lineares à base de óxido de zinco, utilizados neste experimento foram adquiridos diretamente do fabricante, apresentando padrão internacional. Foram utilizadas 19 amostras provenientes de dois fabricantes, porém com correntes de descargas diferentes.

Vários cuidados foram considerados no "manuseio" das amostras. Entre estes cuidados os mais importantes foram: manuseio com luvas limpas, evitando o contato direto com a parede lateral das amostras; armazenagem em ambiente com temperatura em torno de 70°C e isentos de poeira; secagem das amostras na temperatura de 50°C por no mínimo 12 horas, antes da realização dos ensaios.

As aplicações dos esforços elétricos foram efetuadas com as amostras em temperaturas inferiores a 30°C; as amostras não permaneceram fora da estufa por mais de 6 horas, evitando assim a presença indevida de umidade.

As medições da corrente de fuga total e resistiva foram feitas em todas as amostras utilizadas no experimento. As medições tinham como objetivo classificar e garantir a qualidade das amostras, mas principalmente servir como base de avaliação para os efeitos provocados pelos esforços

elétricos, comparando os valores das correntes de fuga antes e após a aplicação do estresse. O método empregado para as medições das correntes foi o método "convencional", apresentado no item 3.2, conforme Figura 3.5.

Neste experimento utilizou-se como tensão de referência o valor da tensão aplicada ao elemento não linear, que proporciona uma densidade de corrente igual a 0.5 mA/cm^2 , Gupta (1990).

Para verificação do efeito da temperatura no processo de degradação dos elementos não lineares à base de ZnO, foi construída uma estufa. A temperatura da amostra imersa na estufa foi medida através de uma sonda acoplada a um termômetro digital. Um sistema de aquecimento foi desenvolvido por intermédio de resistências de baixa inércia com a finalidade de se modificar a temperatura ambiente interna à estufa. A Figura 3.1 mostra a relação entre a tensão aplicada nos terminais dos resistores e a temperatura. A Figura 3.2 mostra a curva de resfriamento da estufa no tempo. Como parte das etapas experimentais, utilizou-se um controlador digital de temperatura cedido pelo laboratório de Instrumentação Eletrônica do DEE/UFPB.

Os esforços elétricos utilizados foram a tensão alternada e impulsos de corrente, isolados e conjuntamente. A tensão alternada foi aplicada de forma permanente e suas magnitudes foram 0.75, 0.80 e 0.85 do valor da tensão de referência. Os impulsos de corrente aplicados apresentavam forma de onda $8 \times 20 \mu\text{s}$, com valor de pico de corrente de 10 KA e polaridade positiva. Os impulsos foram aplicados em intervalos de 15 e 30 minutos.

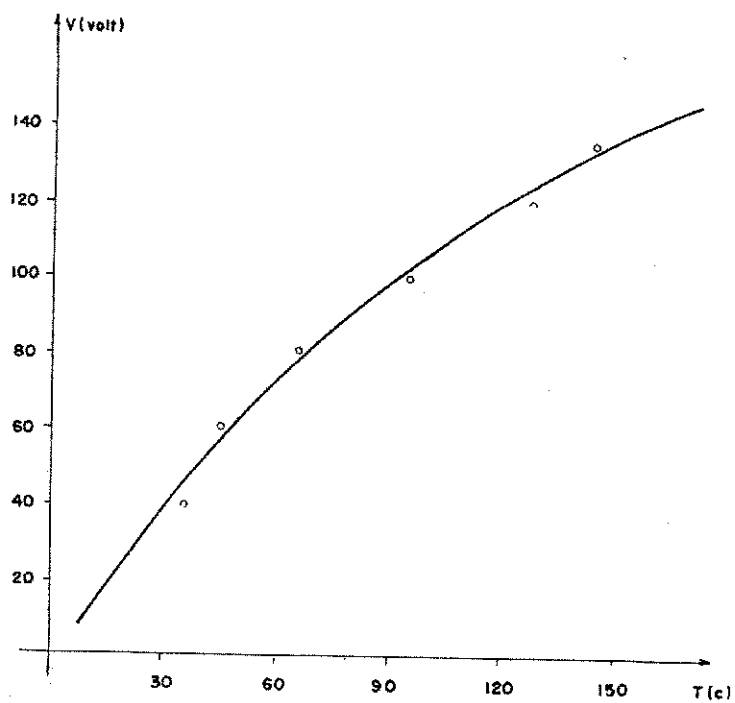


Figura 3.1 - Curva térmica da estufa, tensão (V) versus temperatura (°C).

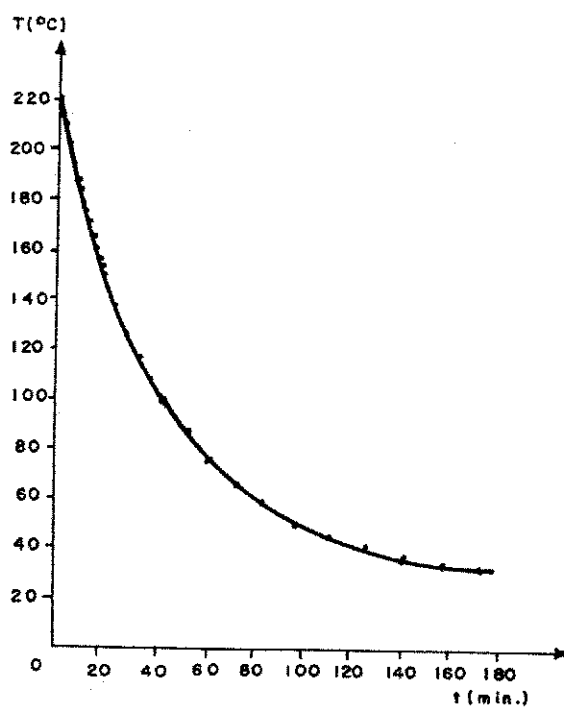


Figura 3.2 - Curva de resfriamento da estufa no tempo (min.).

3.2 - Arranjos Experimentais

3.2.1 - Gerador de Impulso de Corrente

Para estressar os elementos varistores à base de ZnO, quando da absorção de um surto transitório, semelhante a uma descarga atmosférica, utilizou-se um gerador de impulso de corrente tipo HAFELLY, catálogo (1981), com tensão nominal de 100 KV e corrente nominal de 100 KA. O gerador foi ajustado para fornecer uma corrente de descarga de 10 KA de pico, com forma de onda padronizada 8 x 20 μ s, polaridade positiva. De uma maneira simplificada, o gerador de impulso de corrente é composto por um circuito elétrico com associação de capacitores, indutores e resistores. O circuito utilizado como gerador de impulso é apresentado na Figura 3.3. O circuito pode ser dividido em duas partes. A primeira é responsável pelo gatilhamento ou trigger do gerador e compõe-se de um sistema de esferas verticalmente separadas. A segunda, formada por um circuito RLC série bem dimensionado, para a obtenção da forma de onda desejada.

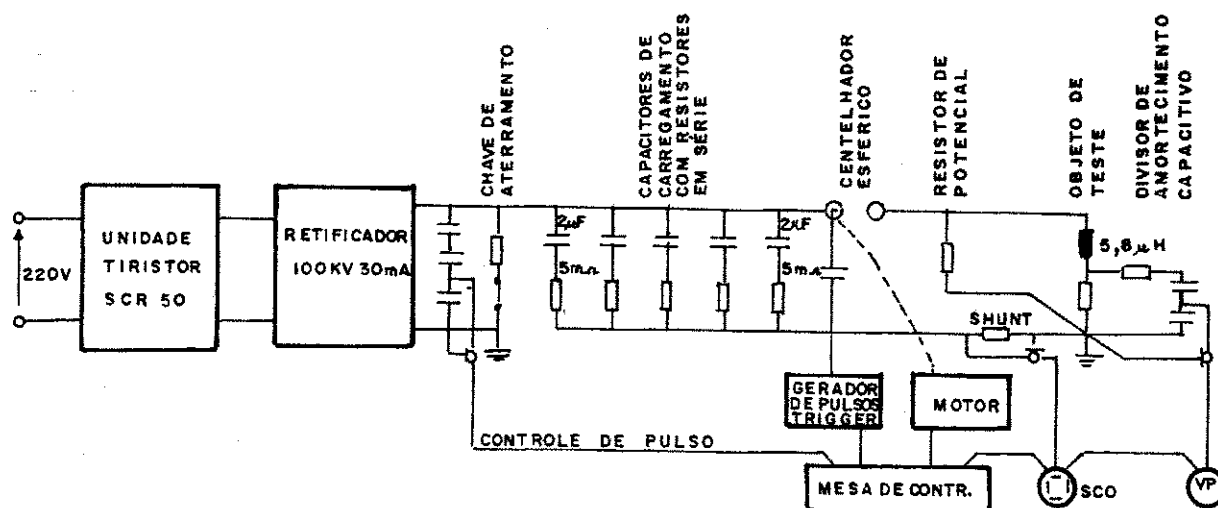


Figura 33 - Diagrama do circuito principal do gerador de impulso de corrente HAFELLY - 100 KV, 50 KJ.

Todo o circuito é automatizado, possibilitando que o espaçamento entre as esferas seja função da tensão de carregamento dos capacitores. O tempo de carregamento dos bancos capacitivos permaneceu sempre constante. Com isto se evita um carregamento desigual de energia. O nível da tensão de carregamento do banco de capacitores é, juntamente com os demais parâmetros (resistência, indutância), responsável pela magnitude do pico da corrente de descarga. A tensão de carregamento em corrente contínua é obtida por meio de um transformador variável, resistência de carregamento e uma ponte de retificação em série com uma unidade tiristorizada, como pode ser visto na Figura 3.3.

Os três componentes do circuito, capacitores, indutores e resistores são em forma de blocos (steps), podendo ser conectados ou não ao circuito.

Com extrema facilidade é possível simular impulsos de manobra, impulsos atmosféricos e impulsos retangulares, todos com forma de onda padrão. Desta forma torna-se possível um variado número de alternativas para a geração dos impulsos exponenciais de corrente. As medições do valor de pico de corrente foi realizada através de um voltímetro de pico associada a um shunt.

3.2.2 - Circuito de Tensão Alternada

Um arranjo experimental para tensão alternada foi utilizado para aplicar aos elementos um contínuo esforço elétrico. A presença permanente de um campo elétrico resulta no aquecimento das amostras varistoras, conforme apresentado no Capítulo II, devido à presença permanente da corrente de fuga resistiva. O circuito também foi utilizado para medições da corrente de fuga resistiva e total, utilizando o método convencional. Este, também denominado Método do Amplificador Diferencial, foi utilizado por apresentar boa precisão nos resultados, sendo largamente difundido, Verdolin et alii (1991) e Meira (1980). O circuito utilizado na aplicação da tensão alternada é apresentado conforme Figura 3.4.

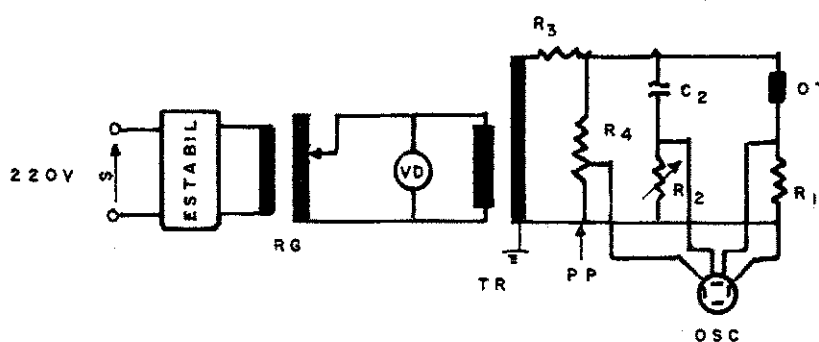


Figura 3.4 - Circuito completo de tensão alternada utilizando o método convencional.

O método convencional ou "método do amplificador diferencial" utilizado para medição da componente de fuga resistiva usa como princípio o cancelamento da componente de fuga capacitiva, Meira (1980). Para se obter uma boa compensação da componente capacitiva da corrente de fuga, foi utilizado um capacitor de alta tensão (100 pF), uma fonte de alta tensão (5 KVA, 100 KV) com o mínimo de perdas, um osciloscópio Tektronic - 7613, equipado com amplificador diferencial , além dos componentes resistivos.

O arranjo esquemático para medição da corrente de fuga resistiva é apresentado na Figura 3.5. Para que a tensão de saída U_0 do amplificador diferencial seja proporcional à corrente resistiva I_r , é necessário anular a componente capacitiva da corrente de fuga total. Considerando que a resistência R_1 apresenta um valor demasiadamente inferior comparado com a impedância do pára-raios (obj. teste), então a tensão U_1 , dividida por esta resistência, converte-se em uma boa medição para a corrente de fuga total, a qual é predominantemente capacitiva. Similarmente, se a resistência R_2 for bastante inferior à impedância X_{C2} , a corrente I_2 será predominantemente capacitiva e a tensão U_2 pode ser ajustada variando-se R_2 . Através deste artifício, a tensão U_2 torna-se igual à componente reativa da tensão U_1 e a tensão de saída U_0 do amplificador diferencial torna-se proporcional à corrente resistiva I_r , como se desejava. Experimentalmente, o valor de R_2 é ajustado de tal maneira que a tensão de saída do amplificador diferencial U_0 esteja em fase com a tensão de entrada do circuito.

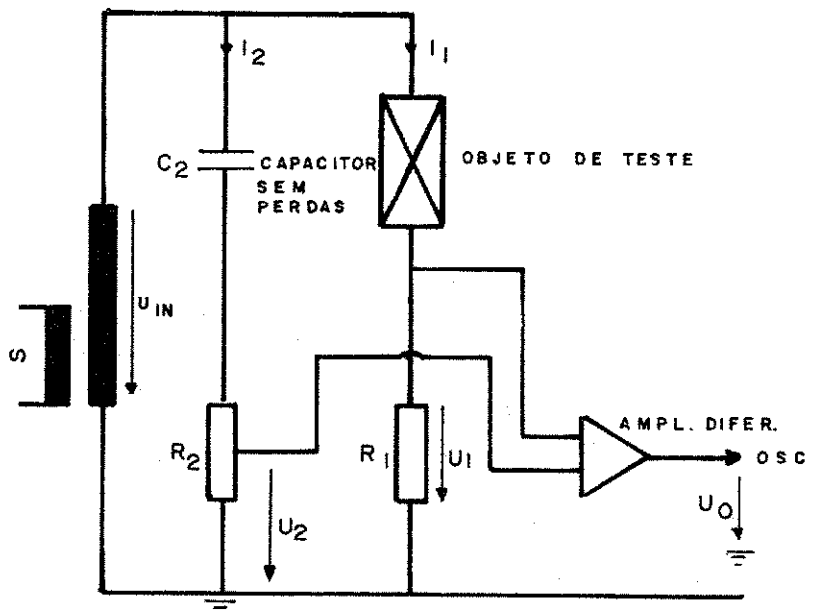


Figura 3.5 - Arranjo esquemático para medição da corrente de fuga resistiva utilizando amplificador diferencial.

3.2.3 - Circuito de Comutação e Controlador Digital de Temperatura.

O circuito de comutação tem por finalidade a separação dos circuitos de tensão alternada e impulso de corrente. Na impossibilidade de ser obter um circuito totalmente automatizado, onde a aplicação permanente da tensão alternada e impulsos de correntes ocorreriam sem a desenergização do circuito, optou-se pela utilização de duas chaves seccionadoras.

As chaves seccionadoras utilizadas são bipolares, tipo faca, com abertura central e nível de isolamento de 15 KV, utilizadas em sistemas de distribuição de energia. Para a aplicação do impulso de corrente, as chaves seccionadoras eram manobradas separando os respectivos circuitos; a operação de transferência não excedia a três minutos. Imediatamente, após a aplicação

do impulso, o circuito de tensão alternada era reenergizado.

O controlador digital de temperatura é do tipo on-off e foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB. Contém oito canais de entrada que fornecem sequencialmente e de forma cíclica o valor numérico da temperatura de cada sensor e o número do canal correspondente através do mostrador decimal disponível no próprio painel. Os valores de referência de temperatura são ajustados independentemente para cada canal.

A leitura da temperatura e a comparação desta com um valor de referência ajustável determina o acionamento automático da carga de aquecimento. A carga de aquecimento foi constituída por um sistema de resistência de baixa inércia com uma potência de 25 W conectados em paralelo.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios já descritos no Capítulo III, que tiveram como objetivo provocar a degradação acelerada dos elementos varistores à base de ZnO. Os ensaios adotados foram basicamente: a tensão alternada continuamente aplicada, nos valores de 0.85; 0.80 e 0.75 da tensão de referência do elemento varistor com o monitoramento das correntes de fuga total e resistiva, a variação da temperatura ambiente na qual a amostra estava envolvida para valores previamente definidos e, finalmente, a aplicação de impulsos de corrente com intervalos entre impulsos definidos.

4.1 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada na Temperatura ambiente.

Nesta primeira etapa, após os procedimentos descritos no capítulo III quanto ao manuseio das amostras, iniciou-se o processo de estressamento com aplicação de 0.85, 0.80 e 0.75 da tensão de referência da amostra.

Os ensaios realizados com tensão alternada em $0.85V_{ref}$ apresentaram um processo de desencadeamento térmico bastante rápido, no tempo de 210 minutos. A corrente de fuga duplicou e a temperatura se elevou acima de 200°C , conforme mostra a Figura 4.1. A curva apresentada também demonstra a dependência exponencial da componente resistiva da corrente de fuga total com a temperatura. A dependência da corrente resistiva com a temperatura mostra claramente que o elemento varistor, à base de ZnO, apresenta o seu coeficiente de variação da resistividade com a temperatura negativo.

A potência em ca, dissipada pela presença contínua da corrente de

fuga resistiva, foi de 54.0 W. Este efeito traduz um aumento das perdas por efeito Joule que provavelmente conduziram à degradação permanente da amostra.

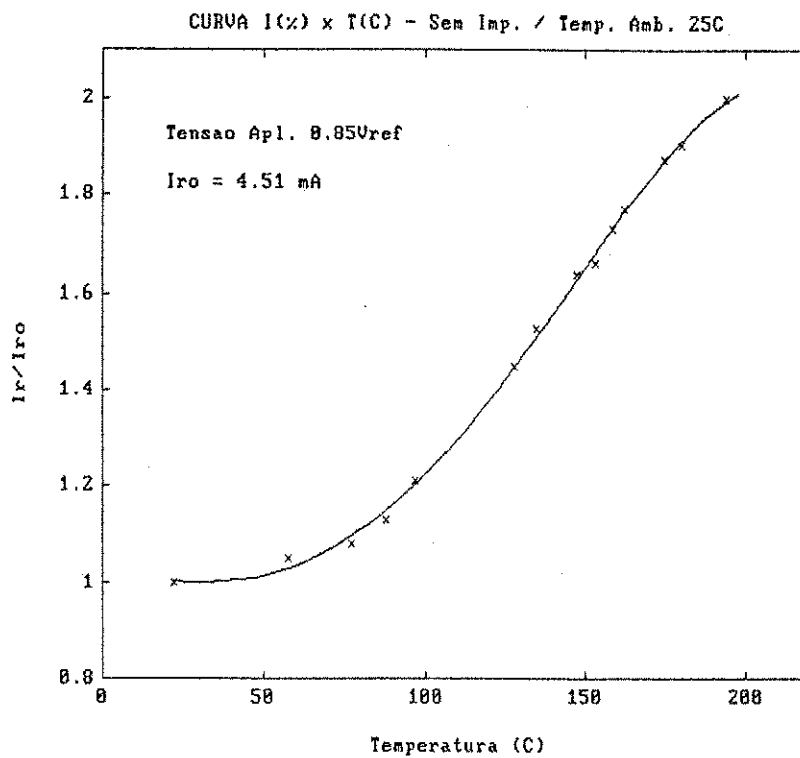


Figura 4.1 - Variação percentual da componente de fuga resistiva em função da temperatura.

Na tensão de 0.80Vref, a temperatura atingiu 200°C num tempo de 525 minutos, provocando um aumento percentual em torno de 50 % na corrente de fuga resistiva. Os dados obtidos são representados na Figura 4.2. Quando a temperatura da amostra ultrapassou os 200°C, considerou-se um quadro de desencadeamento térmico. Neste nível de tensão aplicada, a potência gerada devido as perdas por efeito Joule excederam a capacidade de dissipação da amostra/arranjo. De acordo com os resultados obtidos, a aplicação permanente da tensão ca resultou em perdas por efeito Joule em torno de 23 W no elemento varistor.

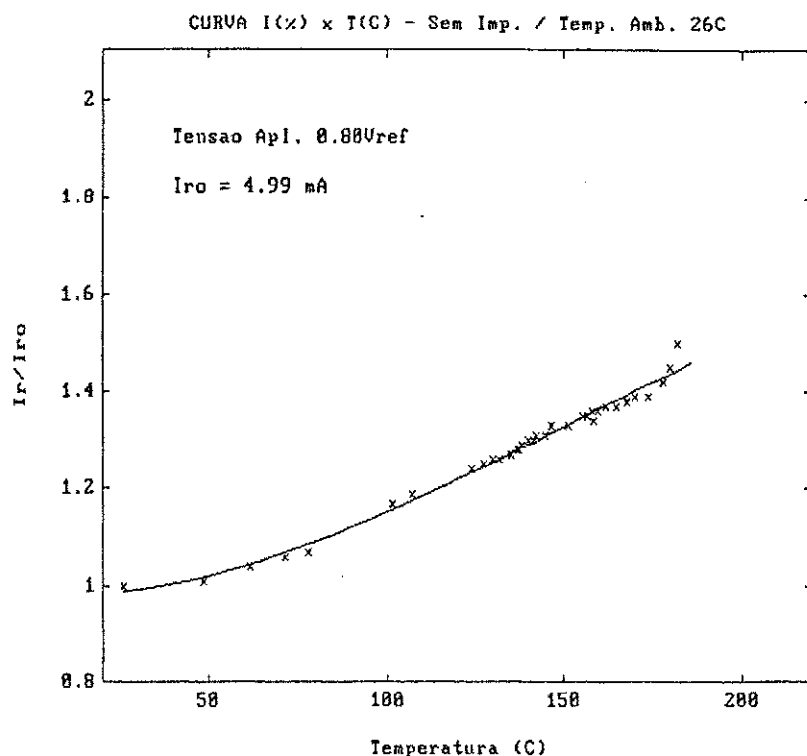


Figura 4.2 - Curva de variação da componente de fuga resistiva em pu versus a temperatura no ambiente da amostra.

Na tensão de 0.75Vref constatou-se o equilíbrio entre as potências geradas e dissipadas. O tempo decorrido para a ocorrência do equilíbrio térmico foi de apenas 195 minutos. As medições da corrente de fuga resistiva constatarem uma variação percentual de apenas 2% em relação ao seu valor inicial com a temperatura de equilíbrio em torno de 64°C. A potência ca dissipada no elemento varistor foi de 6,3 W. Desta forma, a utilização deste nível de tensão não foi suficiente para desencadear o processo de ruptura térmica na amostra.

A Figura 4.3, evidencia o equilíbrio obtido entre as potências geradas e dissipadas no experimento. Isto fica mais sugestivo por causa da não ocorrência de variações expressivas na componente resistiva da corrente de fuga e pelo fato de não ocorrer acréscimo na temperatura do sistema amostra/arranjo, conforme a teoria do Capítulo II.

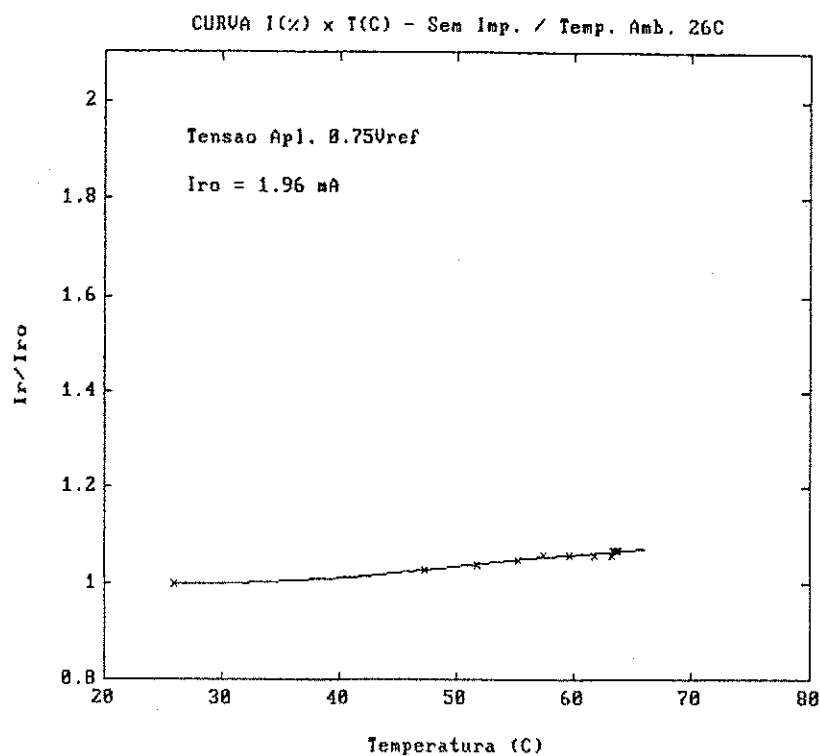


Figura 4.3 - Variação percentual da componente resistiva em pu versus a temperatura do elemento.

Uma importante observação é ressaltada quando da leitura da corrente de fuga resistiva e total. Verificou-se que, nos níveis de tensões utilizadas de 0.85; 0.80 e 0.75 da tensão de referência da amostra, não há distinção entre as magnitudes das correntes de fuga resistiva e total, diferenciando-se apenas na forma de onda apresentada, conforme Figuras 4.4 e 4.5. Isto porque, de acordo com a literatura discutida no Capítulo II, nesta região em estudo, a componente capacitiva da corrente de fuga total é demasiadamente pequena comparada à componente de fuga resistiva. Com isto, os valores de pico das duas componentes, resistiva e total, são praticamente iguais.

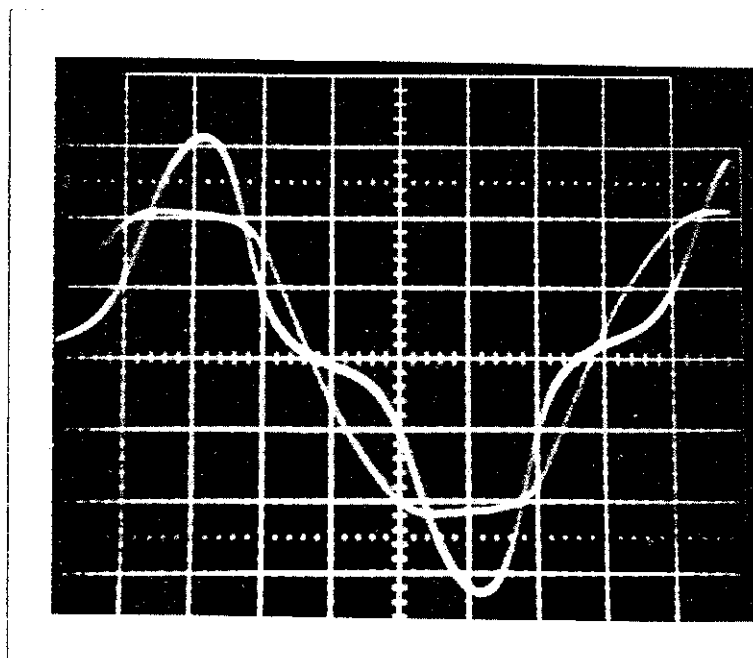


Figura 4.4 - Forma de onda característica da componente de fuga resistiva em "casamento" com a tensão alternada. Tensão aplicada 2.8 KV, varredura time/div 2ms, vertical 0.2 V/div

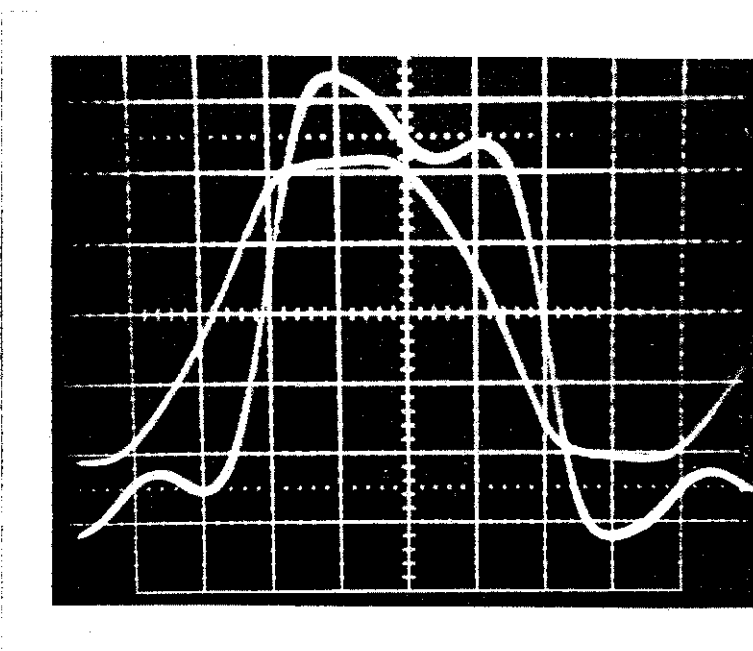


Figura 4.5 - Forma de onda da corrente de fuga total do varistor e sinal de entrada alternado. Tensão aplicada 2.8kv, varredura time/div 2ms, vertical 0,5 v/div.

A comparação entre os resultados com níveis de tensões de 0.85 e 0.80 da tensão de referência mostra uma redução na potência em ca de 39.2 %. Porém, com a redução da tensão para 0.80Vref, o tempo necessário para que a amostra iniciasse o processo de instabilidade térmica foi praticamente três vezes superior ao ensaio com tensão aplicada de 0.85Vref. Em relação ao ensaio de 0.75Vref, verifica-se uma diferença bastante acentuada entre as potências envolvidas. A potência em ca teve uma redução de aproximadamente nove vezes em relação ao ensaio de 0.85 e de quatro vezes em relação ao ensaio de 0.80Vref. No nível de 0.75 da tensão de referência, a amostra não apresentou variação apreciável em sua componente de fuga resistiva que justificasse o início do processo de instabilidade térmica, pelo menos no tempo do experimento considerado.

Como síntese dos resultados obtidos nestes três experimentos iniciais, pode-se assegurar que a alta taxa de crescimento da corrente de fuga resistiva é um indicativo bastante seguro de que a amostra encaminha-se para desencadear o processo de ruptura térmica.

4.2 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada mais Temperatura Ambiente Modificada.

O procedimento de realização deste item está relatado no Capítulo III. A temperatura ambiente foi fixada inicialmente nos patamares de 60°C e 80°C através da geração de calor proveniente de valores de tensão previamente determinados de modo experimental.

Os níveis de tensões de 0.80 e 0.85 da tensão de referência da amostra não foram mais utilizados pois, na etapa anterior, verificou-se que todos os ensaios realizados nestes níveis de tensões apresentaram o processo de desencadeamento térmico na temperatura ambiente sendo, portanto,

desnecessário utilizá-los com temperaturas acima da ambiente.

Uma nova bateria de ensaios foi adotada com o nível de referência da tensão em $0.75V_{ref}$, temperatura ambiente inicial de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com um tipo de amostra do mesmo fabricante anterior. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema amostra/arranjo absorveu e dissipou toda energia envolvida ao longo do processo. O equilíbrio térmico entre as potências geradas e dissipadas ocorreu no tempo de 210 minutos, quando se observou que a temperatura na amostra não mais se elevaria, estabilizando em 100°C .

Os resultados obtidos nas medições da componente de fuga resistiva demonstraram uma elevação percentual em torno de 20% em comparação ao seu valor inicial, não sendo suficiente para degradar a amostra, conforme mostra a variação da componente resistiva em função da temperatura, plotada na Figura 4.6.

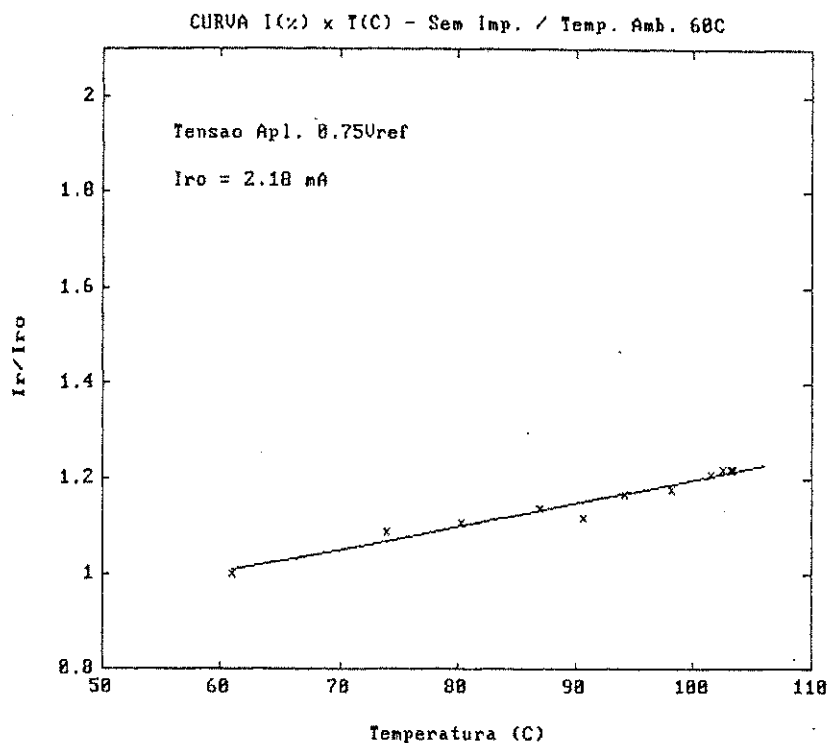


Figura 4.6 - Variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura.

A potência dissipada com aplicação da tensão ca foi de 8.0W. A modificação da temperatura ambiente para 60°C resultou numa potência adicional no ambiente da amostra de 10,4W fornecida pelo sistema de aquecimento da estufa. A baixa potência em ca, dissipada pela amostra quando comparada aos ensaios de 0.85 e 0.80 da tensão de referência da amostra, é um indicativo da capacidade de absorção e dissipação do sistema amostra/arranjo.

Comparando-se os resultados obtidos da corrente resistiva da amostra utilizada no item 4.1, nível de tensão de 0.75 Vref. e temperatura ambiente de 26°C, com a corrente resistiva no ensaio utilizando 0.75 Vref. e temperatura de 60°C, verifica-se um aumento da corrente em torno de 28% com relação à temperatura de 26°C. Isto é decorrente da condução intrínseca dos varistores à base de ZnO, por apresentarem um coeficiente da resistividade com a temperatura negativo, já que um aumento da temperatura ambiente provoca, nas amostras varistoras, uma diminuição da resistividade. O aumento da corrente de fuga surge também como resultado do fenômeno da polarização (formação de barreira de potencial) sobre a condução, nesta região de estudo. Esta polarização pode ser causada pela migração de íons nas interfaces das fronteiras entre os grãos, Gupta (1990) e Gupta et alii (1981).

Um outro ensaio foi utilizado com o mesmo nível de tensão 0.75Vref, mas com a temperatura ambiente de 80°C e mesmo tipo de amostra do fabricante anterior. Nesta etapa, verificou-se o fenômeno do desencadeamento térmico no intervalo de 420 minutos, com a temperatura se elevando para mais de 220°C. As medições da componente de fuga resistiva indicaram um aumento percentual superior a 90% comparando-se ao seu valor inicial. A Figura 4.7 traduz o crescimento acentuado da componente de fuga resistiva em função da temperatura.

A aplicação contínua da tensão ca proporcionou uma dissipação de

22.0W, devido ao aumento gradual da componente de fuga resistiva, resultando na provável degradação da amostra ensaiada. A potência dissipada pelo sistema de aquecimento interno da estufa e necessária à elevação da temperatura ambiente para 80°C foi de 16.0W.

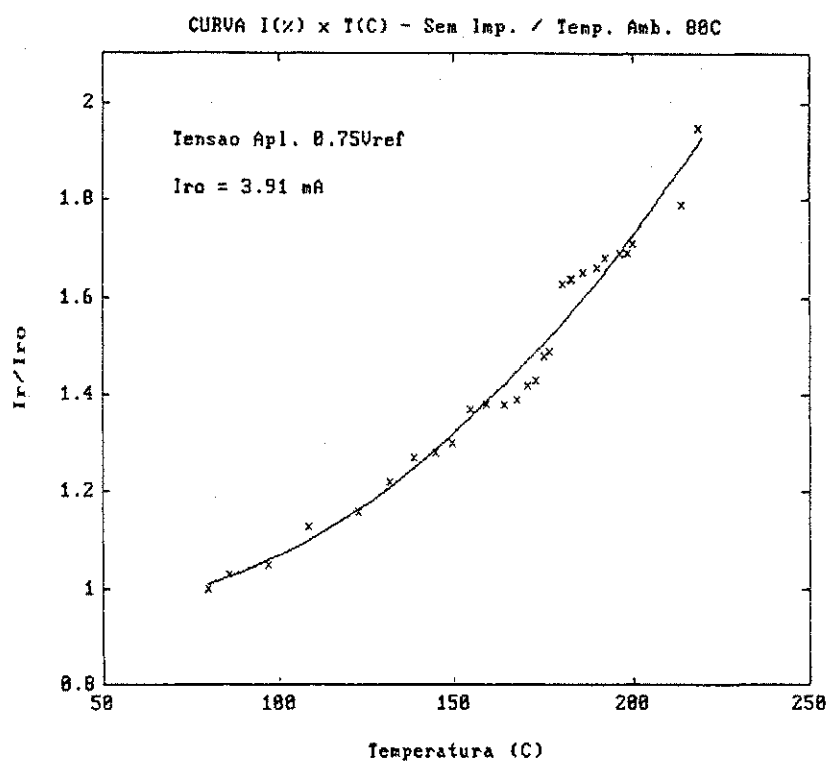


Figura 4.7 - Curva de variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura.

A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios que se iniciaram com a temperatura em 60 e 80°C, tensão de 0.75Vref e mesmo fabricante, mostra que a componente de fuga resistiva praticamente dobrou de valor no ensaio com a temperatura inicial de 80°C. Este resultado justifica o efeito acentuado que os dispositivos varistores à base de ZnO apresentam em relação à temperatura. A elevação da temperatura no patamar de 80°C fez com que a capacidade de dissipação da energia envolvida no sistema fosse

dificultada, iniciando o fenômeno do desencadeamento térmico. Este aumento na corrente é justificado por Matsuoka (1971), quando revela que a dependência da corrente de fuga com a temperatura, nesta região em estudo, surge não só devido aos fenômenos da polarização orientacional e condução mas, também, devido à migração de elétrons sobre as barreiras de potencial nas fronteiras dos grãos de ZnO como consequência do processo de ativação térmica. Isto fica melhor evidenciado quando são considerados os valores percentuais da corrente de fuga resistiva, potência dissipada e energia envolvida no processo.

A Tabela I apresenta dados relevantes obtidos nos dois ensaios realizados neste item e no ensaio que utilizou a temperatura ambiente inicial de 25°C. Os resultados mostram as disparidades entre a ocorrência ou não do fenômeno do desencadeamento térmico.

Tabela I - Variação da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada para os ensaios com tensão aplicada de 0.75Vref nas temperaturas ambiente, 80 e 60 °C.

Vref	Ir(%)			Pca(W)		
	amb.	60°C	80°C	amb.	60°C	80°C
0.75	2.0	22.0	95.0	6.3	8.0	22.0

Todavia, tomando-se os dados obtidos no ensaio de 0.75Vref na temperatura de 80°C com os resultados do ensaio de 0.85Vref, que utilizou a

temperatura ambiente de 25°C, verifica-se que, no ensaio de 0.85Vref, a taxa de crescimento da corrente resistiva é bem mais acentuada, apesar das amostras desencadearem o processo de ruptura térmica. Isto sugere que, em determinados níveis de tensão, a influência do coeficiente não linear, α , no processo de degradação ou envelhecimento dos dispositivos à base de ZnO é mais pronunciada e, em consequência, reduzem consideravelmente o seu tempo de vida útil, apesar da grande influência da temperatura na degradação das amostras.

A Tabela II apresenta dados obtidos referentes às variações de percentuais de I_r e da potência dissipada para os níveis de tensão de 0.85Vref e 0.75Vref nas temperaturas ambiente 60 e 80°C.

Tabela II - Variação da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada para os ensaios com tensão de 0.75Vref e 0.85Vref na temperatura ambiente, 60 e 80°C.

Vref	$I_r(\%)$			$P_{ca}(W)$		
	amb.	60°C	80°C	amb.	60°C	80°C
0.75	2.0	22.0	95.0	6.3	8.0	22.0
0.85	100	--	--	54.0	--	--

Os resultados dos ensaios com $0.75V_{ref}$ e temperatura de $80^{\circ}C$ e aqueles obtidos no item 4.1, que utilizaram a tensão de $0.80 V_{ref}$ e temperatura ambiente inicial de $26^{\circ}C$, mostraram que o processo de desencadeamento térmico verificado na amostra ensaiada com um menor nível de tensão e a temperatura inicial de $80^{\circ}C$, apresentaram uma maior taxa de crescimento da componente de fuga resistiva num menor intervalo de tempo, resultando no processo de instabilidade térmica. Esta comparação evidencia a influência da temperatura e a importância de um perfeito mecanismo de transferência de calor no processo de degradação dos elementos não lineares que, neste caso, foi mais pronunciada quando comparada ao ensaio com tensão elevada de $0,75$ para $0,80$ de V_{ref} .

A Tabela III apresenta os dados referentes aos dois ensaios realizados na tensão de $0.80V_{ref}$ com temperatura ambiente de $26^{\circ}C$ e $0.75V_{ref}$ com temperatura ambiente de $26^{\circ}C$ e $80^{\circ}C$.

Tabela III- Variação percentual da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada para os ensaios com 0.80 e $0.75V_{ref}$ nas temperaturas ambiente e $80^{\circ}C$.

Vref	I _r (%)		P _{ca} (W)	
	amb.	80°C	amb.	80°C
0.75	2.0	95.0	6.3	22.0
0.80	50.0	-	23.0	-

Os ensaios realizados nos itens 4.1 e 4.2 constataram a enorme dependência que a corrente de fuga resistiva sofre com o nível de tensão

aplicado, associado ao efeito da temperatura na qual a amostra está envolvida, conforme discutido no Capítulo II da revisão bibliográfica.

Experimentalmente, verificou-se que a provável degradação apresentada pelas amostras nestes dois itens iniciais surgiu como resultado do aumento gradual da componente de fuga resistiva gerando, em consequência, um aumento da potência em ca. De acordo com a teoria discutida no Capítulo II, o aumento da potência em ca, devido à aplicação contínua da tensão na frequência industrial (60 Hz), gera uma certa quantidade de calor, surgida como efeito das perdas por efeito Joule. Portanto, quando o sistema ensaiado atingiu a sua máxima capacidade de absorção de calor, os incrementos adicionais de energia conduziram a um processo de realimentação contínua resultando na instabilidade térmica e na possível destruição da amostra sob ensaio.

4.3 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada mais Impulso de Corrente na Temperatura Ambiente.

Nesta fase serão analisados os processos de degradação na temperatura ambiente utilizando-se tensão alternada com impulsos de corrente em forma de onda padrão $8 \times 20 \mu\text{s}$, polaridade positiva e corrente de descarga de 10 KA, conforme procedimento descrito no Capítulo III, item 3.2.1. A finalidade foi provocar o estressamento da amostra, devido não só ao contínuo campo elétrico imposto pela tensão alternada na frequência industrial mas, também, devido aos esforços elétricos e térmicos provenientes dos impulsos atmosféricos que provocam os tipos de mecanismos de falhas descritos no Capítulo II, item 2.6.2.

A tensão de estressamento utilizada foi de 0.75Vref. Inicialmente, aplicaram-se impulsos de corrente padronizados no intervalo de 30 minutos. A

temperatura ambiente inicial estava em torno de 26°C. Os dados obtidos demonstraram que o elemento varistor não sofreu o processo de desencadeamento térmico. A energia envolvida devido a aplicação contínua da tensão ca e dos surtos transitórios foi dissipada através do sistema amostra/arranjo. O equilíbrio térmico entre as potências geradas e dissipadas ocorreu no tempo de 330 minutos com a temperatura se estabilizando em 80 °C. As medições obtidas para corrente de fuga resistiva apresentaram uma variação média de 3 %.

A potência em ca dissipada em todo o processo experimental devido à aplicação contínua da tensão e responsável pelas perdas por efeito Joule foi de 9.3 W e, para cada impulso de corrente, a amostra era submetida a uma energia instantânea de 563,0 J. Como apresentado no Capítulo II, a cada impulso de corrente a amostra varistora era submetida a uma variação na sua temperatura tendo em vista a absorção da energia proveniente do surto transitório. Caso o sistema amostra\arranjo não apresente capacidade de dissipação da energia, os impulsos aplicados conduzem ao processo de instabilidade térmica. De acordo com os dados, verificou-se para este item que o sistema amostra/arranjo não apresentou o fenômeno da instabilidade térmica, pois o sistema foi capaz de absorver e dissipar a potência injetada.

A cada impulso aplicado, observou-se experimentalmente que a amostra varistora recebia um incremento de 2.3°C em sua temperatura. Portanto este incremento de temperatura não causou variações significativas nas mediações das correntes antes e após à aplicação dos impulsos. Deve-se salientar que não se registraram tipos de falhas que resultassem na ruptura elétrica dos amostras ensaiadas, como citado no Capítulo da revisão bibliográfica.

Uma análise dos resultados obtidos entre os níveis de energia envolvidos neste experimento com os experimentos do item 4.1 e 4.2 é

apresentada no item 4.7.

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados de forma gráfica com o percentual da corrente de fuga resistiva em função da temperatura, Figura 4.8. Portanto, a aplicação dos impulsos de corrente com a tensão de $0,75 V_{ref}$ resultaram numa pequena taxa de crescimento na componente resistiva, devido aos impulsos aplicados.

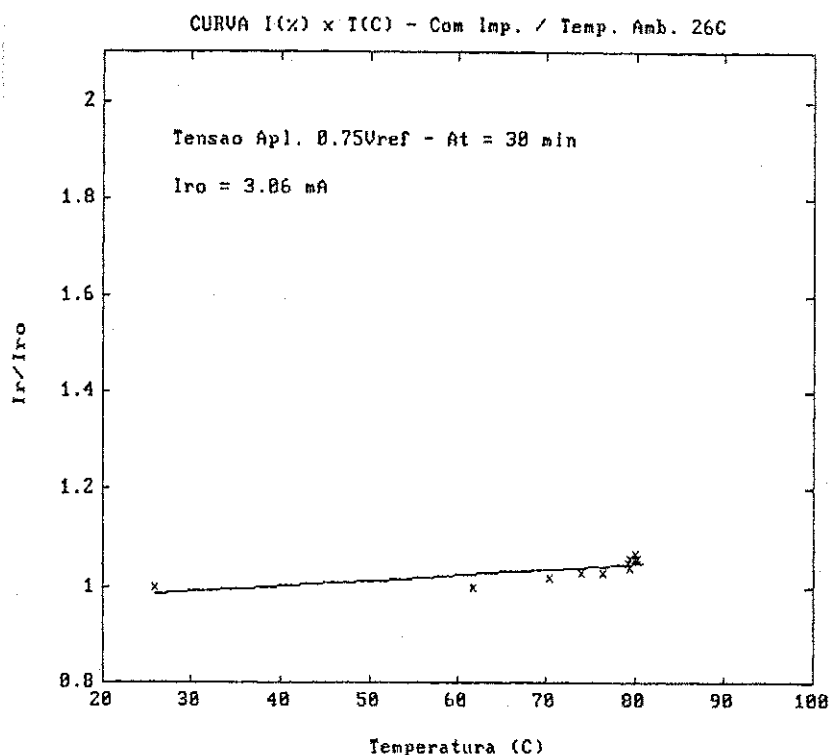


Figura 4.8 - Curva de variação da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.

Posteriormente, utilizando-se uma amostra de novo fabricante, iniciou-se outro experimento na tensão de $0,75V_{ref}$, temperatura ambiente de 26°C e intervalos de impulsos reduzidos de 30 para 15 minutos. O objetivo deste procedimento era provocar um maior estressamento e com isto acelerar o processo de degradação dos elementos varistores.

Os resultados obtidos constataram que a amostra não apresentou o processo de desencadeamento térmico, dissipando toda energia absorvida

devido à aplicação do surto transitório e da tensão ca. O equilíbrio entre as potências geradas e dissipadas ocorreu no tempo de 210 minutos com a temperatura se estabilizando em torno de 64°C. A corrente de fuga resistiva teve um aumento percentual de apenas 3%, ocasionando uma variação mínima nas perdas por efeito joule. Com isto, a potência em ca dissipada devido à aplicação da tensão alternada foi de apenas 5.5W. Portanto, mesmo com aplicação de impulsos de alta corrente que resultavam em uma energia instantânea de 540 J no elemento varistor, o sistema amostra/arranjo não apresentou indícios de uma provável instabilidade térmica no período considerado no experimento. Os níveis de energia e sua comparação com outros itens são apresentados no item 4.7.

A Tabela IV sintetiza os dados da potência variação de I_r nos ensaios com impulsos aplicados em intervalos de 15 e 30 minutos e os compara com os dados apresentados nos itens 4.1 e 4.2, na temperatura ambiente.

Tabela IV - Variação da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada para diversos níveis de tensão com aplicação conjunta de impulsos de alta corrente na temperatura ambiente.

Impulso	Vref	Temperatura Ambiente	
		I_r (%)	P_{ca} (W)
	0.85	100.0	54.0
-	0.80	50.0	22.8
	0.75	2.0	6.3
30 min	0.75	3.0	9.3
15 min	0.75	3.0	5.5

A Figura 4.9, mostra a variação percentual da corrente de fuga resistiva com a temperatura para os dois ensaios realizados (impulsos de 30 e 15 minutos). A partir dos gráficos obtidos, verifica-se que praticamente não houve variação expressiva na componente de fuga resistiva. Desta forma, não se observa, nestes dois ensaios, influência significativa com a diminuição dos intervalos de impulsos aplicados.

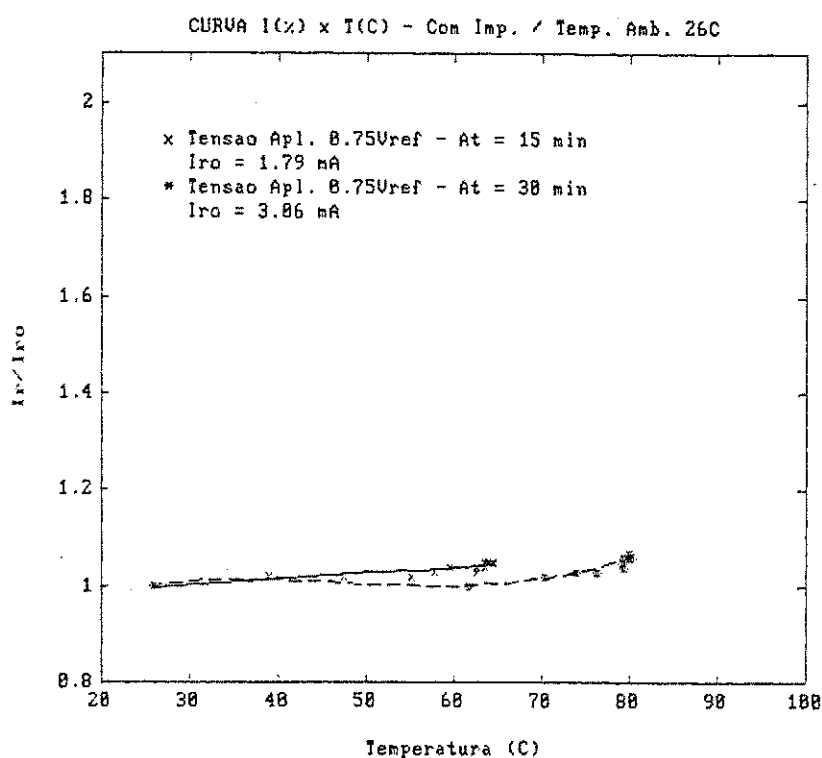


Figura 4.9 - Curva comparativa da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.

Vale salientar que as diferenças obtidas, no tempo de equilíbrio entre as potências geradas e dissipadas e a respectiva temperatura de estabilização da amostra para ensaio com impulsos aplicados de 15 minutos, tempo de estabilização 210 minutos e para ensaio com impulsos aplicados de 30

minutos, tempo de estabilização 330 minutos, provavelmente se devem à influência imposta através das manobras por parte do circuito de comutação e necessárias à aplicação dos impulsos, conforme discutido no item 3.2.

4.4 - Análise e Discussão do Processo de Degradação com Tensão Continuamente Aplicada associada a Impulsos de Alta Corrente com a Temperatura Ambiente Modificada.

O objetivo deste procedimento experimental foi a verificação do comportamento dos elementos varistores quanto à sua capacidade de absorção e dissipação de calor. Conforme apresentado no Capítulo II, a temperatura ambiente na qual está envolvida o elemento varistor, associada à aplicação permanente de um campo elétrico e a solicitações transitórias provenientes dos impulsos, aceleram o processo de degradação ou envelhecimento dos dispositivos varistores à base de ZnO.

Nesta etapa, tal como nos ensaios realizados no item 4.2, foram definidos experimentalmente níveis de tensão necessários a aplicação no sistema de aquecimento da estufa como meio de se controlar a temperatura ambiente e com isto gerar quantidades constantes de calor, na temperaturas previamente definidas de 60 e 80°C.

Inicialmente, as amostras foram submetidas à tensão de $0.75V_{ref}$, com a temperatura inicial de 60°C. Para cada intervalo de 30 minutos, aplicava-se um impulso de corrente de 10 KA, polaridade positiva e forma de onda $8 \times 20 \mu s$.

Os procedimentos adotados para medição da corrente resistiva obedeceram aos descritos no Capítulo III. Imediatamente, antes e após a aplicação do impulso, a corrente de fuga e a temperatura eram medidas. Os dados obtidos são apresentadas graficamente conforme Figura 4.10.

Com a modificação da temperatura ambiente para 60°C, a corrente de fuga apresentou uma variação percentual de 18% em relação ao seu valor inicial. Porém, este aumento não conduziu ao desencadeamento térmico da amostra varistora. A temperatura se estabilizou em torno de 110°C, em um tempo de 330 minutos.

Uma energia instantânea de 540 J foi fornecida a amostra por meio dos impulsos de corrente. Os impulsos foram aplicados com intervalos de 30 minutos, a potência em ca, devido a aplicação contínua da tensão de frequência industrial, foi de 8.4W e a potência dissipada para o meio devido ao sistema de aquecimento da estufa foi de 10.4W. Verificou-se que o sistema amostra/arranjo apresentou capacidade de dissipação de toda potência envolvida no experimento.

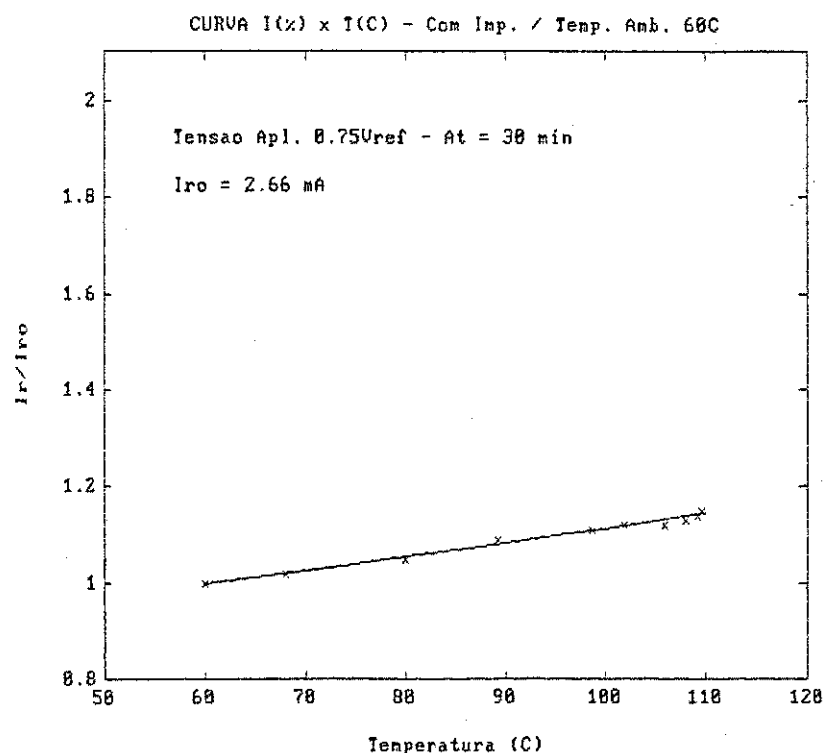


Figura 4.10 - Taxa de crescimento da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.

Utilizando-se uma amostra de um outro fabricante, iniciou-se um novo experimento no mesmo nível de tensão ($0.75V_{ref}$), temperatura ambiente inicial de 60°C porém com os intervalos de impulsos reduzidos para 15 minutos. Os mesmos procedimentos, anteriormente descritos no Capítulo III, foram adotados para as leituras da corrente de fuga resistiva antes e após a aplicação dos impulsos, bem como para o monitoramento da temperatura ambiente.

Através dos resultados obtidos, constatou-se que a redução dos intervalos de impulsos para 15 minutos resultaram num aumento percentual da corrente de fuga resistiva em 50 %. Este resultado indica uma influência significativa dos intervalos de impulsos aplicados sobre a capacidade de dissipação de calor do sistema amostra/arranjo. O aumento percentual da corrente de fuga resistiva mostra o início do processo de desencadeamento térmico sofrido pela amostra varistora. A temperatura ambiente se elevou acima de 200°C , em um tempo de 345 minutos.

Na Figura 4.11 tem-se a variação percentual da componente resistiva em função da temperatura. Uma síntese dos resultados obtidos para os dois ensaios realizados é apresentado na Figura 4.12. Através das curvas obtidas, verifica-se a diferença entre a taxa de crescimento da corrente na amostra que desencadeou o fenômeno da instabilidade térmica e na amostra que não ocorreu o desencadeamento. Cada impulso de corrente fornecido a amostra conduziu a redução gradual da máxima temperatura para qual o varistor foi projetado. Com isto, os incrementos adicionais de potência fornecidos à amostra diminuíram sua máxima capacidade de absorção de energia, resultando na perda da estabilidade térmica do varistor.

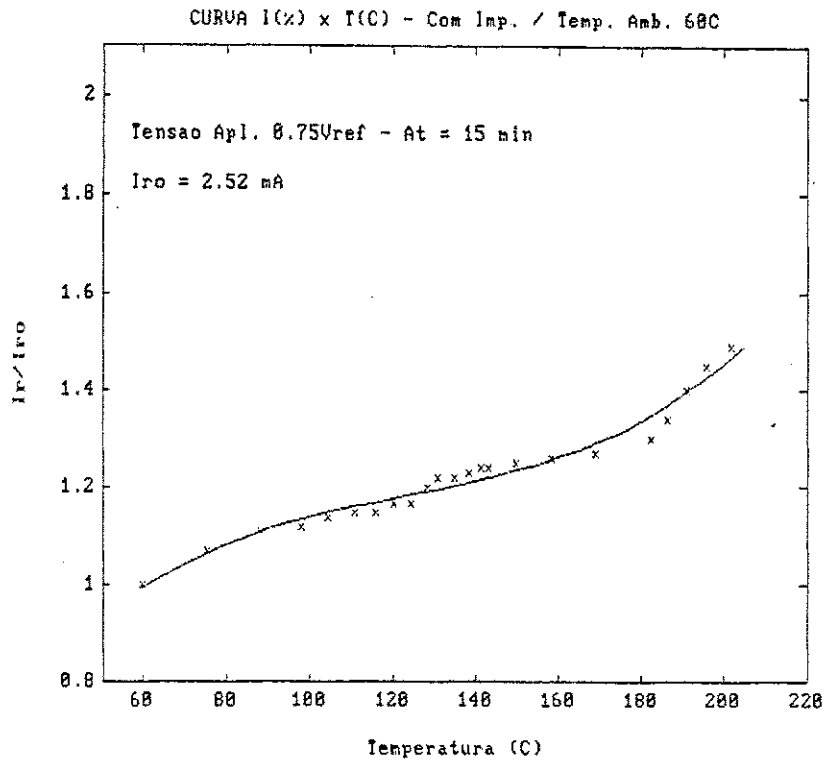


Figura 4.11 - Variação percentual da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.

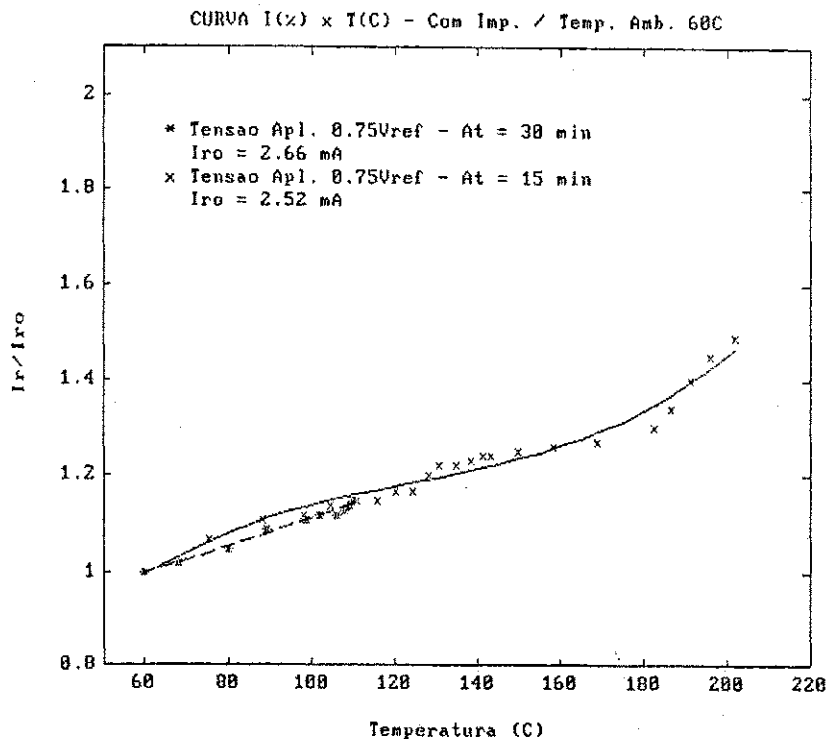


Figura 4.12 - Curva das correntes em pu versus temperaturas com impulsos em intervalos de 30 e 15 minutos.

A potência em ca, dissipada no elemento por efeito Joule, foi em torno de 11.0 W e a potência cedida por intermédio da estufa foi de 10.4 W. A aplicação dos impulsos de corrente padronizados forneciam uma energia instantânea de aproximadamente 540 J, resultando em uma variação da temperatura em 2.3°C à cada impulso aplicado na amostra/arranjo.

Os dados referentes à magnitude da energia envolvida no experimento e sua comparação com outros fatores são apresentados no item 4.6.

A provável degradação ocorrida nesta etapa, como resultado da contínua aplicação da tensão alternada e impulsos atmosféricos de alta corrente, estão relacionados ao balanço entre as potências geradas (P_G) e dissipada (P_D) na amostra varistora, conforme discutido no Capítulo II. Este tipo de ensaio resulta na diminuição da máxima capacidade de absorção de energia por parte dos varistores e, em consequência, estabelece-se um processo de instabilidade térmica com a provável destruição do dispositivo, através das perdas de suas características elétricas.

A Tabela V apresenta dados referentes à potência e corrente de fuga resistiva nos ensaios realizados com impulsos de corrente aplicados em intervalos de 30 e 15 minutos e temperaturas de 25 e 60°C , respectivamente.

Tabela V - Variação da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada para os ensaios com tensão de $0.75V_{ref}$ associado a aplicação de impulsos de corrente à Temperatura ambiente e a $60^{\circ}C$.

Impulso + $0.75 V_{ref}$	TEMPERATURA AMBIENTE		$60^{\circ}C$	
	$I_r(\%)$	$P_{ca}(W)$	$I_r(\%)$	$P_{ca}(W)$
30 min	3.0	9.3	18.0	8.4
15 min	3.0	5.5	50.0	11.0

Mediante a verificação de que na temperatura de $60^{\circ}C$ os impulsos aplicados em intervalos de 30 minutos não degradaram a amostra e que o mesmo ensaio com a redução dos intervalos de impulsos para 15 minutos apresentaram o processo de instabilidade térmica, iniciou-se um novo experimento sendo a amostra ensaiada do mesmo fabricante da primeira etapa deste experimento. Deve-se salientar que estas amostras são diferentes das utilizadas nos ensaios do item 4.2. A temperatura inicial de ensaio foi de $80^{\circ}C$, tensão de $0.75V_{ref}$ e impulsos de corrente aplicados a intervalos de 30 minutos. Portanto, com este procedimento, a amostra foi submetida a um incremento na temperatura de $20^{\circ}C$ em relação ao ensaio anterior e um tempo adicional para dissipar a potência proveniente dos impulsos de 15 minutos.

Os dados obtidos para a medição da corrente resistiva conduziram a um aumento de 44 % em relação ao seu valor inicial. O aumento da corrente resistiva refletiu consideravelmente nas perdas por efeito Joule. A temperatura se elevou acima de $180^{\circ}C$ em um tempo de 390 minutos, caracterizando o início do processo de instabilidade térmica. A Figura 4.13 mostra a variação percentual da componente de fuga resistiva em função da temperatura.

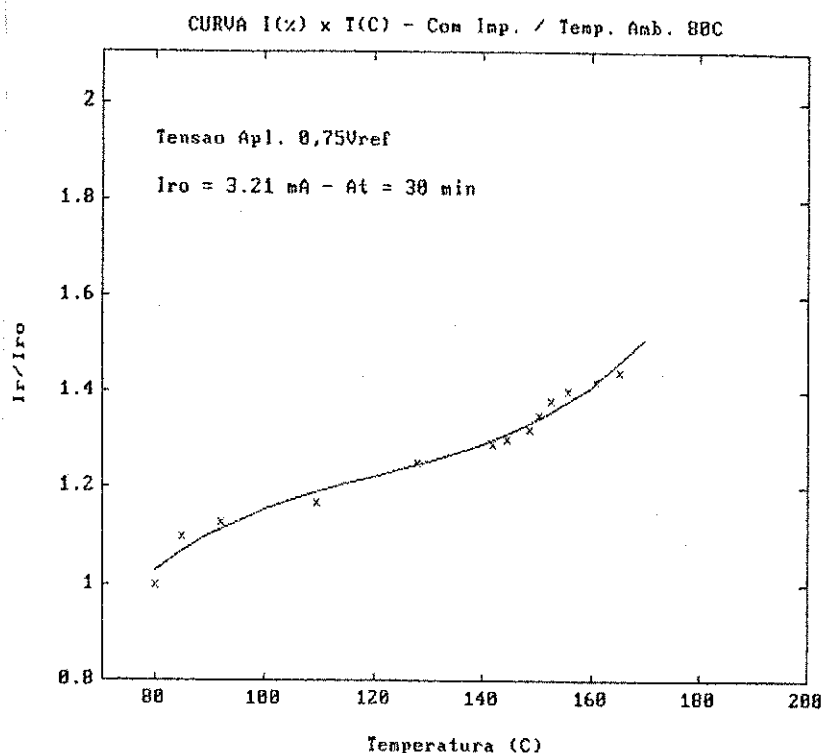


Figura 4.13 - Curva de variação da componente de fuga resistiva (pu) em função da temperatura.

As perdas geradas na amostra por efeito Joule foram de 13.2 W. Uma potência de 16.0 W era fornecida ao ambiente por intermédio da estufa. A cada impulso de corrente cedia-se a amostra uma energia instantânea de 540 J. Caso o elemento varistor apresentasse capacidade de absorção, a potência instantânea seria dissipada ao longo dos intervalos entre os impulsos, sem gerar o fenômeno do desencadeamento térmico. Verificou-se experimentalmente, que a amostra/arranjo não apresentou capacidade de dissipação da energia envolvida proveniente dos surtos e tensão alternada aplicada simultaneamente. Portanto, a cada impulso aplicado reduzia-se a capacidade de absorção e dissipação de energia do sistema amostra/arranjo. Este processo resultou na perda de sua estabilidade térmica. Dados referentes à energia envolvida ao longo do processo são apresentados no item 4.7.

Alguns importantes dados obtidos nos ensaios dos itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são sintetizados na Tabela VI.

Tabela VI - Variação da componente de fuga resistiva e potência ca dissipada nas etapas com aplicação conjunta de tensão alternada e impulsos de alta corrente na temperatura ambiente, 60 e 80°C.

		Temperatura Ambiente		60°C		80°C	
Imp.	Vref	I _r (%)	P _{ca} (W)	I _r (%)	P _{ca} (W)	I _r (%)	P _{ca} (W)
	0.85	100.0	54.0	-	-	-	-
	0.80	50.0	22.8	-	-	-	-
	0.75	2.0	6.28	22.0	8.0	95.0	22.0
30min	0.75	3.0	9.3	8.0	8.4	44.0	13.2
15min	0.75	3.0	5.5	50.0	11.0	-	-

4.5 - Análise e Discussão do Processo de Degradação Através de Tensão Continuamente Aplicada, Impulsos de Alta Corrente e Temperatura Ambiente Controlada.

Nesta etapa, utilizou-se, além da tensão aplicada e dos impulsos de corrente com forma de onda $8 \times 20\mu\text{s}$ discutida anteriormente no Capítulo III, um controlador digital de temperatura. O objetivo da utilização do dispositivo de controle para temperatura foi manter o interior da estufa na temperatura de 60 e 80°C. O calor dissipado ou potência dissipada para o meio ambiente, proveniente do sistema interno de aquecimento da estufa, é função da resistência térmica (R_T) do sistema amostra/arranjo, conforme comentado no Capítulo II. A operação do controlador digital de temperatura somente ocorre quando o nível de calor contido no ambiente (interior da estufa) é inferior à temperatura de referência fixada inicialmente.

A tensão alternada continuamente aplicada foi de $0,75V_{\text{ref}}$. A corrente de fuga era constantemente monitorada pelo método convencional, anteriormente discutido no Capítulo III. Os impulsos de corrente foram aplicados inicialmente em intervalos de 30 minutos e posteriormente reduzidos para 15 minutos.

Inicialmente a temperatura no interior da estufa foi fixada em 60°C e mantida através do controlador digital, com a tensão aplicada de $0,75 V_{\text{ref}}$ associada a impulsos de corrente, aplicados a intervalos de 30 minutos.

Os resultados obtidos demonstraram que a amostra não apresentou o processo de desencadeamento térmico. A corrente resistiva teve uma variação em torno de 16% em relação ao seu valor inicial com a temperatura se estabilizando em 73°C e no tempo de 300 minutos. Da mesma forma, quando se reduziram os intervalos de impulsos aplicados para 15 minutos, a amostra manteve a sua estabilidade térmica, com uma variação da componente resistiva

em 18%. A temperatura estabilizou em 70°C e no tempo de 165 minutos. A Figura 4.14 mostra graficamente os resultados obtidos para os dois experimentos realizados. Através das curvas observa-se a estabilidade térmica dos dois ensaios.

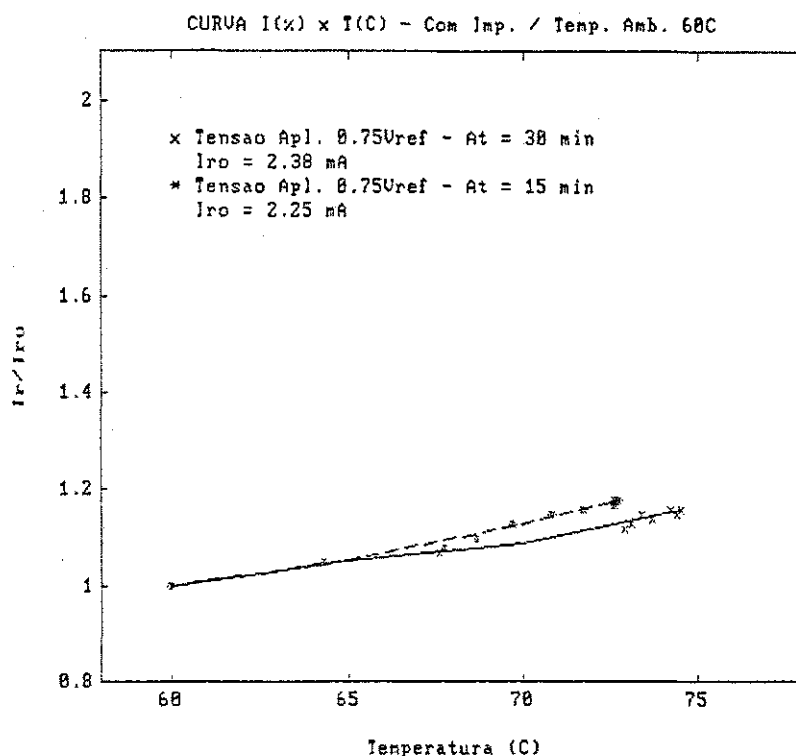


Figura 4.14 - Curva comparativa da variação da componente de fuga resistiva para os ensaios realizados com a temperatura ambiente controlada em 60 °C.

A potência em ca dissipada na amostra devido à contínua tensão aplicada foi de 7.8 W. A aplicação de surtos fornecia uma energia instantânea de 540 J. Para cada energização do controlador de temperatura uma potência de 6.0 W era dissipada no ambiente.

Os dados apresentados nesta etapa, em comparação com os dados dos itens 4.2 e 4.4, quando se utilizou a temperatura inicial, mostram uma influência bastante significativa na quantidade de calor submetida à amostra como meio de acelerar processo de degradação ou envelhecimento. As amostras utilizadas com o monitoramento da quantidade de calor inserida no meio ambiente, não apresentaram o fenômeno de desencadeamento térmico, mesmo nas condições mais críticas de temperatura inicial de 80 °C e impulsos aplicados em intervalos de 15 minutos. A Figura 4.15 mostra a evolução da corrente com a temperatura. Uma análise das energias envolvidas apresentadas neste experimento, comparada ao item 4.4, que utilizou as mesmas condições iniciais e que também resultou na estabilidade térmica da amostra, é apresentada no item 4.7.

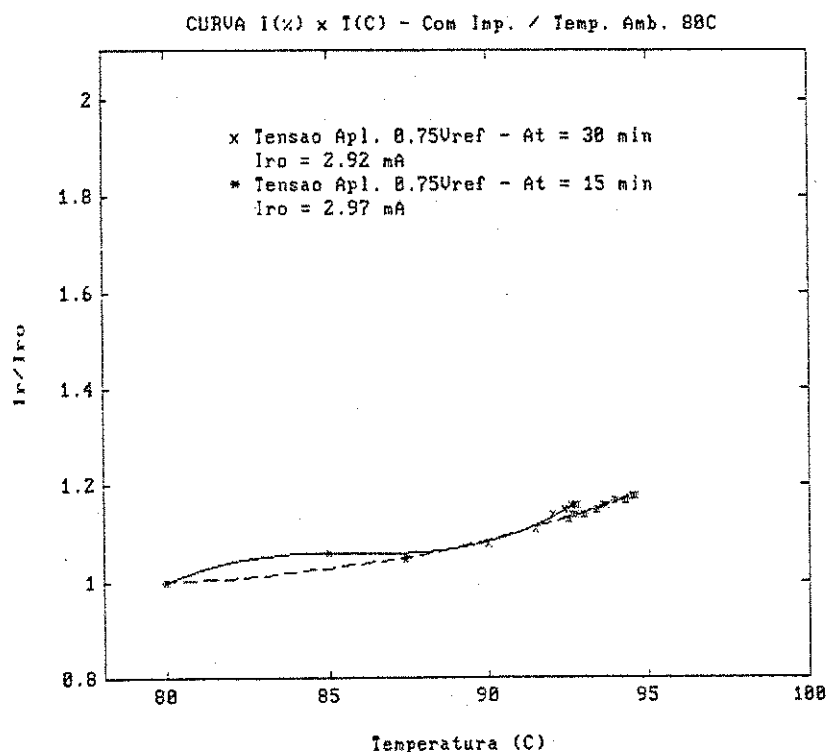


Figura 4.15 - Variação da componente resistiva (pu) em função da temperatura para os ensaios realizados com a temperatura ambiente controlada em 80°C.

4.6 - Procedimento para Cálculo e Estimativa do Tempo de Vida Útil Aproveitável dos Pára-Raios.

As condições oferecidas pelo laboratório de alta tensão, no que diz respeito à péssima confiabilidade do sistema de alimentação na sua rede de distribuição de energia elétrica, não têm permitido realizar estudos mais aprimorados de envelhecimento de materiais sob contínua aplicação de um campo elétrico. Na tentativa de contornar este problema e realizar um experimento que permitisse estudar e analisar o comportamento das amostras varistoras sob condições de estresses, utilizaram níveis de tensão bastante altos, conduzindo as amostras ao desencadeamento térmico em um tempo muito curto. Um outro inconveniente foi a estufa utilizada, que apresenta uma resistência térmica muito elevada para este tipo de experimento.

Com as duas grandes dificuldades apresentadas no final do experimento, concluiu-se que era impossível calcular com a devida precisão o tempo de vida útil aproveitável das amostras ensaiadas pois, uma grande energia era gerada no interior da estufa, seja por efeito Joule na amostra ou por aquecimento através dos resistores usados para controlar a temperatura e, a dificuldade de transferir a potência para o ambiente, devido à alta resistência térmica da estufa utilizada. Mesmo assim, a seguir se descreve o mecanismo adotado para o cálculo do tempo de vida útil aproveitável, explicando de forma clara todas as etapas.

As condições iniciais de estresses para este experimento são a tensão aplicada no nível de $0,75 V_{ref}$ e temperatura de $80^{\circ}C$. Com os dados obtidos da corrente de fuga resistiva no tempo constrói-se o gráfico apresentado na Figura 4.16.

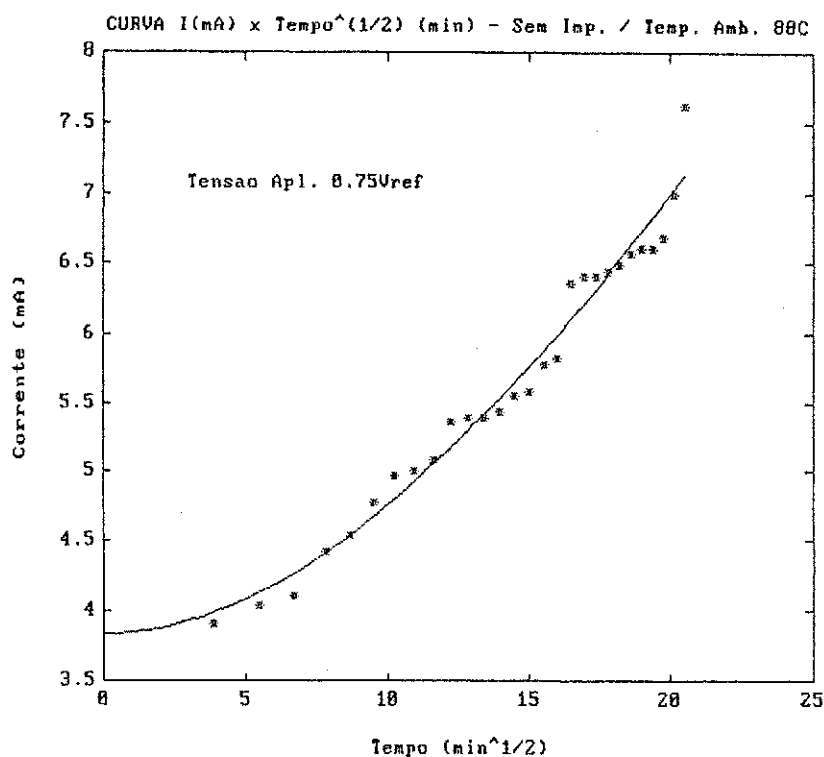


Figura 4.16 - Curva de variação da componente resistiva (mA) x raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$) na temperatura ambiente de 80°C.

A taxa constante de variação da corrente de fuga com a raiz quadrada do tempo é o valor de K_{te} , indicada na equação [06], no Capítulo II. As potências geradas no elemento são obtidas da equação [02] no Capítulo II, sendo utilizados os valores de pico ou crista para os campos elétricos e a corrente de fuga resistiva para cada temperatura. Com os valores das potências geradas e da temperatura absoluta recíproca, isto é, $1/T$ em graus Kelvin, a curva de potência gerada é construída com os valores de potência dissipada em escala logarítmica versus a temperatura absoluta recíproca.

Para a obtenção da curva da potência dissipada é muito importante a determinação precisa da resistência térmica do pára-raios ou do módulo que o represente. A resistência térmica é função da configuração do pára-raios ou do modelo, como também do mecanismo de transferência de calor, quer seja por

condução, radiação ou convecção; os dois últimos dependentes das temperaturas.

A equação [03] fornece os pontos para construção da curva de potência dissipada em função da temperatura absoluta recíproca, nas mesmas escalas para a potência gerada. Deste modo se obtém o diagrama de potência gerada/dissipada, mostrado na Figura 4.17.

Através da Figura 4.17, no ponto onde as curvas de potência gerada e dissipada se cruzam, determina-se o ponto de estabilidade A e a potência de equilíbrio P_0 . De acordo com o gráfico, os resultados forneceram uma potência de equilíbrio $P_0 = 5.0 \text{ W/cm}$ com a respectiva temperatura $t_e = 97^\circ\text{C}$.

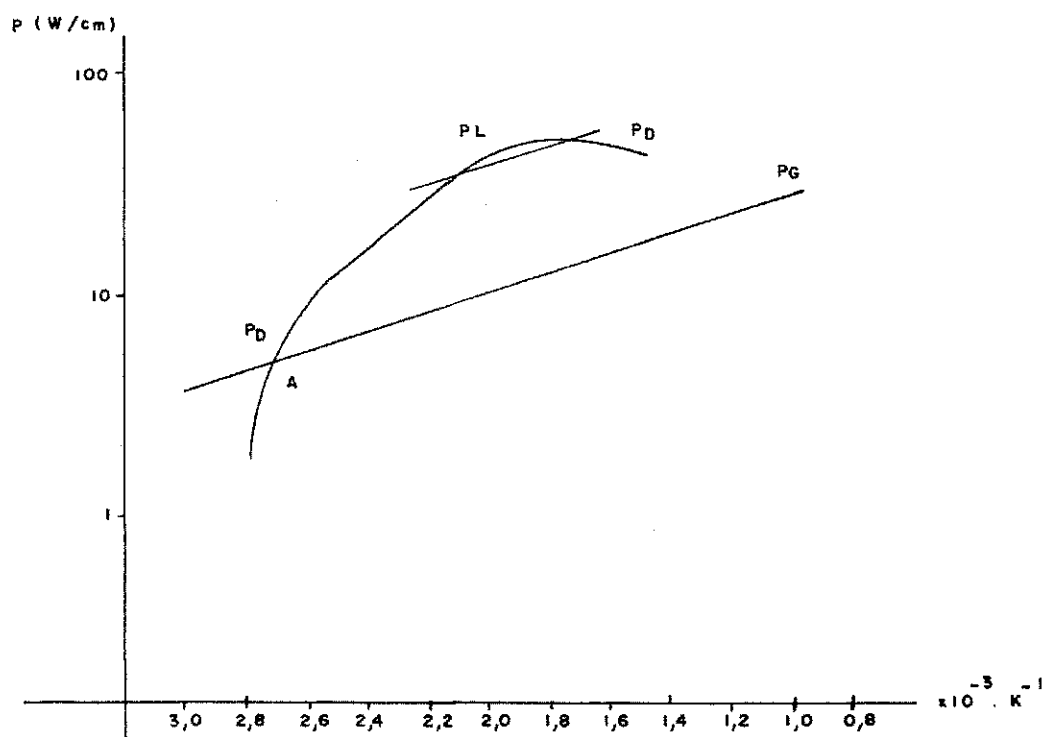


Figura 4.17 - Curvas de potência gerada (P_G), potência dissipada (P_D) e potência limite (P_L) em W/cm versus recíproco da temperatura absoluta em 10^{-3} K^{-1} .

Conforme apresentado no Capítulo II, para se estimar a potência limite P_L , estimou-se uma capacidade reserva de potência absorvida de

aproximadamente 200 J/cm^3 . De acordo com a equação [04] e utilizando um calor específico de $2.6 \text{ J/cm}^3 \text{ C}^{-1}$, estima-se também uma diferença de temperatura limite para esta potência reserva de 77°C .

A partir de então, com esta diferença de temperatura, o valor da potência limite, relacionado à tensão aplicada e à temperatura ambiente, é então obtido pela construção de uma linha paralela à potência gerada P_G , a qual intercepta a curva de dissipação P_D em dois pontos distintos e separadas de 77°C . O ponto inferior da intersecção fornece a temperatura inicial T_S da potência reserva e o outro ponto fornece a temperatura superior limite T_f .

Como comentado, com os valores escolhidos para os experimentos adotados neste trabalho, não é possível estimar com precisão o tempo de vida útil aproveitável para o sistema amostra/arranjo.

4.7 - Análise e Discussão dos Níveis de Energia e Potência Média Envolvidas nos Experimentos.

Em geral, o ensaio para determinação das características elétricas e térmicas de um pára-raios de alta tensão não é possível de se realizar com um pára-raios completo. Normalmente projeta-se uma estufa ou usa-se uma secção do pára-raios com as mesmas características térmicas. A utilização de pára-raios completos nos ensaios implicaria na necessidade de geradores de impulsos de corrente e transformadores de alta tensão com enorme energia e potência. A falta de recomendações ou especificações, no momento, para construção de uma estufa adequada que simulasse as reais condições de operação de um pára-raios, levou-nos a projetar uma estufa no laboratório. Esta estufa apresenta uma alta resistência térmica, dificultando bastante a dissipação do calor gerado instantaneamente, isto é, acelerando ainda mais o processo de envelhecimento das amostras.

A análise dos resultados obtidos dos experimentos não seria completa se não houvesse uma discussão a cerca dos níveis de energia e potência envolvidos em cada experimento. Os resultados apresentados, discutidos e analisados nos itens anteriores agora podem ser expostos graficamente em forma de histogramas.

A Figura 4.18 mostra a energia envolvida nos experimentos indicados nos itens 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. As colunas 1,2,3 representam a energia envolvida nos experimentos executados no item 4.1, com a tensão aplicada de 0,85 ; 0,80 e 0,75 do valor da tensão de referência respectivamente, com a temperatura ambiente de 26°C. As colunas 4 e 5 mostram a energia envolvida nos experimentos descritos no item 4.2, com a tensão aplicada de 0,75Vref. e nas temperaturas de 60 e 80°C. As colunas 6 e 7 mostram a energia envolvida nos experimentos descritos no item 4.3, com a tensão aplicada de 0,75Vref., temperatura ambiente de 26°C, associados a impulsos de corrente aplicados com intervalos de tempo de 30 e 15 minutos, respectivamente. As colunas 8 e 9 mostram a energia envolvida quando da realização dos experimentos descritos no item 4.4, mas com a tensão aplicada de 0,75Vref., temperatura ambiente de 60°C. e impulsos aplicados com intervalos de 30 a 15 minutos. A coluna 10 representa a energia, também do item 4.4, com tensão de 0,75Vref., temperatura de 80°C e impulsos aplicados a cada 30 min. As colunas 11 e 12 mostram os níveis de energia quando são aplicados nas amostras os esforços de 0,75 Vref., impulsos com intervalos de 30 a 15 minutos e temperatura ambiente controlada de 60°C. As colunas 13 e 14 mostram os níveis de energia quando são aplicados nas amostras os esforços de 0,75Vref., impulsos com intervalos de 30 a 15 minutos e agora com a temperatura controlada em 80°C.

Energia (kj) Energia Envolvida nos Experimentos

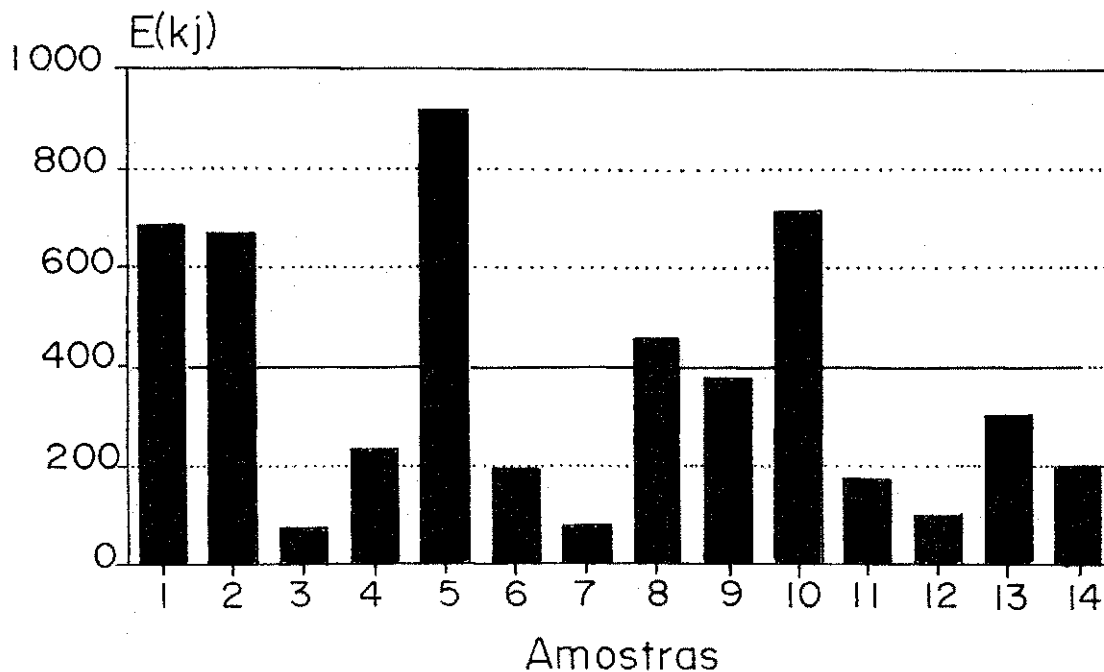


Figura 4.18 - Energia envolvida ao longo das etapas experimentais 4.1; 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5.

O gráfico da energia envolvida mostrada na figura 4.18 indica um valor crítico para a energia absorvida. O valor crítico para as condições impostas nestes experimentos é de 400 KJ, isto é, se a amostra absorver uma energia superior a 400 KJ o sistema amostra/estufa não tem condições de dissipar a energia, conduzindo a amostra ao desencadeamento térmico

A Tabela VII mostra esquematicamente os esforços e suas variações ao longo dos experimentos.

Tabela VII - Esforços elétricos e térmicos e suas variações.

COLUNA	ITEM	TENSÃO V _{ref}	TEMPERATURA °C	IMPULSOS (Δt =minutos)	TEMPERATURA AMBIENTE CONTROLADA °C
1	4.1	0,85	ambiente	-	-
2	4.1	0,80	ambiente	-	-
3	4.1	0,75	ambiente	-	-
4	4.2	0,75	60	-	-
5	4.2	0,75	80	-	-
6	4.3	0,75	ambiente	30	-
7	4.3	0,75	ambiente	15	-
8	4.4	0,75	60	30	-
9	4.4	0,75	60	15	-
10	4.4	0,75	80	30	-
11	4.5	0,75	-	30	60
12	4.5	0,75	-	15	60
13	4.5	0,75	-	30	80
14	4.5	0,75	-	15	80

O gráfico 4.19 mostra, em forma de histograma, a potência dissipada no interior da estufa, seja em forma do efeito Joule nas amostras varistores, seja em forma de aquecimento da resistência de baixa inércia. A relação entre as colunas e os experimentos é a mesma descrita anteriormente.

POTÊNCIA (W) POTÊNCIA MÉDIA DOS ENSAIOS

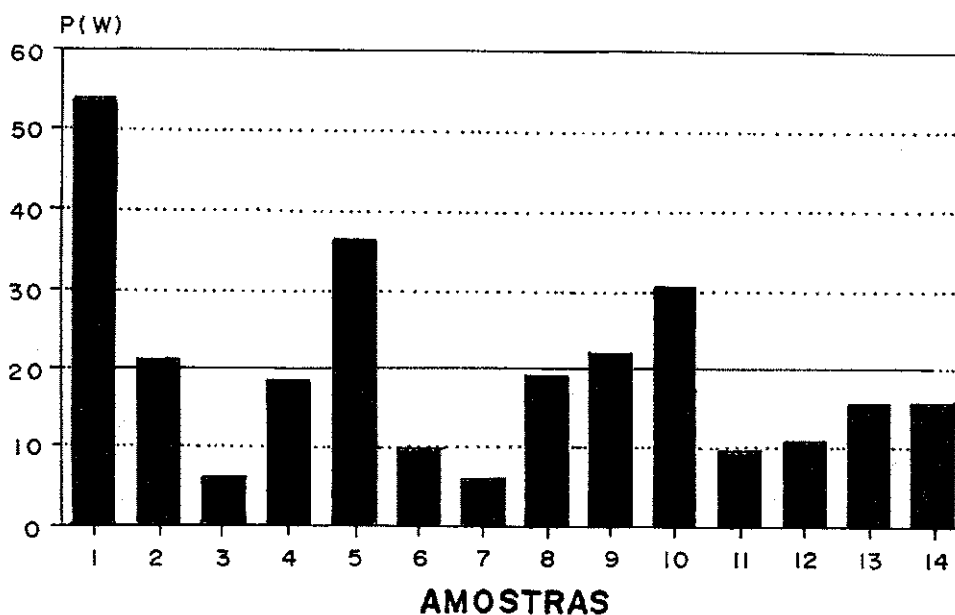


Figura 4.19 - Histograma das potências médias envolvidas nas etapas 4.1; 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5.

O gráfico da Figura 4.19 indica o valor crítico de potência gerada. O valor é de 20 W para o sistema amostra/estufa utilizado neste experimento. Valores de potência gerada acima deste limite conduziriam a amostra ao desencadeamento Térmico (thermal runaway).

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Neste trabalho objetivou-se avaliar o envelhecimento ou degradação dos elementos varistores à base de óxido de zinco (ZnO), sob condições de contínua operação e de estressamento, quando submetidos a esforços elétricos e térmicos.

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- o fenômeno da degradação exibe diferentes comportamentos e está relacionado com a forma de estressamento submetida ao varistor, sendo função combinada da tensão aplicada e corrente de fuga adicionada a variações na temperatura ambiente;
- os ensaios de envelhecimento acelerado não foram suficientes para provocar a ruptura térmica. Algumas amostras apresentaram o desencadeamento térmico (thermal runaway);
- a tensão de trabalho do elemento varistor é extremamente importante, pois pequenos incrementos proporcionam, na tensão, um aumento acentuado na corrente de fuga resistiva e conseqüentemente nas perdas por efeito Joule. O aumento contínuo das perdas proporciona uma diminuição na capacidade de absorção de energia para o qual o varistor é dimensionado e, em conseqüência, acelera o processo de degradação;

- uma normalização precisa e acessível da tensão de referência para todos os pára-raios é uma necessidade primordial, tornando possível a determinação da potência gerada. Ao contrário da potência dissipada que é função da configuração e da temperatura da amostra e ambiente, a potência gerada é função de todo o processo de fabricação do elemento não linear.
- a corrente de fuga resistiva necessariamente não precisa dobrar para provocar o processo de desencadeamento térmico, conforme relato em Gupta (1990);
- a aplicação de impulsos repetitivos contribuíram também para o desencadeamento térmico;
- o aumento da temperatura ambiente de 60°C para 80°C, foi um fator decisivo para o desencadeamento térmico (thermal runaway) das amostras;
- os resultados mostram que existe um limite máximo para a corrente de fuga resistiva e que este valor depende da capacidade de dissipação do sistema usado, isto é, para cada configuração de pára-raios, o seu fabricante pode dizer exatamente o valor da corrente de fuga resistiva que o mesmo deve sair de operação.
- os histogramas da Figura 4.18 e 4.19 mostram os limites máximos de energia e da potência que, para o sistema usado, é de 400 KJ e 20 W, respectivamente;

CAPÍTULO VI - SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS FUTURAS.

Ao final dos resultados e observações desenvolvidos, algumas propostas são sugeridas para o aprofundamento das pesquisas nesta área :

- sendo o trabalho desenvolvido na área de degradação, é de importância fundamental a obtenção de normas referentes ao projeto de uma estufa que represente, com uma maior fidelidade, condições reais de estressamento dos pára-raios.
- uma reforma no sistema de energia fornecida ao Laboratório de Alta-Tensão, elevando sua confiabilidade, para que estudos sobre o envelhecimento ou degradação dos blocos varistores sejam realizados num período maior, como apresenta Carlson (15).
- informatizar os ensaios, utilizando-se um sistema de aquisição de dados que permita a leitura de parâmetros como tempo, temperatura, corrente, em intervalos previamente definidos, elevando a confiabilidade dos dados obtidos e com isto assegurando resultados mais expressivos.
- direcionar as pesquisas para o desenvolvimento de diferentes sistemas de transferência de calor no interior do pára-raios. Pode-se assegurar que a utilização de absorvedores de calor e um perfeito sistema de transferência de calor, em certas circunstâncias podem ser mais eficientes do que as propriedades obtidas do próprio varistor à base de ZnO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAMATSU, J. I., LEITE, D. M., **Estudos e Ensaio para Definição da Tensão de Referência dos Pára-Raios de Óxido Metálico**, SNPTEE, Grupo XIII, GEM, 1991.
- BOGORODITSKY, N. P. et alii, **Electrical Engineering Materials**, Mir Publisher, Moscou, 1979.
- CARLSON, W. G. et alii, **A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters**, I.E.E.E. Trans. Power Syst., Vol. PWRD-1, No2, p.67-74, April 1986.
- Catálogo HAEFELY, **Impulse Current Gerador, 100 KV, 50 KJ - WO 4049-50**, 1981.
- D'ALUZ, ARY et alii, **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em sistemas de Potência de Alta-Tensão**, Rio de Janeiro, Furnas, Universidade Federal Fluminense, 1987.
- D'ALUZ, A., et alii, **Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Substação de Alta-Tensão**, Rio de Janeiro, Furnas, Universidade Federal Fluminense, 1985.
- EDA, K., **Zinc Oxide Varistors**, I.E.E.E. Electrical Insulation Magazine, vol.5, 6° p.28-41, November/December, 1989.

- EDA, K., **Conduction Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramics**, J. Appl. Phys., 49(5), p.2964-2972, May 1978.
- EDA, K. et alii, **Degradation Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramics**, J. Appl. Phys., 51(5), p.2678-2684, May 1980.
- EDA, K., **Destruction Mechanism of ZnO Varistors due to High Currents**, J. Appl. Phys., 56(10), p.2948-2955, November 1984.
- FUJIWARA, Y. et alii, **Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester**, I.E.E.E. Trans. Power Appl., Vol. PAS- 101(4), April 1982.
- FRANCO, J. L., "Estudo das Propriedades ELétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- GUPTA, T. K., **Application of Zinc Varistors**, J. Am. Ceram., 73[7], p.1817-1840, 1990.
- GUPTA, T. K. et alii, **Current Instability Phenomena in ZnO Varistors Under a Continuous AC Stress**, J. Appl. Phys., 52(6), p.4104-4111, June 1981.
- General Electric Company, **Fundamental Research on Metal Oxide Varistor Technology - EPRI EL - 6960"**; Project 2667 - 2, August 1990.
- GUPTA, T. K. and CARLSON, W. G., **Defect-Induced Degradation of**

Barrier in ZnO Varistor, p.p - 30 - 40 in *Advances in Ceramics*, vol. 7, Additives and Interfaces in Electronic Ceramic. Edit by M.F.Yan and Society, Columbus, 1983.

- **IEC - Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for AC System**, I.E.C. TEC37, WG-4, February, 1990.
- **KIMURA, H. et alii, Study Thermal Runaway/Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester**, I.E.E.E. Trans. Power Appl., Vol. PAS-103(2), February 1984.
- **LEVINSON, L. M., PHILIPP, H. R., Zinc Oxide Varistors - A review**, Ceramic Bulletin, vol 85, 1985.
- **LEVINSON, L. M., PHILIPP, H. R., The Physies of Metal Oxide Varistors**, J. Appl. Phys., 46(3), p.1332-1341, March 1975.
- **LAT, M. V., Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arrester**, I.E.E.E. Trans. Power App., Vol. 102, No 7, p.2194-2202, 1983.
- **MATSUOKA, M., Nonhomic Properties of Zinc Ceramics**, J. Appl. Phys., 10[6],p.736-46, 1971.
- **MIZUNO, M., MITANI, K., Thermal Stability and Life of the Gapless Surge Arrester**, I.E.E.E. Trans. Power App., Vol. PAS-100, No 5, May 1981.
- **MIZUKOSHI, A. et alii, Influence of Uniformity on Energy Absorption**

Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters, I.E.E.E. Trans. Power App., Vol. PAS-102, No5, p.1384-1390, May 1983.

- MARTINEZ, M. L. B., **Absorção de Energia por pára-raios de ZnO - Comentários**, SGE, Subgrupo VIII-01.
- MORAES, H. M., **Verificação da Degradação de Blocos Cerâmicos à Base de Óxido de Zinco através da Medição de Descargas Parciais"** Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1987.
- MEIRA, U. R., **Medição da Corrente de Fuga Resistiva de pára-raios de Óxido Metálico - Catálogo interno DEE/UFPb** (1980).
- OYAMA, M. et alii, **Life Performance Zinc-Oxide Elements Under DC Voltage**, I.E.E.E. Trans. Power App., Vol. PAS-101, No6, p.1363-1368, June 1982.
- PHILIPP, H.R., LEVINSON, L.M., **Low-Temperature Electrical Studies on Metal-Oxide Varistors - A Clue to Conduction Mechanism**, J. Appl. Phys., 48(4), April 1977.
- PHILIPP, H. R., LEVINSON, L. M., **High-Temperature Behavior of ZnO-Based Ceramics Varistors**, J. Appl. Phys., 50(1), January 1979.
- SAKSHAUG, E. C. et alii, **A New Concept in Station Arrester Design**, I.E.E.E. Trans. Power Appar. and Systems, vol PAS-96, 2º p.647-656, March/April, 1977.

- SHIRAMAWA, S. et alii, **Maintenance of Surge by a Portable Arrester Leakage Current Detector**, I.E.E.E. Trans. Power Del., Vol. 3, No 3, July 1989.
- SATO, K., TAKADA, Y., **A Mechanism of Degradation in Leakage Currents Through ZnO Varistors**, J. Appl. Phys., 53(12), p.8819-8826, December 1982.
- SHIRLEY, C.G., PAULSON, W.M., **The Pulse-Degradation Characteristic of ZnO Varistors**, J. Appl. Phys., 50(9), September 1979.
- SHUFANG, L. et alii, **Energy Absorption Characteristic of Metal Oxide Elements Under Transient Overvoltage**, Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, 24-28 August 1987.
- TOMINAGA, S. et alii, **Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters**, I.E.E.E. Trans. Power Appl., Vol. PAS-99, No4, July/Aug. 1980.
- VERDOLIN, R. T. e outros, **Determinação da Capacidade de Absorção de Energia e Corrente de Impulso em Resistores Não-Lineares de ZnO - Uma proposta de Metodologia de Cálculo**, CICRÉ - BRASIL, GT 33-06, SnPTEE, Grupo XIII, GEM, 1991.
- VASCONCELOS, J. A., **Comportamento das Perdas em Pára-Raios de ZnO na Região de Baixa Corrente**, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1985.