

COMPORTAMENTO DAS PERDAS EM
PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO
NA REGIÃO DE BAIXA CORRENTE



V331c Vasconcelos, João Antônio de.
Comportamento das perdas em pára-raios de óxido de zinco na região de baixa corrente / João Antônio de Vasconcelos. - Campina Grande, 1985.
90 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1985.
"Orientação : Prof. Ubirajara Rocha Meira".
Referências.

1. Pára-Raios - Perdas. 2. Pára-Raios - Óxido de Zinco. 3. Região de Baixa Corrente. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Meira, Ubirajara Rocha. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.316:933(043)

COMPORTAMENTO DAS PERDAS EM
PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO
NA REGIÃO DE BAIXA CORRENTE

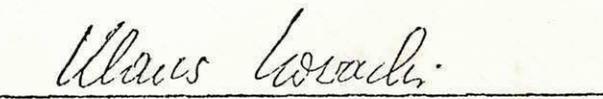
JOÃO ANTÔNIO DE VASCONCELOS

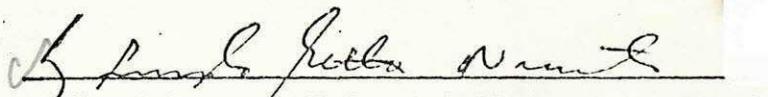
Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

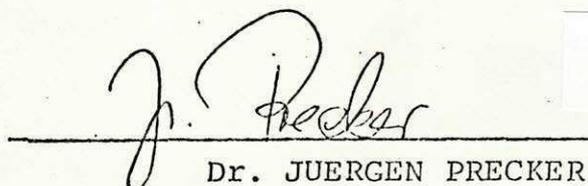
APROVADA EM 06 DE AGOSTO DE 1985

por:


Prof. UBIRAJARA ROCHA MEIRA (Orientador)


Dr. KLAUS NOWACKI (Orientador)


Eng^o LUIZ FERNANDO MOTTA NASCIMENTO


Dr. JUERGEN PRECKER

Aos meus inesquecíveis pais (in memoriam)

À minha esposa, pelo seu constante incentivo.

A meu filho, pequeno ser que na sua inocência encontrei forças.

Finalmente, a todos meus irmãos e família.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores UBIRAJARA ROCHA MEIRA e KLAUS NOWACKI, pela atenção e prestimosa orientação durante o decurso deste trabalho.

Ao Professor EDSON GUEDES DA COSTA, pela amizade e estímulo.

Aos Professores da UFMG -- SELÊNIO ROCHA SILVA, ANTÔNIO EMÍLIO ANGUETH ARAÚJO e RODNEY SALDANHA - , pela amizade, apoio e interesse.

Ao CNPq e ELETROBRÁS, pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho seria impossível..

RESUMO

Nos pãra-raios de óxido de zinco, sem centelhadores , há uma corrente de fuga fluindo constantemente sob o regime contínuo de operação. Sendo a componente resistiva da corrente de fuga total responsável pelas perdas e pela alteração da característica V-I, torna-se necessário o estudo do comportamento dos elementos de óxido de zinco na região de baixa corrente.

Esse trabalho verifica, experimentalmente, o processo de estabilização térmica através dos parâmetros elétricos tensão e corrente e as alterações da característica V-I com absorção de impulsos de corrente. Os resultados mostram que os elementos de óxido de zinco possuem uma elevada capacidade de absorção desses impulsos e que as alterações da sua característica não são pronunciadas a tal ponto de levá-los a uma instabilidade térmica.

ABSTRACT

Across gapless surge arresters of ZnO there is a current flowing continuously during operation. The resistive component of this total current is responsible for the losses and for the alteration of the V-I characteristic. Therefore it is necessary to study the behavior of the ZnO elements in the region of low current.

This work verifies experimentally the process of thermal stabilization in relation on electrical parameters like voltage and current and also the alteration of the V-I characteristic due the absorption of current impulses. The results are showing that the ZnO elements are capables to absorb a large quantity of this current impulses. The alteration of its characteristic do not demonstrate a thermal runaway.

SUMÁRIO

CAPÍTULO	Pág.
I - INTRODUÇÃO	
II - PÁRA-RAIOS - TEORIA	
2.1 - Introdução	04
2.2 - Evolução dos Pára-raios	04
2.2.1 - Tecnologia convencional	06
2.3 - Resistores de Óxido de Zinco	11
2.4 - Características do Elemento de Óxido de Zinco	12
2.4.1 - Fabricação	12
2.4.2 - Microestrutura	13
2.4.3 - Propriedades elétricas	15
2.4.3.1 - Região de alta corrente .	16
2.4.3.2 - Região de baixa corrente.	23
2.4.4 - Mecanismo Físico	27
2.4.4.1 - Emissão Schottky	32
2.4.4.2 - Tunelamento de Fowler-Nordheim	33
2.5 - Medição da Corrente de Fuga Resistiva ..	35
2.5.1 - Método de medição	37
III - CIRCUITOS DE MEDIÇÃO E ARRANJO EXPERIMENTAL	
3.1 - Introdução	40

CAPÍTULO	Pág.
3.2 - Geração de Impulsos de Corrente	40
3.3 - Circuito de Tensão Alternada	42
3.3.1 - Método convencional.....	43
3.3.2 - Método compensação por atenuador.....	44
3.3.3 - Influência dos harmônicos.....	45
3.4 - Arranjo Experimental.....	50
3.5 - Condições Ambientais	52

IV . - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - Introdução	54
4.2 - Procedimento	55
4.2.1 - Referente aos métodos de medição	55
4.2.2 - Referente aos elementos de óxido de zinco.....	56
4.2.2.1 - Processo de estabilização térmica.....	56
4.2.2.2 - Degradação e alterações da característica V-I	57
4.3 - Apresentação e Discussão dos Resultados	58
4.3.1 - Compatibilidade dos métodos de medição convencional e compensação por atenuador.....	58
4.3.2 - Resultados experimentais.....	63
4.3.2.1 - Bloco de menor diâmetro	63
4.3.2.1.1 - Estudo do	

CAPÍTULO

Pág.

local de
ruptura do
bloco 72

4.3.2.2 - Bloco de maior diâmetro -
arranjo aberto.. 74

V - CONCLUSÃO 81

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 84

APÊNDICE A - CARACTERÍSTICA DOS INSTRUMENTOS
UTILIZADOS 87

LISTA DE SÍMBOLOS

AVR	- Relação de tensão aplicada em percentagem
B	- Enrolamento de sopro
C	- Capacitância do elemento de óxido de zinco
Ca	- Capacitância parasita em paralelo com o elemento de carboneto de silício
Cc	- Capacitância de controle do pára-raios tipo convencional
Ce	- Capacitância parasita para a terra
Cf	- Capacitância do centelhador
C ₁	- Capacitor em paralelo com o resistor no circuito do método compensação por atenuador
C ₂	- Capacitor de alta-tensão
CR	- Característica V-I do resistor de carboneto de silício
DV	- Divisor de amortecimento capacitivo
E	- Energia potencial
Ea	- Energia de ativação
Eb	- Altura da barreira potencial (barreira Schottky)
Ec	- Altura da banda de condução
Ed	- Nível de energia do dopante
Ef	- Nível Fermi
Eg	- Largura da banda proibida

Eu	- Energia potencial devido a tensão aplicada
Ev	- Nível de energia da banda de valência
F	- Campo elétrico
G	- Centelhador
$\hat{i}, \hat{i}_1, \hat{i}_2, \hat{i}_3$	- Corrente, valor de pico
\hat{i}_c	- Corrente de fuga capacitiva do elemento de óxido de zinco, valor de pico
\hat{i}_r	- Corrente de fuga resistiva do elemento de óxido de zinco, valor de pico
\hat{i}_t	- Corrente de fuga total do elemento de óxido de zinco, valor de pico
J	- Densidade de corrente
K	- Constante correspondente à resistência do elemento de óxido de zinco, convenientemente dada em volts
k'	- Constante correspondente à resistência para uma dada tensão de referência
N	- Número de impulsos de corrente
OT	- Objeto de teste
P	- Calor gerado
PP	- Ponta de prova
Q	- Calor dissipado
r	- Resistência associada aos grãos de óxido de zinco
R	- Resistência não-linear associada a camada intergranular do elemento de óxido de zinco
Rb	- Resistor de "bypass"

Rc	- Resistor de controle do pára-raios tipo convencional
Rn	- Resistor não-linear de carboneto de silício
R ₁	- Resistor em série com o elemento de óxido de zinco
R ₂	- Resistor em série com capacitor de alta-tensão
RG	- Regulador de tensão
RT	- Reator
SCO	- Osciloscópio
t	- tempo
t _a	- tempo de ignição
t _f	- tempo de frente de onda
T, T ₁ , T ₂ ...T ₅	- Temperatura
T _a	- Temperatura ambiente
T _s	- Temperatura após absorção de impulsos de corrente
TR	- Transformador de alta tensão
V, V ₁ , V ₂	- Tensão
\hat{V}_{1ma}	- Tensão correspondente a corrente de um miliampère
V _{ap}	- Tensão aplicada
V _c	- Tensão de operação contínua
V _n	- Tensão nominal
V _r	- Tensão residual ou de descarga
V _{ref}	- Tensão de referência
V _s	- Nível de proteção
V _o	- Tensão de saída

V_{of}	- Componente fundamental de saída
V_{o3f}	- Componente de terceiro harmônico
V_i	- Tensão de entrada
V_{if}	- Componente fundamental de entrada
V_{i3f}	- Componente de terceiro harmônico de entrada
VD	- Voltímetro digital
VP	- Voltímetro de pico
X	- Distância
α	- Expoente não-linear
α'	- Expoente não-linear em função da tensão <u>al</u> ternada
γ	- Variável da equação de Fowler-Nordheim
κ	- Constante de Boltzman
ω	- Velocidade angular

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Sempre tem se procurado um dispositivo de proteção que ofereça garantia, confiabilidade e estabilidade na limitação das sobretensões, a baixo custo, principalmente nas tensões mais elevadas. Pára-raios convencional, com centelhadores em série, têm prestado este serviço por um longo período. Entretanto, o surgimento recente de um elemento resistivo, de característica altamente não-linear, à base de óxido de zinco, tornou possível fabricar pára-raios sem centelhadores, com alta capacidade de energia [3]. Sua característica de funcionamento na presença de uma sobretensão é tal que ele entra em condução da corrente necessária para limitar a sobretensão, ao nível de proteção, sem nenhuma ruptura, mas especialmente ocorrendo uma transição contínua para o estado de condução. No final do transitório de tensão verifica-se um pequeno aumento da corrente, porém de nenhuma consequência, pois o projeto térmico do pára-raios é capaz de dissipar os watts associados com nenhuma dificuldade [3], enquanto que nos pára-raios convencional há a presença significativa da corrente subsequente.

Contudo, quando submetidos a tensão de operação, os pára-raios sem centelhadores de óxido de zinco ficam sujei

tos a degradação da sua característica, decorrente do fluxo permanente da corrente de fuga resistiva, adicionado aos esforços proporcionados pelas sobretensões. Esta degradação se traduz no deslocamento da característica V-I, na região de baixa corrente, em um sentido, no qual ocorre uma elevação da corrente de fuga resistiva. O aumento da temperatura, resultante do aumento da corrente, por sua vez, é uma realimentação positiva do processo, devido ao coeficiente de temperatura negativo, característico dos elementos de óxido de zinco [3]. Desta maneira, o perigo de ocorrência de instabilidade térmica e provável ruptura dos elementos de óxido de zinco se faz presente. Pesquisas nos elementos de óxido de zinco têm sido desenvolvidas em diversos países, entretanto não existe ainda uma teoria reconhecida sobre o processo de degradação da característica V-I, na região de baixa corrente [14].

Desta maneira, investigações nas alterações sofridas pela característica V-I e no processo de estabilização térmica, objetivos deste trabalho, quanto ao número de impulsos de corrente padronizado, é de fundamental importância na avaliação dos riscos de ocorrência de ruptura e instabilidade térmica.

A teoria relacionada aos elementos de óxido de zinco tais como fabricação, microestrutura, características elétricas, mecanismos de condução e medição da corrente de fuga resistiva, necessárias para a compreensão do texto, são apresentadas no Capítulo II. Encontra-se no Capítulo III os circuitos, com todos os equipamentos mostrados, com a des-

crição dos arranjos utilizados na pesquisa, e ainda os estudos da influência dos harmônicos na medição da corrente de fuga resistiva utilizando o método convencional [6]. No Capítulo IV, foram apresentados os resultados com a discussão pertinente, em uma ordem de fácil compreensão, sendo inicialmente apresentado os resultados do estudo de compatibilidade dos métodos de medição convencional e compensação por atenuador [10], seguido do estudo do processo de estabilização térmica, através do acompanhamento dos parâmetros elétricos por um período de sessenta (60) minutos. Finalmente, foram apresentados os resultados das alterações sofridas pela característica V-I após a absorção de impulsos de corrente.

CAPÍTULO II

PÁRA-RAIOS - TEORIA

2.1 - INTRODUÇÃO

A exigência do fornecimento de energia elétrica com requisitos de confiabilidade, segurança e a custos menores tem levado a uma evolução constante dos dispositivos elétricos de potência. Na área de proteção contra sobretensões, o advento recente dos pára-raios sem centelhadores é sem dúvida o mais importante. Para o estudo do processo de estabilização térmica e das alterações sofridas pela característica tensão-corrente, após a absorção de esforços, inicialmente é necessário tomar conhecimento de sua microestrutura, de sua característica V-I, dos mecanismos de condução e principalmente acompanhar a evolução da corrente de fuga resistiva.

2.2 - EVOLUÇÃO DOS PÁRA-RAIOS

A necessidade de proteger os equipamentos elétricos das sobretensões nos sistemas elétricos de potência levou à invenção dos pára-raios. A característica ideal de um pára-raios é dada na Figura 1, onde todas as sobretensões devem ser deixadas abaixo ou igual ao nível de proteção prescrito, o qual é um pouco menor do que a tensão suportável pela iso

lação.

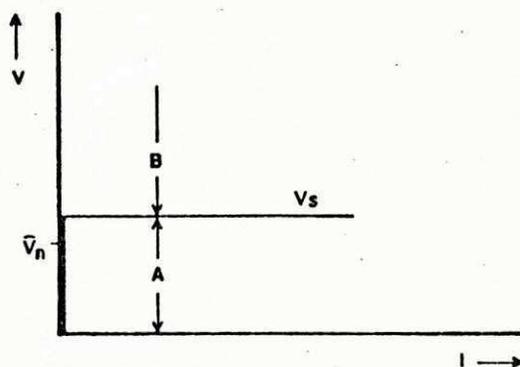


Fig. 1 - Característica V-I de um para-raios ideal

A = Região de tensões permissíveis

B = Região de sobretensões

V_s = Nível de proteção

\hat{V}_n = Valor máximo da tensão nominal

Inicialmente usou-se centelhadores como forma primitiva de limitar as sobretensões. Combinados com resistores poderiam ainda ser empregados hoje, embora em sistema de tensão mais elevada a isolação é um importante fator de custo, e em adição, a ruptura no centelhador inicia uma falta e conseqüentemente uma interrupção do fornecimento. A necessidade de maior segurança e menor custo tem levado ao desenvolvimento de para-raios modernos.

Atualmente, existem duas técnicas distintas para solucionar tal problema. A primeira é o uso de centelhadores em série com resistores de carboneto de silício (SiC), a segunda é a aplicação de resistores altamente não-lineares (ZnO) cuja característica se aproxima da característica ideal (Figura 1).

2.2.1 - Tecnologia Convencional

Os resistores de carbeto de silício (SiC) usados nos pára-raios convencional possuem um expoente não-linear α ($I = (V/k)^\alpha$) entre 4 e 6, o qual não é alto o suficiente para permitir a ausência de centelhadores [1].

Os pára-raios convencional funcionam em três estágios sucessivos. Junto a ocorrência da sobretenção tem-se a ignição se a amplitude da tensão alcança um determinado valor, colocando o pára-raios em condução. Durante o processo de condução a resistência deve ser pequena, proporcionando um caminho de baixa impedância para a terra. Após este processo, a resistência deve limitar a corrente subsequente devido a tensão de operação, de maneira que os centelhadores possam interromper a corrente antes ou no seu zero natural.

Vários centelhadores conectados em série possibilitam a extinção do arco em tensão mais elevada; os primeiros projetos deste tipo usaram peças de metal separadas por peças de isolamento. Pára-raios deste tipo são ainda empregados em sistemas de média tensão [1]. A Figura 2 apresenta esquematicamente este projeto com sua característica de descarga.

Os sistemas de transmissão de energia elétrica operando em tensões cada vez mais elevadas tem exigido um aperfeiçoamento contínuo na performance do pára-raios. O desenvolvimento do pára-raios com centelhador limitador de corrente foi em considerável medida responsável por um número de melhorias na sua performance incluindo:

A - Uma redução nos níveis de proteção dos sistemas

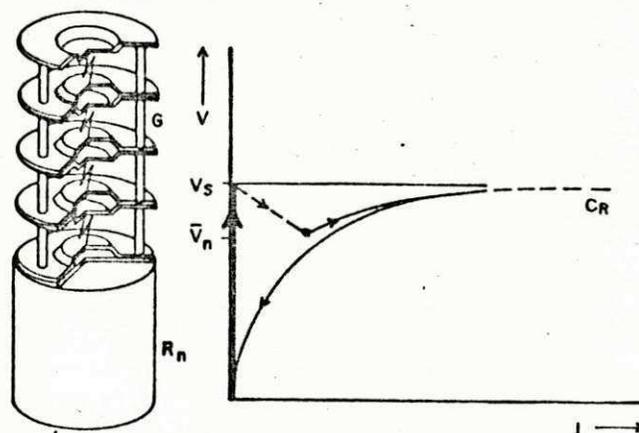


Fig. 2 - Pára-raios com centelhadores planos [1]

Esquerda: Diagrama esquemático

G = centelhador

R_n = Resistor não-linear (SiC)

Direita : Característica V-I

CR = Característica do resistor

\hat{V}_n = Valor máximo da tensão nominal

V_s = Nível de proteção

de alta e extra-alta tensão, em particular devido a capacidade dos pára-raios com centelhador limitador de corrente em limitar as sobretensões;

B - Redução na tensão de descarga atmosférica feita pela redução da resistência do elemento válvula;

C - Redução nas dimensões devido a redução da energia absorvida pelo elemento válvula para um dado nível de surto em consequência da distribuição da energia com os centelhadores.

O princípio básico do centelhador limitador de corrente é estender o arco pela ação de um campo magnético, no lu

gar de ter o arco queimando com comprimento constante entre duas placas. Em adição, a força contra-eletromotriz também ajuda a reduzir a corrente subsequente, possibilitando a extinção do arco antes do zero natural. A Figura 3 mostra esquematicamente este tipo de pára-raios e sua característica de descarga.

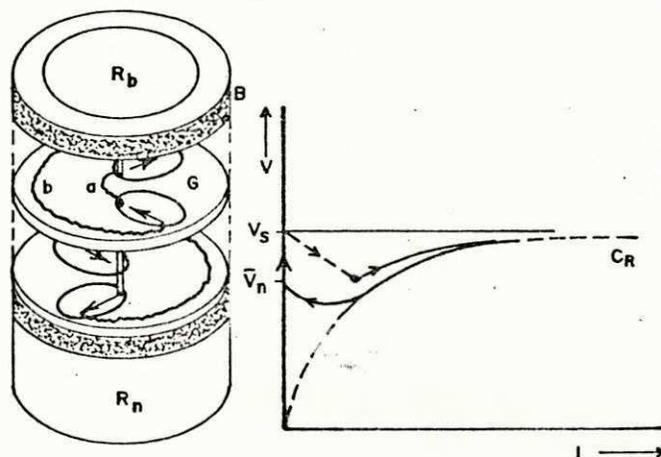


Fig. 3 - Pára-raios com centelhador limitador de corrente (sopro magnético) [1]

Esquerda: Diagrama esquemático

B = Enrolamento de sopro

R_b = Resistor de "bypass"

G = Centelhador

a = arco imediatamente após a ignição

b = arco estendido

R_n = Resistor não-linear (SiC)

Direita : Característica V-I

CR = Característica do resistor

V_n = Valor máximo da tensão nominal

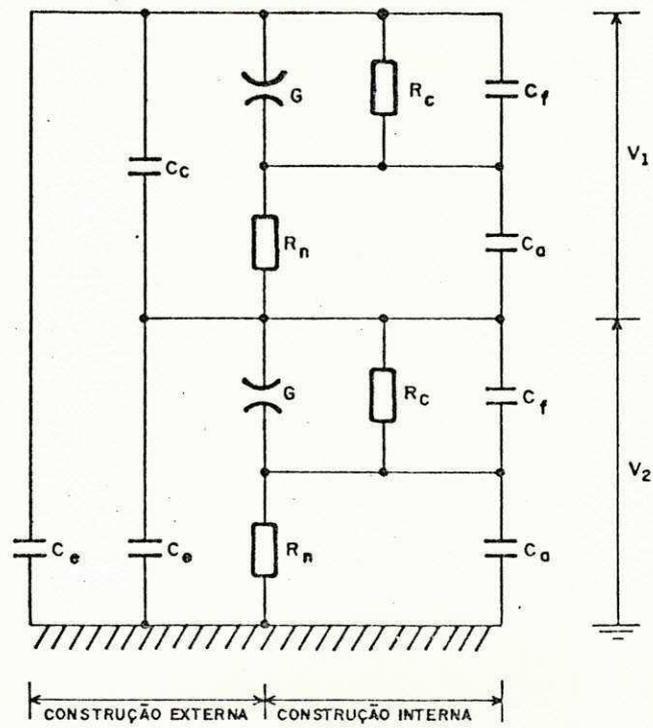
V_s = Nível de isolamento

Para avaliar o comportamento do pára-raios convencion-

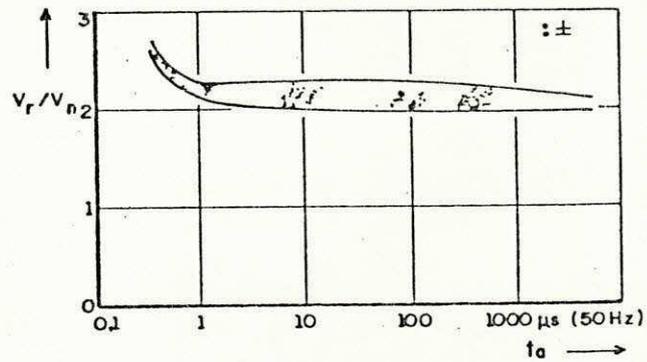
nal é necessário estudar o procedimento dos centelhadores , em particular sua tensão de ignição. Há uma grande dependência da tensão de ignição com a taxa de crescimento da tensão, e desta maneira também no tempo de resposta. A principal causa desta dependência é a distribuição não uniforme da tensão através dos centelhadores no instante da ignição. Fazendo controle da distribuição de tensão através de resistência e capacitância, minimizando os efeitos da poluição no isolador e capacitâncias parasitas para a terra, consegue-se manter a dispersão na característica tensão-tempo (V-t) dentro de limites aceitáveis para uma grande faixa de tempos de crescimento da frente de onda dos surtos (Figura 4). Porém, para tempos de crescimento muito pequenos verifica-se um crescimento bem delineado da tensão de ignição devido a uma inevitável limitação física, na forma de uma tensão crescendo até haver a ignição completa do pára-raios [1,2].

Tem sido reconhecido a vantagem de projetar um pára-raios sem o uso de centelhadores em série porque:

- A - Centelhadores estão sujeitos a mudar a ignição se o pára-raios não é adequadamente selado;
- B - Aplicações de tensões permissíveis podem ser limitadas pela probabilidade de ignição resultante da contaminação da superfície;
- C - O número de partes usadas em centelhadores é grande comparado com o número de partes total no pára-raios, e a probabilidade de desmontagem ou parte falhar normalmente aumenta com o número de partes usadas [3];



(A)



(B)

Fig. 4 (A) Circuito completo de um pãra-raios com dois elementos de carboneto de silício (SiC)

G = Centelhador
 Rn = Resistor não-linear (SiC)
 Rc = Resistor de controle
 Cf = Capacitância do centelhador
 Ca = Capacitância parasita em paralelo
 com o elemento de SiC
 Ce = Capacitância parasita para a terra
 Cc = Capacitância de controle
 $V_1 < V_2$

(B) Curva de tensão-tempo típica |1|

Vr = Tensão de descarga ou residual
 Vn = Tensão nominal do pára-raios
 ta = Tempo de ignição.

D - Com a ignição dos centelhadores há uma queda brusca da tensão aplicada aos terminais do pára-raios para a tensão residual do elemento de carboneto silício (SiC), ocorrendo um elevado dV/dt , consequentemente submetendo p.ex. os enrolamentos dos transformadores a esforços, os quais podem ser suficientes para sua danificação.

2.3 - RESISTORES DE ÓXIDO DE ZINCO

O desenvolvimento recente de um material cerâmico a base de óxido de zinco tornou possível a fabricação de resistores com um alto grau de não-linearidade sobre uma larga faixa de corrente. Ele conduz uma corrente muito pequena até que uma tensão próxima do nível de proteção é alcançada, e então somente aquela corrente necessária para limitar a sobretensão ao nível de proteção é conduzida. Como resulta-

do, o pára-raios absorve uma quantia mínima de energia exigida para proteger um dado nível de tensão [3].

Esta tecnologia tornou possível dispensar o uso dos centelhadores em série e produzir pára-raios sólidos e adequados para proteção de sistemas até as mais elevadas tensões.

2.4 - CARACTERÍSTICAS DO ELEMENTO DE ÓXIDO DE ZINCO

A apresentação das características do elemento de óxido de zinco será feita abordando os fatores mais importantes como a fabricação, a microestrutura, a característica elétrica e, finalmente, o mecanismo físico de condução.

2.4.1 - Fabricação

O resistor não-linear consiste basicamente de óxido de zinco, mas ele contém quantias menores de outros óxidos, entre os quais $B_{12}O_3$ e CoO , escolhidos adequadamente de maneira a se produzir a desejada característica altamente não-linear.

O óxido de zinco e aditivos finamente esmagados são preparados como um pó fluível completamente misturados que podem ser prensados em discos de grandeza desejada. Quando os discos prensados são sinterizados a alta temperatura um denso material cerâmico policristalino resulta [3].

No estado líquido ZnO e $B_{12}O_3$ são mutuamente solúveis, mas na solidificação são formadas uma fase rica de ZnO e outra de $B_{12}O_3$, isto é, ocorre dissociação. Se um disco con-

sistindo de uma mistura de ZnO com somente uns poucos por- centos de Bi_2O_3 é sinterizada acima do ponto de fusão do Bi_2O_3 uma rica fase líquida deste óxido é formada em volta dos grãos de ZnO que permanecem sólidos nesta temperatura . Este tipo de sinterização é conhecida como uma sinterização de fase líquida. No resfriamento a fase líquida solidifica e produz uma fase sólida que agora cobre os grãos de ZnO . O óxido de cobalto (CoO) o qual é adicionado em quantidades menores do que 1% (um por cento) serve para dopar o óxido de zinco semiconductor, em consequência disso reduzindo sua re- sistência elétrica. Na sinterização os íons de cobalto di- fundem dentro do óxido de zinco. Pequenas quantidades de ou- tros óxidos metálicos são geralmente adicionadas para influ- enciar o processo de sinterização [4].

Finalmente, o corpo produzido consiste predominate - mente de duas fases que determinam as propriedades elétri- cas da resistência.

2.4.2 - Microestrutura

A microestrutura básica do corpo cerâmico, ou seja sua constituição, é apresentada na Figura 5.

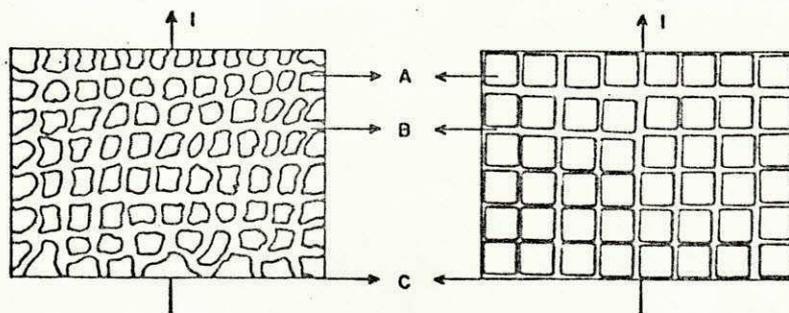


Fig. 5 - Microestrutura do Resistor de óxido de zinco

Esquerda: Microestrutura típica

Direira : Representação ideal

A = Grãos de ZnO

B = Camada intergranular

C = Eletrodos de contato

I = Corrente

Os grãos são de óxido de zinco com diâmetro de 10 a 25 μm , os quais são envolvidos e separados por uma camada intergranular, formada pela solidificação do óxido de bismuto (Bi_2O_3) líquido. Estas camadas intergranulares são extremamente finas (50 a 200 \AA) e produzem barreiras eletricamente isolantes [4]. Para facilitar a análise, a microestrutura é idealizada, apresentando a cerâmica formada por disposições série e paralela destas barreiras. Cada destas barreiras entre dois grãos é um elemento de resistência não-linear com uma queda de tensão de aproximadamente 2.5 V a uma densidade de corrente de 1 mA/cm² [4,5]. A tensão através do corpo sinterizado é igual a soma das tensões através das barreiras individuais entre os eletrodos, as quais são atravessadas pela corrente e conectadas em série. A capacidade de conduzir corrente é obtida da disposição paralela das barreiras e desta forma proporcional a área transversal do corpo.

Desta maneira, uma condição de distribuição uniforme da corrente é que para um dado caminho leve ao mesmo número de barreiras isolantes, pois caso contrário, a impedância de um determinado caminho poderia ser diferente de um outro. Em adição, a extrema não-linearidade da característica ten-

são-corrente faz com que uma mudança de 5 % na tensão leve a um fator acima de 4 na corrente. Portanto, a presença de não homogeneidade produz distribuição irregular da corrente e conseqüentemente aquecimento local da microestrutura. Concluindo, deve ser desprezível a dispersão do número de barreiras em série para todos os caminhos de corrente [9, 15].

2.4.3 - Propriedades Elétricas

A característica tensão-corrente típica dos elementos a base de óxido de zinco é apresentada na Figura 6 para duas temperaturas ($T_2 > T_1$).

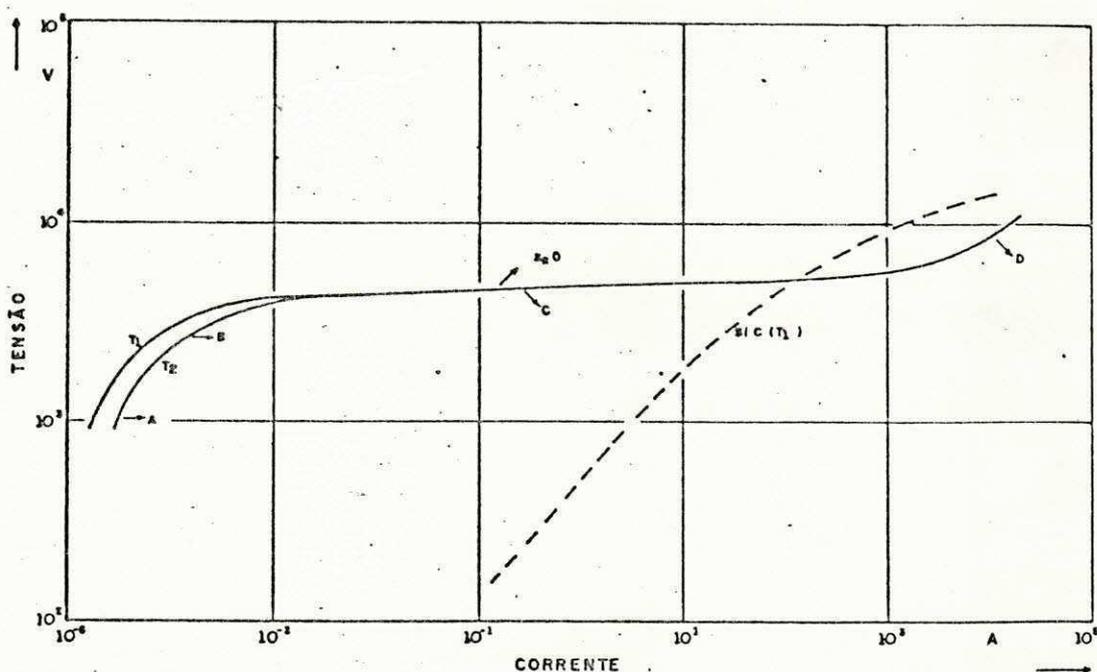


Fig. 6 - Característica tensão-corrente típica dos elementos de ZnO

- A = Região linear ou ôhmica
- B = região de baixa não-linearidade ou de pré-ruptura

- C = Região de alta não-linearidade ou de ruptura
 D = Região de "up turn"
 $T_1 < T_2$
 S_iC = Característica V-I do elemento de carboneto de silício para comparação.

Esta característica normalmente é dividida em quatro regiões considerando-se o aspecto da não-linearidade, conforme mostrado na figura, ou mais grosseiramente em somente duas regiões com relação à grandeza da corrente:

- 1 - Região de baixa-corrente (A + B)
- 2 - Região de alta-corrente (C + D)

É conhecido que as regiões linear e de baixa não-linearidade (baixa corrente) são sensivelmente dependentes da temperatura e que as regiões de alta não-linearidade e "up turn" (alta corrente) são mais estáveis e não significativamente influenciadas pelos fatores como temperatura e história passada do bloco. Levinson e Philipp sugeriram que o mecanismo de condução na região de baixa corrente é diferente daquela na região de alta corrente [5], como está explicado no item 2.4.4. Portanto, devido a este comportamento diferente serão apresentadas as propriedades elétricas nestas regiões separadamente.

2.4.3.1 - Região de alta-corrente

A característica tensão-corrente é descrita pela seguinte equação:

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

Onde: I = Corrente que flui pelo elemento de ZnO , dada em miliampère.

V = Tensão aplicada ao elemento, em volts.

k = Constante correspondente a resistência, convenientemente dada pela tensão aplicada quando um miliampère (1 mA) de corrente flui pelo corpo (V_{1ma}).

α = Coeficiente de não-linearidade, o qual pode ser deduzido pela seguinte fórmula:

$$\alpha \approx \frac{\log_{10} I_2 - \log_{10} I_1}{\log_{10} V_2 - \log_{10} V_1} \quad (2)$$

Sendo V_1 e V_2 as tensões nas correntes I_1 e I_2 da característica tensão-corrente.

Uma maneira mais explícita da equação (1) é:

$$I_2 \approx I_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

Onde α é o valor médio entre as correntes I_1 e I_2 deduzido da equação (2).

Para assegurar a eficácia de um elemento de proteção de sobretensão resistivo durante uma larga faixa de corrente é necessário que o valor médio do expoente não-linear situe-se acima de 20. Nos pára-raios de óxido zinco atuais, os maiores valores do coeficiente não-linear situam-se acima de 40.

Nesta região de alta-corrente, a dependência da característica com a temperatura é muito pequena ($\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \approx 2 \times 10^{-4} K^{-1}$, [5]), e como resultado a característica de proteção é inalterada por uma mudança na temperatura do pára-raios. O pára-raios convencional, usando elemento válvula de carboneto

de silício, apresenta um coeficiente de temperatura relativamente grande cerca de $2.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, nesta mesma região.

Nas correntes mais elevadas, a característica V-I começa a direcionar-se significativamente para cima, cujo motivo é atribuído à resistividade dos grãos de óxido de zinco. [3,7].

Para compreender melhor o comportamento do pára-raios de óxido de zinco na região de alta-corrente é preciso verificar sua resposta perante:

- A - Pulsos de tensão;
- B - Pulsos de corrente com variação do tempo de crescimento da frente de onda;
- C - Capacidade de absorção de energia do bloco de óxido de zinco.

A Figura 7 mostra a característica típica de resposta da corrente a pulsos de tensão, cujo tempo de crescimento ao nível especificado foi um microsegundo. Como pode ser visto, nas tensões mais elevadas (Curvas sólidas), há um atraso na resposta da corrente, com o tempo de atraso mostrando-se menor nas maiores tensões. Entretanto, a corrente para menores tensões aplicadas diminui gradualmente com o tempo semelhante a absorção de correntes em dielétricos. Isto sugere que o elemento comporta-se como um isolador na região de baixa corrente tendo uma alta absorção (Curvas pontilhadas) [6].

Observando agora a característica da tensão de descarga para um impulso de corrente, verifica-se que o pico da

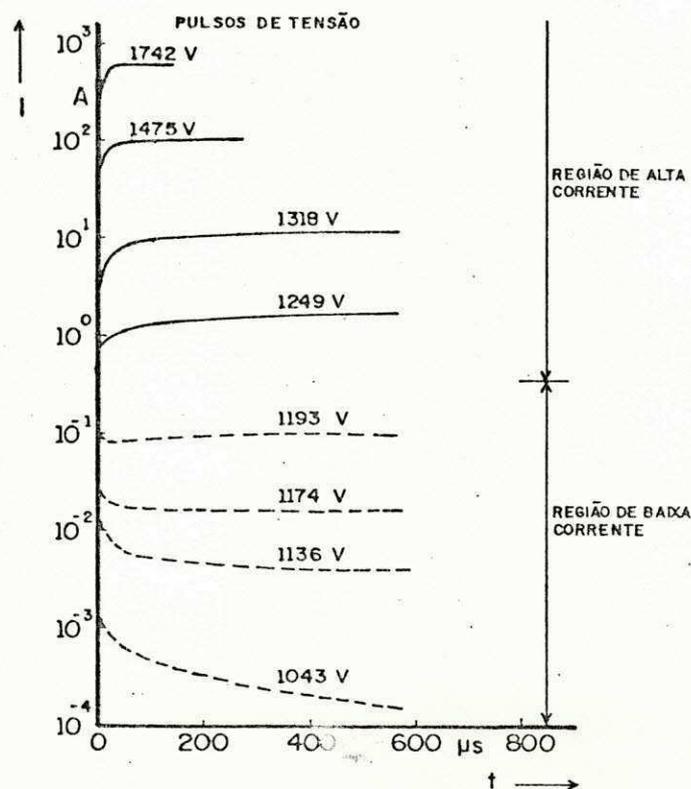


Fig. 7 - Formas de onda típica na resposta a vários pulsos de tensão [6]

tensão de descarga é antes do pico da corrente de surto, conforme Figura 8. É interessante verificar que este valor é maior do que aquele esperado da característica V-I para corrente cc. Em adição, devido ao maior expoente não-linear da curva obtida para elementos de óxido de zinco em relação ao de carboneto de silício ($4 < \alpha_{SiC} < 6$), tensão de descarga dos elementos de óxido de zinco nas maiores correntes tende ser menor do que a correspondente para o elemento de carboneto de silício.

A tensão de descarga mostra-se dependente do tempo de crescimento da frente de onda para pulsos de corrente com

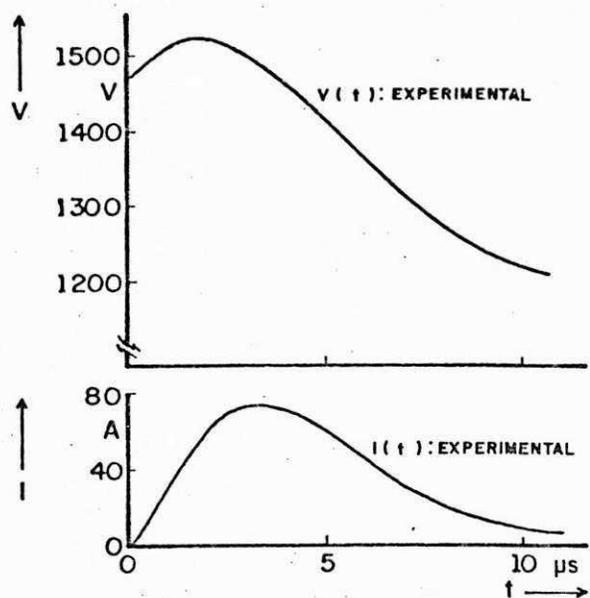


Fig. 8 - Tensão de descarga para um dado impulso de corrente [6]

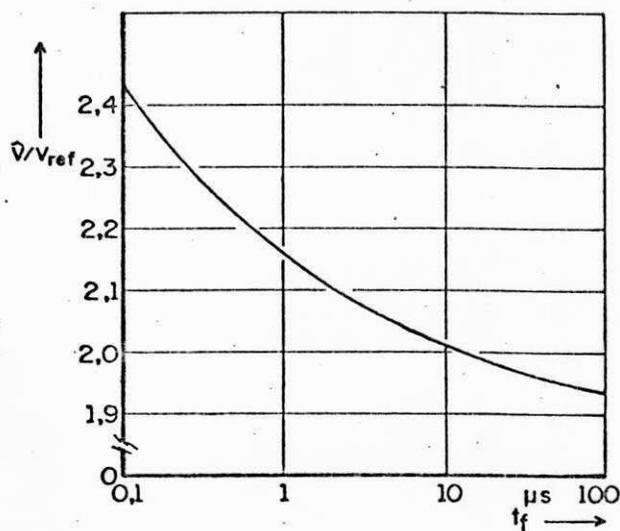


Fig. 9 - Efeito do tempo de crescimento da frente de onda da corrente na tensão de descarga [1]

$$V_{ref} = \hat{V}_{lma}$$

t_f = tempo de frente de onda

um tempo menor do que 100 μ s, conforme mostrado esquematicamente na Figura 9. Entretanto este efeito é bem menos pronunciado do que aquele obtido para ondas similares no pára-raios convencional [3,8].

O elemento válvula de óxido de zinco pode absorver alta energia devido a aplicação de sobretensões de frequência industrial ou ainda pela aplicação de surtos.

O calor específico do elemento de óxido de zinco é muito próximo de 3 $Ws/cm^3 \cdot k$. Desta maneira, um bloco com volume de 175 cm^3 (80 mm de diâmetro e 35 mm de espessura) terá uma capacidade de calor de 525 Ws/K , correspondendo a 175 Ws/K por KV de classe para um bloco de classe 3 KV. Este bloco pode absorver uma energia de 7 KWs/KV de classe sem perigo de danificação. Este valor corresponde a uma elevação de temperatura de 40 $^{\circ}C$. Entretanto se a energia absorvida em um único evento excede o valor de 9 KWs/KV de classe, dependendo do tipo de esforço o bloco pode ser danificado devido ao choque térmico ou ruptura. Após absorver uma alta energia, um intervalo de tempo é necessário para permitir equalização da temperatura através do bloco, após a qual nova absorção é admissível até o limite imposto pela estabilidade térmica transitória [3,8].

A capacidade de absorção máxima devido a aplicação de sobretensões de frequência industrial durante um certo tempo t é esquematicamente mostrado na Figura 10. Este caso é estritamente interessante porque ele representa para um pára-raios a resposta a sobretensões temporárias. Significa a sobretensão máxima permissível como função de sua duração [8].

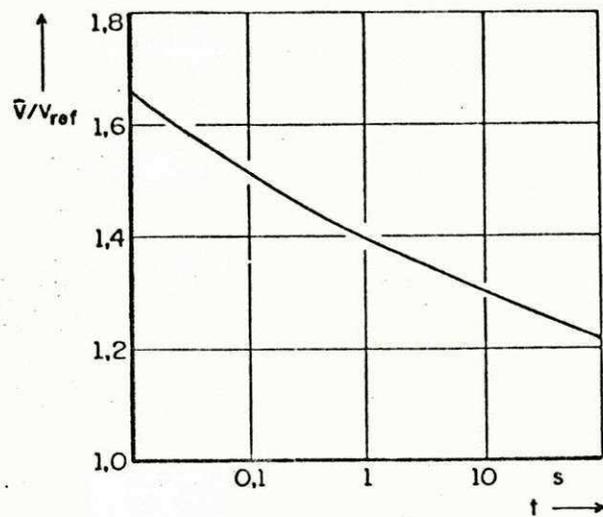


Fig. 10 - Capacidade admissível de sobretensões como função do tempo de sua duração |4|

$$V_{ref} = \hat{V}_{1ma}$$

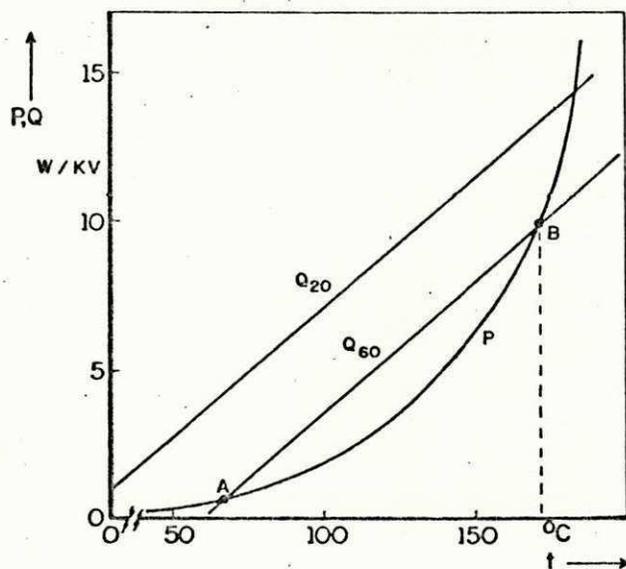


Fig. 11 - Geração de calor P sob aplicação de tensão contínua de operação e dissipação de calor Q típica para duas temperaturas ambientes de 20 e 60 °C |8|

W/KV = watts/KV de classe do elemento
de ZnO

A característica da capacidade de dissipação de calor do pára-raios juntamente com a capacidade de geração de calor do elemento válvula de óxido de zinco determinam os pontos de operação e crítico, mostrados esquematicamente na Figura 11.

O ponto de operação contínua é o ponto inferior de cruzamento das duas curvas, representando o ponto de equilíbrio estável, para o qual o bloco retornará após ter sido aquecido por uma descarga de alta energia (ponto "A" para uma temperatura de $60^{\circ}C$). Se o bloco ao receber uma alta energia tenha sua temperatura elevada a temperatura crítica, ponto "B", então fuga térmica poderá ocorrer para uma temperatura ambiente de $60^{\circ}C$. Entretanto, para alcançar a temperatura crítica a energia absorvida seria de aproximadamente 17 KWs/KV de classe, o que é aproximadamente duas vezes a energia máxima que pode ser absorvida em uma única operação sem causar danificação no bloco por choque térmico [3,8].

2.4.3.2 - Região de baixa corrente

A resposta da corrente a pulsos de tensão diminui gradualmente com o tempo com um comportamento semelhante a um isolador, apresentando uma considerável relaxação dielétrica, cuja presença dá origem a dissipação de calor em tensão alternada (região de baixa corrente Figura 7). Em adição, os pára-raios sem centelhadores série estão continuamente submetidos ao esforço da tensão fase-terra do sistema, resul -

tando em uma corrente permanente fluindo através do elemento de ZnO , cujo resultado é uma tendência da característica tensão-corrente desviar-se vagarosamente ao longo de sua vida conforme ilustrado na Figura 12.

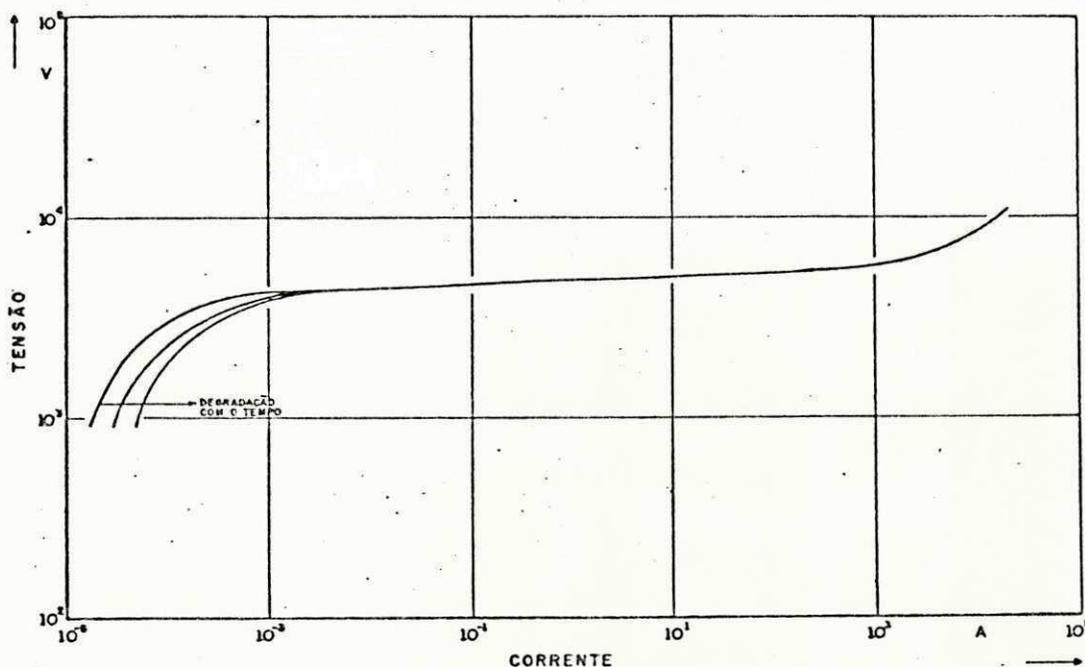


Fig. 12 - Degradação na região de baixa corrente da característica V-I

O desvio da baixa corrente é em uma direção a qual provoca um aumento nas perdas sob condições de operação normal. Estes motivos tornaram evidente a necessidade de efetuar medições da corrente de fuga resistiva sob aplicação de tensão alternada para os elementos de óxido de zinco.

A Figura 13 mostra um exemplo típico da corrente resistiva do elemento de óxido de zinco. A corrente total que flui pelo bloco é essencialmente capacitiva mas ligeiramente distorcida devido a não-linearidade da corrente resistiva.

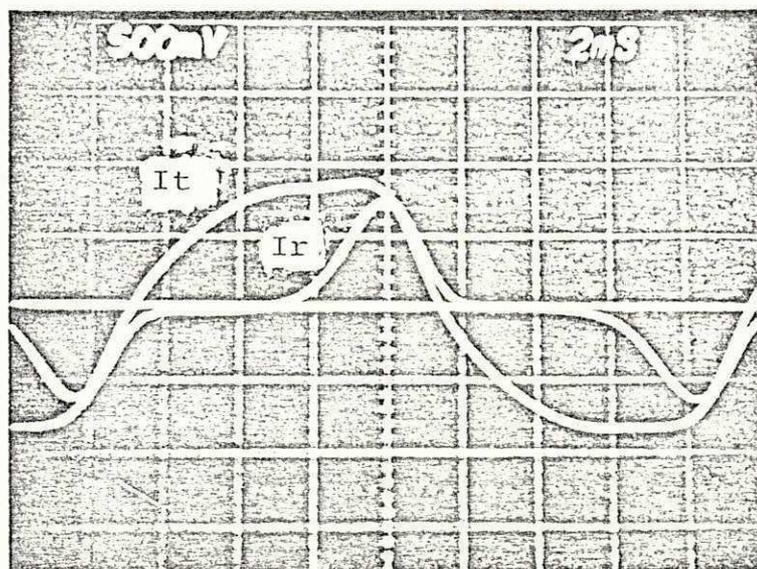


Fig. 13 - Corrente de fuga resistiva típica do elemento de ZnO

I_r = Corrente de fuga resistiva

I_t = Corrente de fuga total

As características tensão-corrente c_a e c_c , mostradas esquematicamente na Figura 14, são essencialmente diferentes. A corrente resistiva c_a mostra-se superior a sua correspondente em c_c , cuja diferença é atribuída às perdas dielétricas [6]. Nas tensões mais elevadas este papel se inverte, com a corrente de fuga c_c excedendo a c_a , cuja causa é atribuída ao efeito de tempo provocado pelo atraso na resposta da corrente a pulsos de tensão discutido anteriormente.

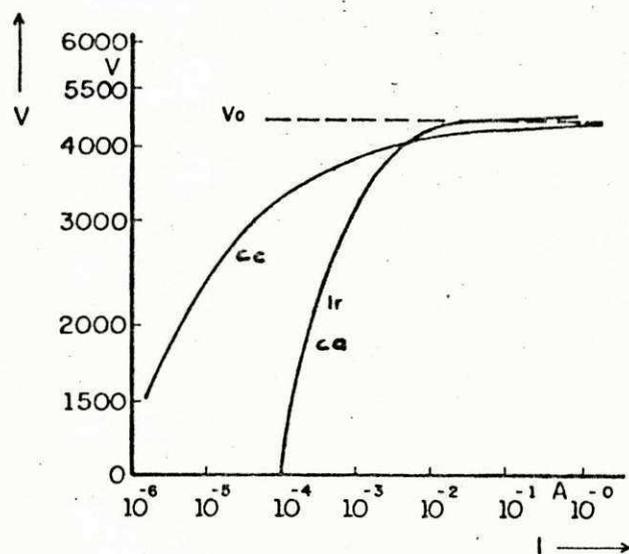


Fig. 14 - Características tensão-corrente [6]

I_r = Corrente resistiva ca

A característica V-I sob tensão aplicada ca tem uma dependência da temperatura. Isto é, nas temperaturas mais elevadas resulta em maiores correntes de fuga resistiva para a mesma tensão, cujo motivo é atribuído ao coeficiente de temperatura negativo da resistência não-linear dos elementos de óxido de zinco. Entretanto este efeito é menos significativo do que aquele para corrente de fuga cc, mostrado na Figura 15.

O pára-raios de óxido de zinco através da degradação da sua característica, seja devido a surtos ou ao esforço contínuo sob tensão alternada, tem sua corrente de fuga resistiva aumentada (Figura 12). Este fato leva ao aumento das perdas por efeito Joule, conseqüentemente aumentando a temperatura de trabalho do bloco de óxido de zinco. A elevação da temperatura por sua vez acelera o processo de degradação, aumentando a corrente de fuga resistiva. Esta realimentação

positiva pode continuar até a fuga térmica e o final de vida do bloco ocorrer.

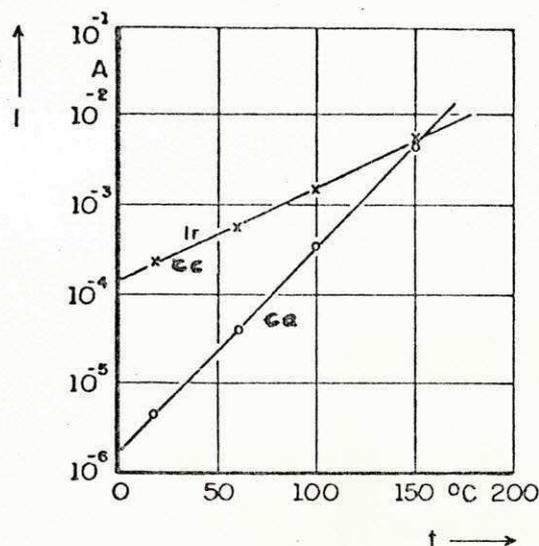


Fig. 15 - Dependência da temperatura da corrente de fuga i_{ca} e i_{cc} .

i_r = Corrente de fuga resistiva.

2.4.4 - Mecanismo Físico

O mecanismo de condução do elemento de óxido de zinco na região de baixa corrente é diferente daquela na região de alta corrente. Nesta última região a condução é consistente com um processo de tunelamento de Fowler-Nordheim. Na região de baixa corrente o processo de condução em i_{cc} parece ser diferente daquele em i_{ca} . Em corrente contínua, o mecanismo de condução segue uma lei tipo Schottky termicamente ativa, enquanto em corrente alternada este mecanismo parece ser inconsistente com a teoria de emissão de elétrons de Schottky, embora se saiba que a corrente de fuga resistiva i_{ca} é dependente da tensão aplicada "V" e da temperatura "T" [5, 14].

Para compreender os mecanismos de condução nos elementos de óxido de zinco é necessário conhecer os processos físicos, de tal maneira que um modelo físico tem sido desenvolvido para facilitar esta compreensão.

Quando um número muito grande de átomos são associados juntamente para formar um corpo sólido, os níveis discretos de energia atômica são combinados para formar bandas de energia de uma certa largura. Separando estas bandas de energia há uma banda proibida (intervalo de energia) em que nenhum estado de energia do elétron é possível. Os estados de energia do elétron ocupam níveis até um limite de energia conhecido como Nível Fermi. Este nível é uma medida da probabilidade de ocupação dos estados permitidos de energia [17]. Para condutores este nível situa-se na banda de condução, porém, para isoladores e semicondutores este nível situa-se na banda proibida. A banda de energia superior é conhecida como banda de condução (livre em semicondutor) e a inferior como banda de valência.

Um diagrama de bandas de energia para um semicondutor é apresentado na Figura 16.

Nas baixas temperaturas não há elétrons na banda de condução em um semicondutor, em consequência o semicondutor não conduz corrente. Entretanto, se ocorre uma ativação térmica alguns elétrons podem receber energia suficiente e saltarem para a banda de condução, resultando numa certa condutividade do semicondutor. Entretanto, o óxido de zinco na temperatura ambiente não apresenta ne-

nhuma condutividade, pois a energia térmica correspondente a 300 K recebida pelos elétrons não é suficiente para que os mesmos consigam saltar para a banda de condução [4].

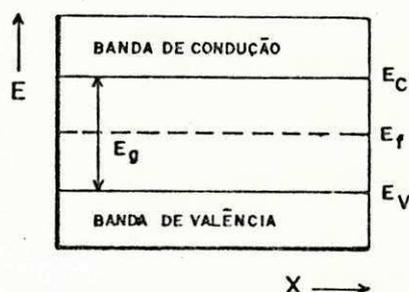


Fig. 16 - Diagrama de bandas de energia para um semicondutor intrínseco

E_v = Nível de energia da banda de valência

E_g = Largura da banda proibida

E_f = Nível Fermi

E_c = Altura da banda de condução

X = Distância

A condutividade dos grãos de óxido de zinco é conseguida através da dopagem com óxido de cobalto (CoO). Os átomos desta impureza deslocam alguns dos átomos da estrutura do óxido de zinco, de maneira que os níveis de energia permitidos são introduzidos a uma pequena distância abaixo da banda de condução do óxido de zinco, como mostrado esquematicamente pela Figura 17. Esta pequena distância corresponde a uma energia térmica de aproximadamente 100 K, o que significa dizer que na temperatura ambiente (~ 300 K) os grãos de óxido de zinco apresentam uma considerável conduti

vidade, pois a energia térmica fornecida tornou possível a passagem de um certo número de elétrons para a banda de condução [4], que depende do número de átomos do dopante.

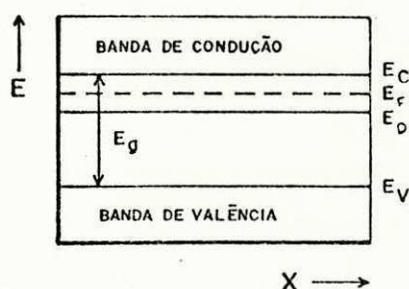


Fig. 17 - Diagrama de energia de um semiconductor dopado

E_V = Nível de energia da banda de valência

E_f = Nível de energia Fermi

E_d = Nível de energia do dopante

E_c = Nível de energia inferior da banda de condução

E_g = Largura da banda proibida

X = Distância

Nas camadas intergranulares constituída basicamente de $B_{12}O_3$, há os chamados estados superficiais os quais situam-se dentro da banda proibida do óxido de zinco. Estes estados são parcialmente preenchidos com elétrons de maneira que estas camadas são eletricamente carregadas. Afim de compensar esta carga negativa, os elétrons na banda de condução dos grãos de óxido de zinco são repelidos para a zona periférica. Em decorrência uma barreira potencial é formada evitando os elétrons de se aproximarem da camada intergranular.

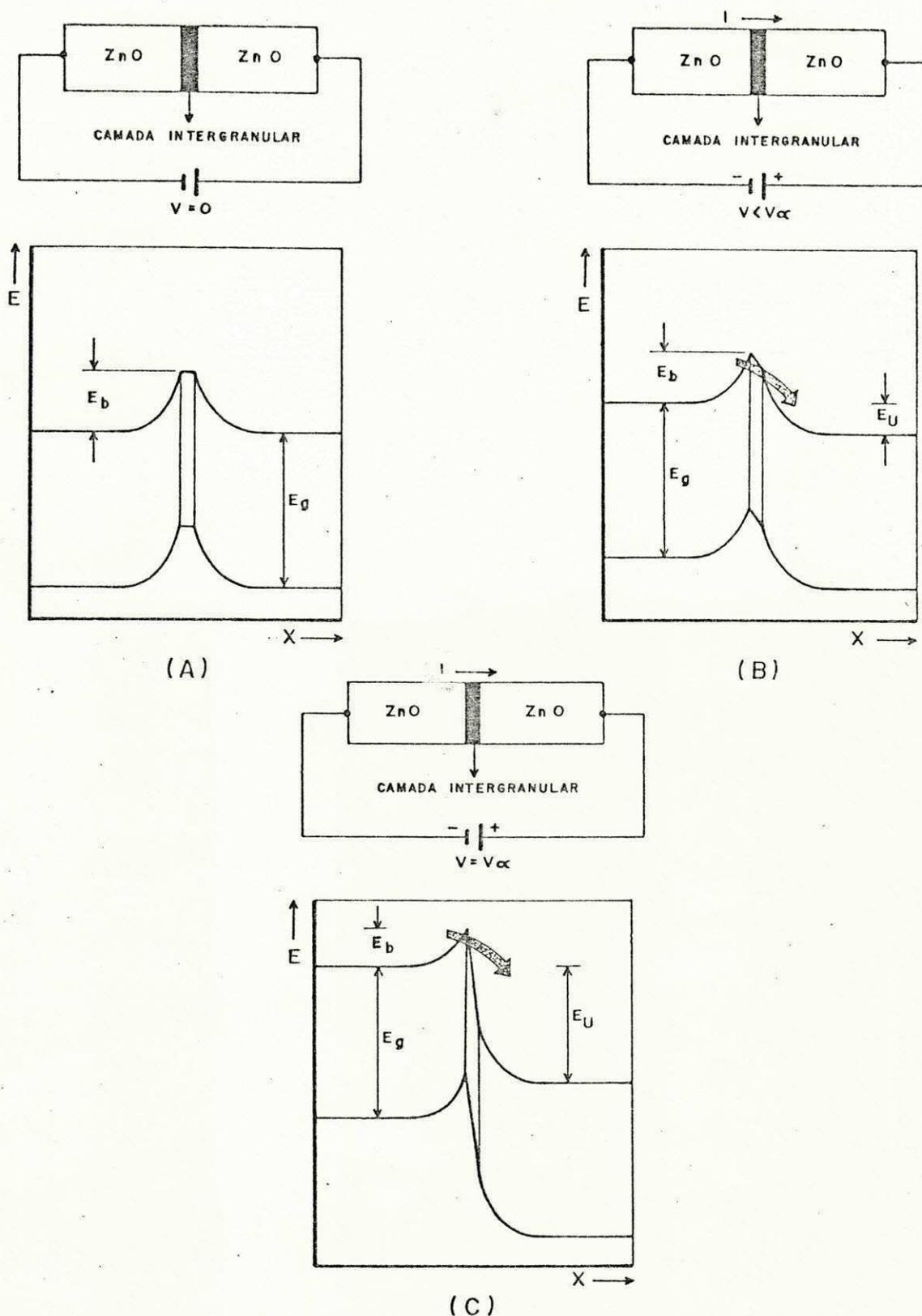


Fig. 18 - Representação do potencial de barreira para a interface grão de ZnO -camada intergranular - Grão de ZnO [4, 18]

- (A) - Sem tensão aplicada
- (B) - Com tensão aplicada
- (C) - Elevada tensão aplicada

- E = Energia potencial
 X = Distância
 E_g = Largura da banda proibida
 E_b = Altura da barreira potencial
 E_u = Energia potencial devido a tensão aplicada.

A altura da barreira é de aproximadamente 1 eV de maneira que muito poucos elétrons possuem energia térmica suficiente para penetrá-la (Figura 18(A)).

Quando se aplica uma tensão entre dois grãos de óxido de zinco separados pela camada intergranular os potenciais de um e de outro lado são diferentemente deslocados. Este processo pode ser visto esquematicamente pela Figura 18(B). Para os elétrons do lado esquerdo a barreira é diminuída ao passo que para aqueles do lado direito ela é aumentada. Em consequência um fluxo de elétrons pode agora fluir da esquerda para a direita. A não-linearidade observada experimentalmente na característica V-I pode ser explicada se a situação na Figura 18(C) é atingida. A elevação da tensão aplicada faz com que o nível de energia da banda de condução do lado direito seja igual ou inferior ao nível superior da banda de valência do lado esquerdo. "A carga positiva remanescente parcialmente compensa a carga na camada intermediária resultando em uma rápida redução na barreira potencial conforme a tensão aumenta" [4]. Este efeito leva a extrema não linearidade observada na característica tensão-corrente.

2.4.4.1 - Emissão Schottky

O processo de condução em cc na região de baixa cor-

rente da característica V-I segue um mecanismo de emissão de elétrons tipo Schottky. Esta teoria corresponde a emissão termiônica sobre uma barreira potencial diminuída pela tensão aplicada, esquematicamente mostrado na Figura 18(B). A equação (4) descreve este processo [5].

$$I_1 = I_0 \exp \left[- (E_a - f(V_1))/kT \right] \quad (4)$$

Onde: E_a = Energia de ativação

V_1 = Tensão aplicada na camada intergranular

k = Constante de Boltzman

T = Temperatura absoluta

2.4.4.2 - Tunelamento de Fowler-Nordheim

O processo de tunelamento é válido para a região de alta corrente da característica V-I. Ele é dominante quando a tensão aplicada é tão alta que elétrons podem tunelar através do potencial abaixado em direção a banda de condução.

A equação simplificada que descreve este processo é:

$$I_1 \cong I_0 \exp \left[- \gamma/V_1 \right] \quad (5)$$

Onde: γ depende somente da energia de ativação [5].

É interessante neste ponto comparar as equações empírica (3) e a teórica (5) válidas nesta região de corrente.

A equação empírica

$$\frac{I_2}{I_1} \cong \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\alpha$$

é conhecida para dar uma aproximação razoável para a característica do resistor não-linear na região de alta não-linearidade da característica V-I, e deve ser compatível em algum sentido com o resultado teórico.

Tomando o logaritmo da equação empírica e expandindo

$$\ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right) = \alpha \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

a função logaritmo do segundo membro, tem-se que:

$$\ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right) = \alpha \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (6)$$

Alternativamente, da divisão da equação teórica para a tensão V_2 pela tensão V_1 , tem-se que

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right) &= -\gamma \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right) \\ &= \frac{\gamma}{V_1} \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Para que as equações 6 e 7 sejam equivalentes a identidade deve ser satisfeita $\gamma/V_1 = \alpha$. O erro cometido na expansão da equação empírica é $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right)^2$, o qual corresponde ao segundo termo da expansão desprezada.

Levinson e Philipp extimaram o expoente não-linear pela identidade acima e obtiveram um valor próximo de 50, o qual está dentro da faixa dos valores experimentais obtidos para os elementos de óxido de zinco [5].

2.5 - MEDIÇÃO DA CORRENTE DE FUGA RESISTIVA

Como se sabe, a vida útil de um pára-raios é estritamente dependente da temperatura de operação. Uma maior temperatura acelera o processo químico de deterioração da matéria que conseqüentemente reduzirá a vida útil do equipamento. Por sua vez, a temperatura é dependente da energia gerada por efeito Joule. Desta maneira, a extensão da degradação do pára-raios pode ser avaliada pela amplitude da corrente de fuga que flui continuamente pelo elemento de óxido de zinco.

A corrente de fuga devido a aplicação de tensão cc é a responsável direta pelas perdas do pára-raios. Ao contrário, sob tensão ca a corrente total é predominantemente capacitiva, de maneira que, para se ter uma estimativa das perdas do elemento de óxido de zinco, é necessário fazer a medição da componente resistiva da corrente total.

Um circuito equivalente simplificado do elemento de óxido de zinco é apresentado na Figura 19, mostrando as componentes resistiva e capacitiva da corrente total. A resistência não-linear "R" e a capacitância "C" em paralelo, são associados com a camada intergranular, enquanto "r" corresponde a resistência série dos grãos de óxido de zinco. A capacitância "C" é fracamente dependente da tensão, da frequência e temperatura, enquanto a resistência "R" é estranhamente dependente da tensão e frequência [5, 8]. A amplitude "r" é muito pequena e desta maneira importante somente a níveis de alta corrente onde é responsável pelo "upturn"

na característica V-I (Figura 7). Desta maneira sua influência na região de baixa corrente é desprezível. Assim o circuito equivalente consiste de uma capacitância e uma resistência paralela associadas com a camada intergranular [5].

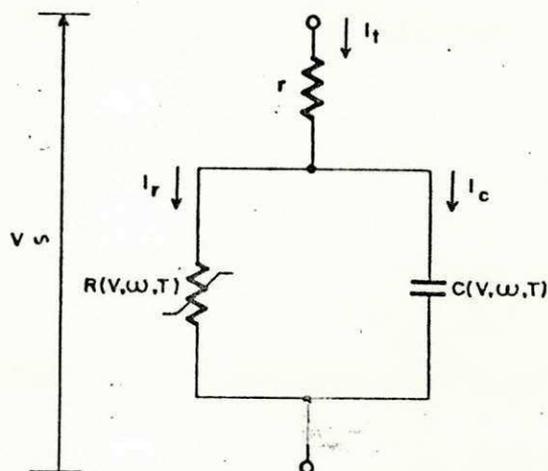


Fig. 19 - Circuito equivalente simplificado de um elemento de óxido de zinco [5].

R = Resistência não-linear

C = Capacitância

r = Resistência associada aos grãos de óxido de zinco

It = Corrente total

Ir = Componente resistiva

Ic = Componente capacitiva

V = Tensão aplicada ao elemento

Sob uma tensão aplicada senoidal "V", a corrente resistiva é tal que ao passar pela resistência não-linear provoca uma queda de tensão senoidal, em fase com a tensão aplicada. A corrente capacitiva é senoidal e adiantada de noventa graus em relação a tensão aplicada. Assim, a medição da

corrente de fuga resistiva pode ser feita com um método que cancela a componente capacitiva da corrente total.

2.5.1 - Método de Medição

Há duas filosofias de medição da corrente de fuga resistiva. A primeira é aquela em que se usa uma tensão de referência, defasada de noventa graus da tensão aplicada ao pára-raios, para cancelar a componente capacitiva. A segunda é aquela em que se usa filtrar a componente de alta frequência na corrente resistiva do elemento de óxido de zinco.

O método de medição seguindo esta última filosofia parece ser pouco preciso, uma vez que, a corrente de fuga resistiva tem componente fundamental, ou seja, na mesma frequência da corrente capacitiva, o que não seria considerado por este método. Ao contrário, Mizukoshi e outros dizem que esta imprecisão do método, conhecido por método de harmônico mais elevado, é devido a existência de poucas componentes de alta frequência na tensão da linha transmissão [9]. Este método é mostrado esquematicamente pela Figura 20 (A).

Segundo a primeira filosofia de medição, há duas maneiras distintas de se obter a tensão de referência para cancelar a corrente capacitiva. A primeira é obter a tensão de referência da tensão da linha. Em laboratório tem se usado um capacitor de alta-tensão, sem perdas, para esta finalidade. A segunda maneira é obter a tensão de referência através da queda de tensão em um resistor não-linear em série com o pára-raios. A primeira é largamente empregada, pois oferece uma grande precisão, cujo método é conhecido por mé

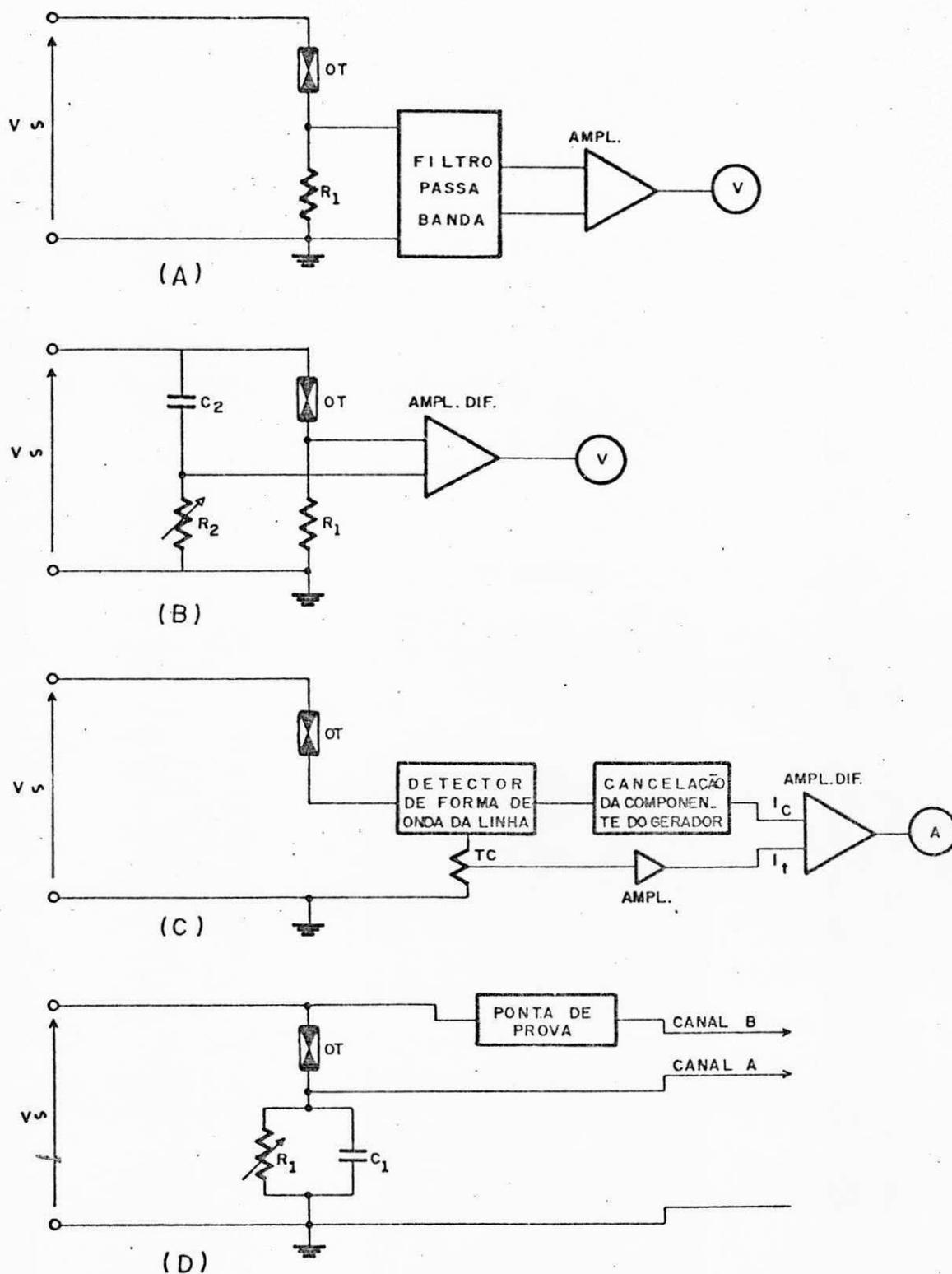


Fig. 20 - Diagrama esquemático dos métodos de medição da componente resistiva da corrente total nos para-raios de óxido de zinco.

(A) - Método do harmônico mais elevado [9]

(B) - Método convencional [6]

(C) - Método do resistor não-linear [9]

(D) - Método de compensação por atenuador [10]

tudo convencional [6], mostrado na Figura 20(B). A segunda maneira é mais recente e pouco divulgada. O método é conhecido como método do resistor não-linear, mostrado esquematicamente na Figura 20(C) [9].

Há entretanto um outro método proposto para esta finalidade, cuja filosofia de medição é diferente das duas anteriormente citadas. Baseado na técnica de compensação por atenuador, empregada nos osciloscópios para tornar sua operação independente da frequência, foi proposto a aplicação desta técnica na medição da corrente de fuga resistiva, considerando-se que o circuito equivalente do pára-raios pode ser tomado como uma resistência não-linear em paralelo com uma capacitância. A Figura 20(D) mostra o circuito deste método, conhecido como método de compensação por atenuador [10].

CAPÍTULO III

CIRCUITOS DE MEDIÇÃO E ARRANJO EXPERIMENTAL

3.1 - INTRODUÇÃO

Objetivando esforçar o pára-raios com descargas semelhantes às atmosféricas, fêz-se uso de um gerador de impulso de corrente, o qual foi ajustado para fornecer uma corrente de 20 KA, com forma de onda padronizada de 8/20 μ s. Para a medição da corrente de fuga, na região de baixa corrente da característica V-I do bloco à base de óxido de zinco, utilizou-se tensão alternada. Finalmente, para investigar o processo de estabilização térmica e a degradação de surto, utilizou-se dois arranjos, um fechado e outro aberto.

3.2 - GERAÇÃO DE IMPULSOS DE CORRENTE

A aplicação de impulso de corrente ao bloco foi feita utilizando um gerador de impulso, cujo conjunto de capacitores é composto de cinco (05) elementos de 2 μ F cada, sendo sua alimentação feita através de uma unidade de retificação em série com outra de tiristores.

A operação do gerador foi automatizada, através de uma mesa de controle, possibilitando que o tempo e a tensão de

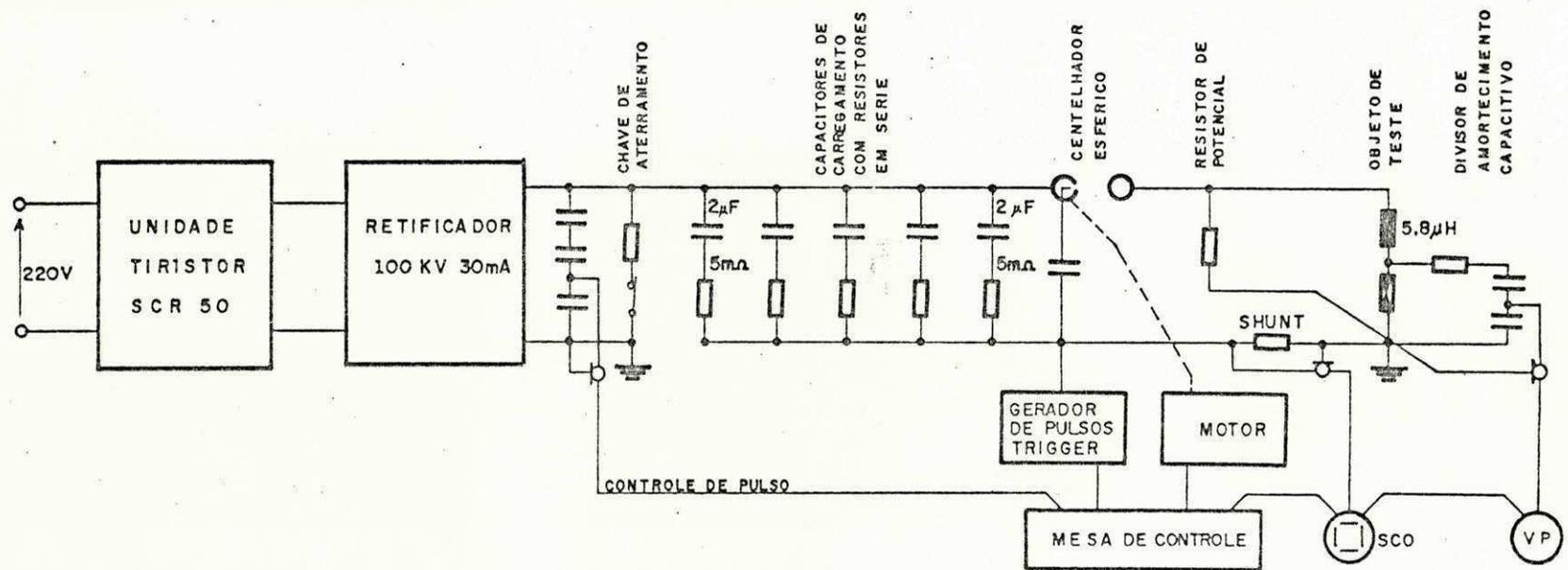


Fig. 21 - Diagrama do circuito principal do gerador de impulso de corrente HAEFELY - 100 KV, 50 KJ.

carregamento dos capacitores, e o espaçamento entre esferas fosse mantido constante durante todas as aplicações dos impulsos.

O circuito principal do gerador é mostrado na Figura 21, onde as relações de transformação do "SHUNT" e do divisor de tensão utilizados são 95.47 e 79.61, respectivamente.

Com a finalidade de obter uma corrente de 20 KA, com forma de onda padronizada de 8/20 μ s, polaridade negativa, foram ajustados os seguintes valores:

- Tensão de carregamento 44.5 KV
- Tempo de carregamento 90 seg
- Espaçamento entre esferas 17 mm

3.3 - CIRCUITO DE TENSÃO ALTERNADA

O fornecimento da tensão alternada ao elemento de óxido de zinco, para medição da corrente de fuga na região de baixa corrente, foi feito utilizando-se o circuito apresentado na Figura 22, cujos equipamentos principais empregados foram um regulador e um transformador de alta-tensão.

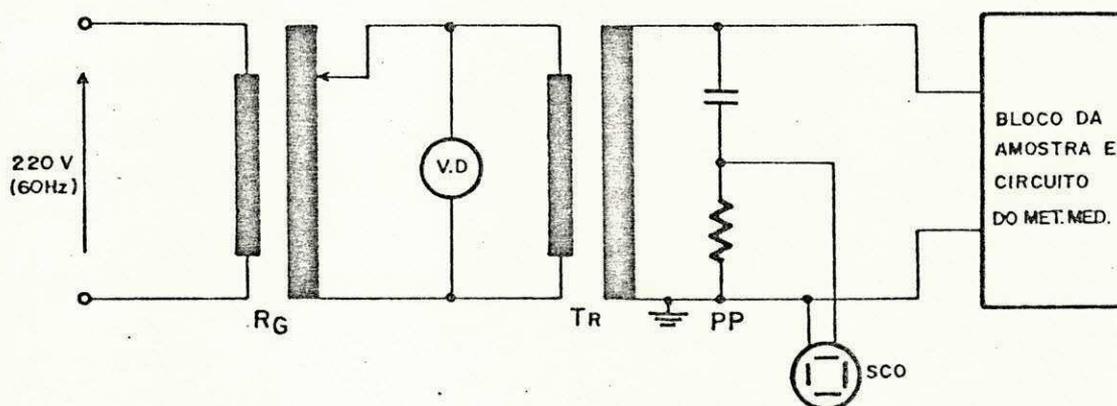


Fig. 22 - Circuito de tensão alternada

RG = Regulador de tensão alternada

TR = Transformador de alta-tensão

VD = Voltímetro digital

PP = Ponta de prova

SCO = Osciloscópio

Tendo em vista a constatação de oscilações significativas na tensão de alimentação, tornou-se necessária a colocação de um estabilizador, anterior ao regulador, fixando a tensão de saída em $220 \pm 1\%$ volts.

3.3.1 - Método Convencional

Para a medição da corrente de fuga resistiva, do elemento de óxido de zinco, utilizou-se o método convencional, cujo emprego tem sido largamente difundido [6,9].

O método convencional, mostrado na Figura 23, utiliza a tensão aplicada ao bloco para fazer uma fonte de tensão de referência, que cancela a componente capacitiva da corrente de fuga total. No circuito, utilizou-se a queda de tensão em um resistor " R_2 " em série com um capacitor de alta-tensão " C_2 " como tensão de referência. Como medida da corrente de fuga total, tomou-se a queda de tensão em um resistor " R_1 " em série com o bloco de óxido de zinco. O cancelamento da tensão devido a corrente de fuga capacitiva da total foi feito através de um osciloscópio com entrada diferencial. Assim, a corrente de fuga resistiva é o resultado obtido do cancelamento das tensões devido as correntes, dividido pela resistência em série com o bloco de óxido de zinco (R_1).

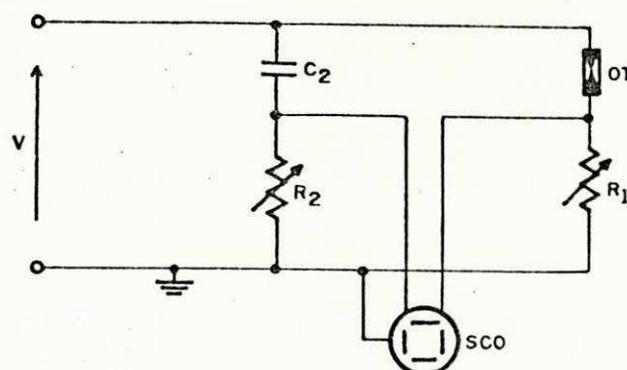


Fig. 23 - Circuito do método de medição convencional [6]

OT = Objeto de teste

C_2 = Capacitor de alta-tensão

R_1 = Resistor em série com objeto de teste

R_2 = Resistor em série com capacitor de alta-tensão

V = Tensão aplicada

3.3.2 - Método compensação por atenuador

O método compensação por atenuador, recentemente proposto, foi investigado para verificar sua compatibilidade com o método convencional.

Este método, mostrado na Figura 24, utiliza-se da técnica de compensação por atenuador, conforme aquela utilizada na entrada dos osciloscópios, para a medição da corrente de fuga resistiva dos elementos de óxido de zinco [10]. Utilizando-se um osciloscópio com dois canais, ajusta-se a tensão V_0 , através do resistor variável R_1 , de tal maneira a

colocá-la em fase com a tensão aplicada ao bloco. A divisão da tensão V_0 pela resistência R_1 seria, então, a medida da corrente de fuga resistiva.

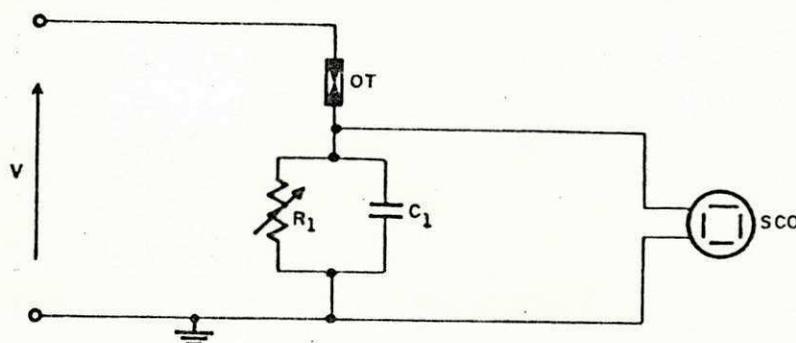


Fig. 24 - Circuito do método de medição compensação por atenuador $|10|$.

R_1 = Resistor em série com objeto de teste

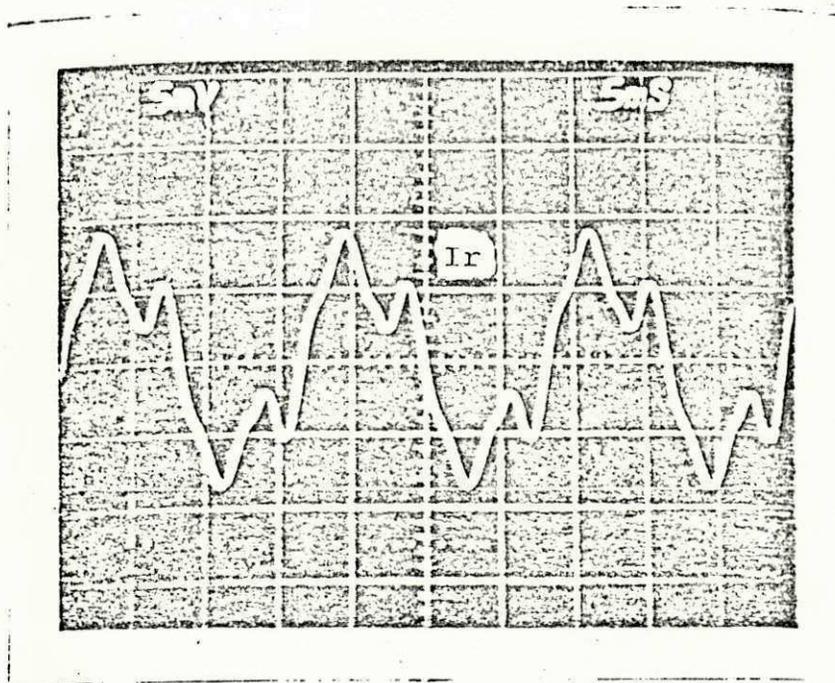
C_1 = Capacitor em paralelo com o resistor R_1

SCO = Osciloscópio.

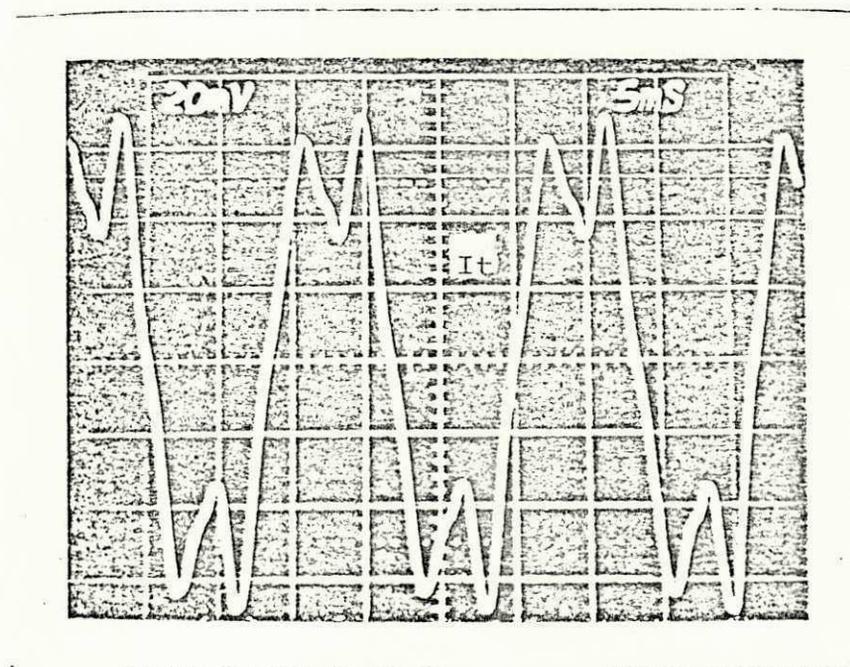
3.3.3 - Influência dos harmônicos

Uma vez obtida a estabilidade da tensão de alimentação, foram realizadas medições preliminares das correntes de fuga resistiva e total, para a região linear da característica V-I do elemento de Óxido de zinco. Esperava-se que as ondas das correntes fossem semelhantes a onda da tensão aplicada. Todavia, isto não se verificou devido a presença acentuada de harmônicos nas correntes, como pode ser visto pela Figura 25.

Verificando a tensão nos terminais do secundário do transformador em vazio, foi constatada uma ligeira presença



(A)

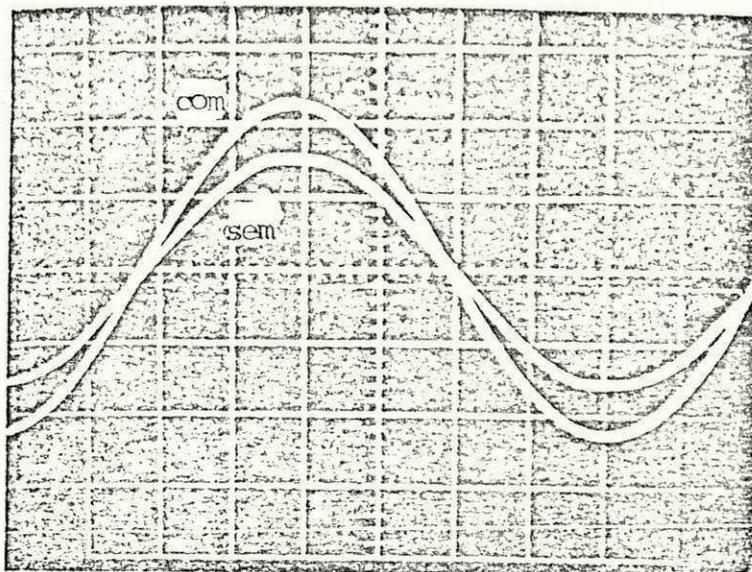


(B)

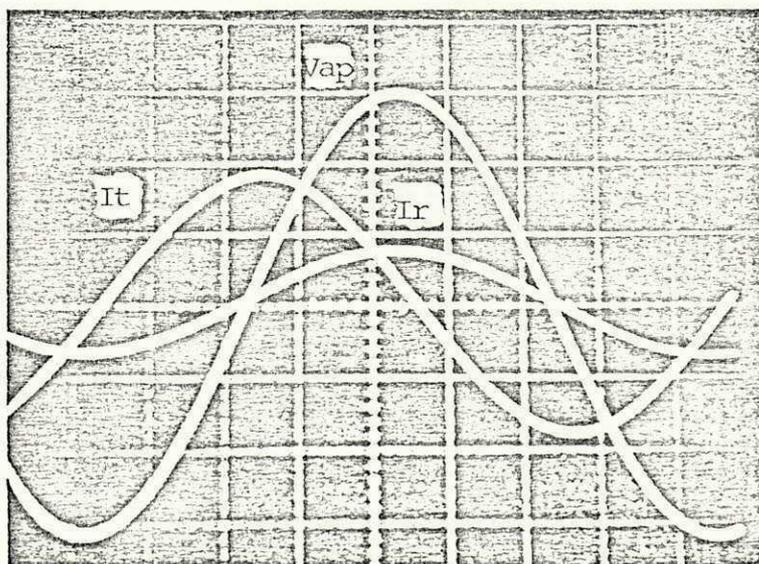
Fig. 25 - Resultados com presença de harmônicos

(A) Corrente resistiva com harmônicos

(B) Corrente total com harmônicos



(A)



(B)

Fig. 26 - Resultados com e sem reator

(A) Tensão sem e com reator

(B) Tensão, corrente resistiva e total sem harmônicos.

de harmônicos (Figura 26). Evidenciou-se, então, a necessidade de atenuar a amplitude dos harmônicos a valores insignificantes, de maneira a se fazer leitura precisa dos valores de pico das correntes, em frequência alternada. Fazendo uma análise do circuito e utilizando reatores em série com o transformador, ambos funcionando como circuito passa-baixa, conseguiu-se reduzir a amplitude dos harmônicos a valores desprezíveis, em comparação com a amplitude da fundamental, como pode ser verificado pela Figura 26(B).

Empregando o método convencional (Figura 23) na medição da corrente de fuga resistiva, verifica-se que tomando a queda de tensão na resistência R_2 em série com o capacitor de alta-tensão C_2 (Figura 27) este ramo comporta-se como um filtro passa-alta, cuja função de transferência pode ser escrita.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{S}{S + 1/R_2 C_2} \approx S R_2 C_2 \text{ para } \frac{1}{R_2 C_2} \gg S \quad (8)$$

Assim, observa-se que a amplitude do harmônico é ampliada em relação a amplitude da fundamental, por um fator igual a razão das frequências do harmônico pela fundamental. Para exemplificar, seja a tensão de entrada V_i composta de uma onda fundamental (V_{if}) e uma de terceiro harmônico (V_{i3h}). Assim, a tensão de saída V_o também terá uma onda fundamental é uma de terceiro harmônico. Ou,

$$V_i = V_{if} + V_{i3h} \quad (9)$$

$$V_o = V_{of} + V_{o3h} \quad (10)$$

aplicando a função de transferência, tem-se que

$$\frac{V_{of}}{V_{if}} = S R_2 C_2 \quad (11)$$

$$\frac{V_{o3h}}{V_{i3h}} = 3 S R_2 C_2 \quad (12)$$

Substituindo as equações 11 e 12 na equação 10, tem-se que

$$V_o = (S R_2 C_2) V_{if} + (3 S R_2 C_2) V_{i3h} \quad (13)$$

o que mostra a ampliação da amplitude da onda de terceiro harmônico, em relação a fundamental, por um fator 3.

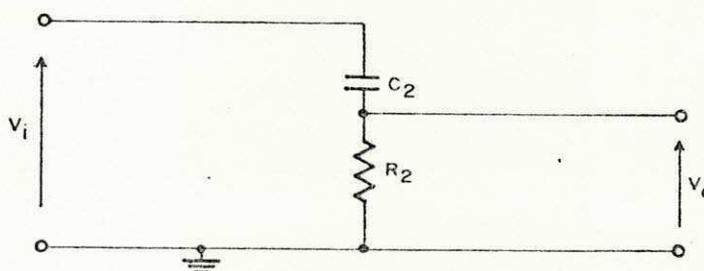


Fig. 27 - Ramo RC comportando-se como filtro passa-alta

R_2 = Resistência

C_2 = Capacitância de alta-tensão

Desta maneira, na medição da corrente de fuga resistiva, empregando o circuito do método convencional mostrado na Figura 23, o erro cometido é tanto maior à medida que a razão das amplitudes do harmônico pela fundamental se eleva.

Finalmente, o circuito completo de tensão alternada, é apresentado na Figura 28, empregando o método convencional.

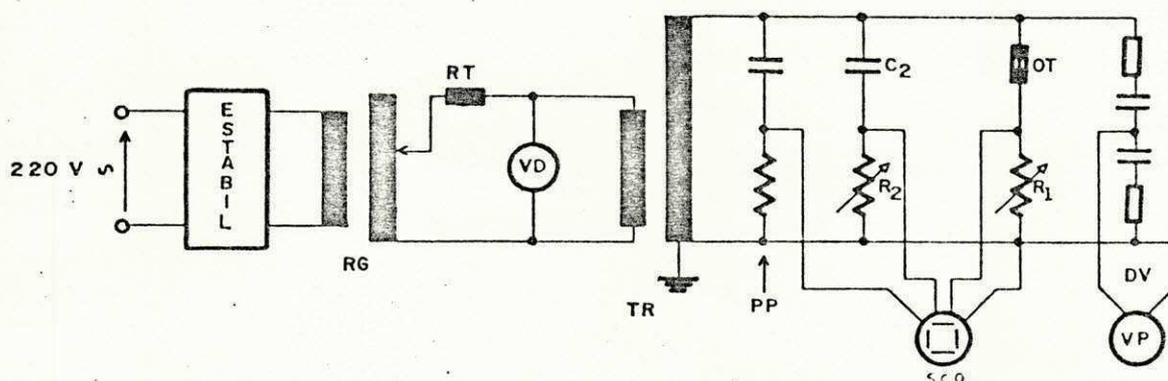


Fig. 28 - Circuito completo de tensão alternada utilizando o método convencional

- RG = Regulador de tensão
- RT = Reator
- TR = Transformador de alta-tensão
- PP = Ponta de prova
- C₂ = Capacitor de alta-tensão
- OT = Objeto de teste
- R₁ = Resistor em série com objeto de teste
- R₂ = Resistor em série com capacitor de alta tensão
- DV = Divisor de amortecimento capacitivo
- VD = Voltímetro digital
- SCO = Osciloscópio com entrada diferencial
- VP = Voltímetro de pico

3.4 - ARRANJO EXPERIMENTAL

As experiências foram executadas em dois blocos a base de óxido de zinco, de mesmo fabricante, utilizando-se dois diferentes arranjos físicos.

O primeiro, mostrado na Figura 29, foi um arranjo fechado, consistindo de um cilindro de material cerâmico, tendo suas extremidades vedadas por discos de acrílico, presos entre si por intermédio de quatro hastes, também de acrílico, externamente ao cilindro e aparafusadas em suas extremidades. Internamente, o bloco foi colocado entre dois discos de metal e conectado ao circuito externo através de duas hastes condutoras.

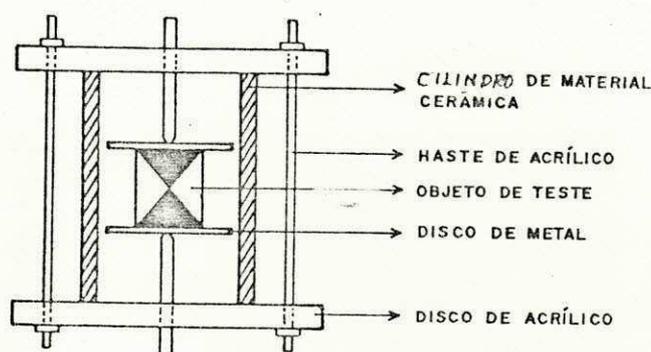


Fig. 29 - Arranjo fechado

Devido aos materiais utilizados na construção deste arranjo, materiais cerâmico e acrílico, a condição de dissipação de calor do bloco tornou-se mais severa que a condição real obtida para os pára-raios, uma vez que nestes a base e a extremidade superior são de materiais metálicos.

O segundo arranjo, mostrado na Figura 30, aberto, consistindo de uma placa de alumínio, com duas hastes de materiais isolante verticalmente presos, entre as quais foi colocado o eletrodo inferior, de forma circular, preso à placa. O eletrodo superior foi fixado a uma haste de metal, pre

sa a uma barra transversal de acrílico, com dois furos nas extremidades, por onde se encaixam as hastes de material isolante, possibilitando o ajuste da distância de separação dos eletrodos. Entre o eletrodo superior e a barra transversal de acrílico foi colocado uma mola para pressionar o bloco de maneira a se ter bons contatos (Figura 30).

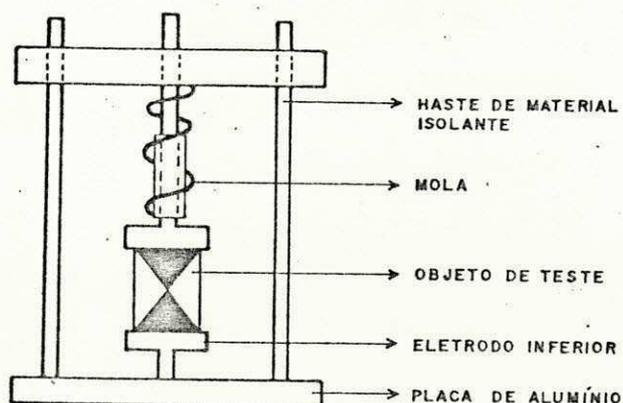


Fig. 30 - Arranjo Aberto

Neste arranjo, as condições de dissipação de calor são bem menos severa que a condição real nos pára-raios, uma vez que aqui, o bloco tem contato direto com o meio ambiente, além de se ter uma base de alumínio.

3.5 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Os ensaios foram executados em uma sala com controles de temperatura e umidade relativa do ar, através de aparelhos de ar condicionado e desumidificador. As condições ambientais médias de temperatura e umidade foram mantidas em

22°C e 65 %, respectivamente.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Os resistores não-lineares a base de óxido de zinco surgiram há algum tempo. Entretanto, seu uso como elemento válvula em pára-raios sem centelhadores é bem recente. Pesquisas nos elementos de óxido de zinco têm sido desenvolvidas em diversos países, mas não existe ainda nenhuma teoria reconhecida sobre o processo de degradação da característica V-I na região de baixa corrente.

Para o estudo do elemento de óxido de zinco, na região de baixa corrente, é necessário, inicialmente, ter condições de medir a corrente de fuga resistiva. Há diversos métodos de medição propostos, como dito anteriormente, mas, o mais usado, tem sido o convencional. Entretanto, este método não é muito adequado para investigações no campo, o que tem sido motivo de diversas pesquisas no sentido de encontrar um que seja apto para esta finalidade. Recentemente foi proposto o método de compensação por atenuador, o qual se prestaria melhor para este tipo de serviço. Investigações no sentido de verificar a compatibilidade deste método proposto e o método convencional foi uma das propostas deste trabalho.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Os resistores não-lineares a base de óxido de zinco surgiram há algum tempo. Entretanto, seu uso como elemento válvula em pára-raios sem centelhadores é bem recente. Pesquisas nos elementos de óxido de zinco têm sido desenvolvidas em diversos países, mas não existe ainda nenhuma teoria reconhecida sobre o processo de degradação da característica V-I na região de baixa corrente.

Para o estudo do elemento de óxido de zinco, na região de baixa corrente, é necessário, inicialmente, ter condições de medir a corrente de fuga resistiva. Há diversos métodos de medição propostos, como dito anteriormente, mas, o mais usado, tem sido o convencional. Entretanto, este método não é muito adequado para investigações no campo, o que tem sido motivo de diversas pesquisas no sentido de encontrar um que seja apto para esta finalidade. Recentemente foi proposto o método de compensação por atenuador, o qual se prestaria melhor para este tipo de serviço. Investigações no sentido de verificar a compatibilidade deste método proposto e o método convencional foi uma das propostas deste trabalho.

Desejando estudar o processo de estabilização térmica do elemento de óxido de zinco, em termos de parâmetros elétricos, e ainda determinar um limite crítico do número de impulsos que poderiam levá-lo a ruptura, inicialmente, o bloco foi submetido a impulsos de corrente de 20 KA e forma de onda de 8/20 μ s como forma de aquecimento, por ser esta uma das formas de aquecimento mais próxima da real. Em adição, a tensão ca aplicada, antes e após os impulsos, foi escolhida 75 % de V_c (Tensão de operação contínua) pois, como se sabe, é na região de menor corrente que a dependência da temperatura é mais acentuada.

Desejando ainda estudar o comportamento da característica V-I e a degradação do elemento de óxido de zinco, na região de baixa corrente, utilizou-se um outro bloco, com corrente de descarga nominal de 10 KA, o qual foi submetido a impulsos de corrente, com valor de pico e forma de onda semelhantes ao caso anterior, seguindo a recomendação mais severa da IEC, para ensaio de tensão residual com impulso atmosférico [13].

4.2 - PROCEDIMENTO

4.2.1 - Referente aos Métodos de Medição

Objetivando verificar a compatibilidade entre os métodos convencional [6] e compensação por atenuador [10], nas medições da corrente de fuga resistiva, fêz-se medições e um programa computacional que calcula a corrente pelos dois métodos, quando o coeficiente não-linear e a tensão aplicada

em funções do tempo são dados.

4.2.2 - Referente aos Elementos de Óxido de Zinco

Nas experiências feitas com os blocos de óxido de zinco foram adotados dois procedimentos distintos em dois blocos de diferentes diâmetros e idênticas espessuras. Utilizou-se o método convencional na medição da corrente de fuga resistiva.

4.2.2.1 - Processo de estabilização térmica

Procurando verificar o processo de estabilização térmica em termos dos parâmetros elétricos tensão e corrente, e ainda encontrar algum indicativo da periculosidade de ocorrência de ruptura, utilizou-se o bloco de óxido de zinco, de menor diâmetro, colocado internamente ao arranjo fechado descrito na seção 3.3.

Inicialmente, mediu-se as correntes de fuga resistiva e total para 75 % de V_c (V_c é a tensão de operação em regime contínuo). Seguindo a estas medições preliminares, o circuito foi desligado diretamente da rede, mantendo os ajustes inalterados. Posteriormente, desconectou-se a amostra do circuito de tensão alternada e conectou-a ao circuito de geração de impulsos de corrente. Aplicou-se, então, esforços de corrente divididos em grupos de $N=10, 30, 50, 70, 100$ e $150(18)$ impulsos de corrente, com valor de pico de 20 KA , forma de onda padronizada de $8/20 \mu\text{s}$, ocorrendo ruptura do bloco no décimo oitavo (18º) impulso do VI grupo ($N = 150$). Imediatamente após o término da aplicação dos esforços cor-

respondentes ao grupo, a amostra foi desconectada do circuto do gerador e ligada ao circuito de tensão alternada. O tempo médio gasto para esta operação foi de aproximadamente um (01) minuto. O circuito de tensão alternada foi energizado e as medições das correntes de fuga resistiva e total foram feitas por um período de sessenta (60) minutos.

4.2.2.2 - Degradação e alterações da característica V-I

Desejando observar o comportamento do bloco quando submetido aos esforços de corrente, para a região de baixa corrente da característica V-I, utilizou-se o bloco de 74,6 mm de diâmetro colocado em um arranjo aberto, base de alumínio, como descrito na seção 3.3.

Primeiramente, fêz-se as medições das correntes de fuga resistiva e total para a região de baixa corrente da característica V-I. Em seguida, a amostra foi conectada ao circuito do gerador de impulsos de corrente. Os impulsos aplicados foram de valor de pico e forma de onda semelhante ao caso anterior, divididos em grupos de $N=10, 30, 50, 70$ e 150 impulsos. Imediatamente após o último impulso de cada grupo, a amostra foi desconectada do circuito do gerador e conectada no circuito de tensão alternada. Fêz-se, então, medições das correntes para valores de tensão que variavam de zero até o valor de tensão correspondente a corrente de fuga resistiva de um miliampère (\tilde{V}_{1ma}). O tempo gasto para efetuar estas medições foi minimizado de maneira que a variação da temperatura do bloco durante a efetuação das mesmas pode ser

considerado desprezível.

4.3 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

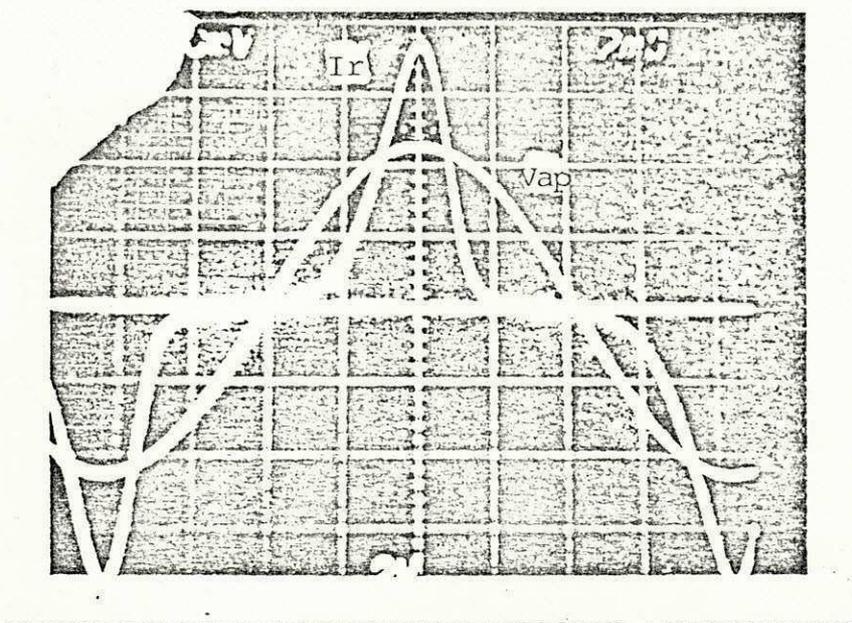
4.3.1 - Compatibilidade dos Métodos de Medição Convencional e Compensação por Atenuador

O cálculo da resposta dos métodos de medição da corrente de fuga resistiva, dos pára-raios de óxido de zinco, com tensão aplicada v_a , é possível utilizando-se a equação empírica

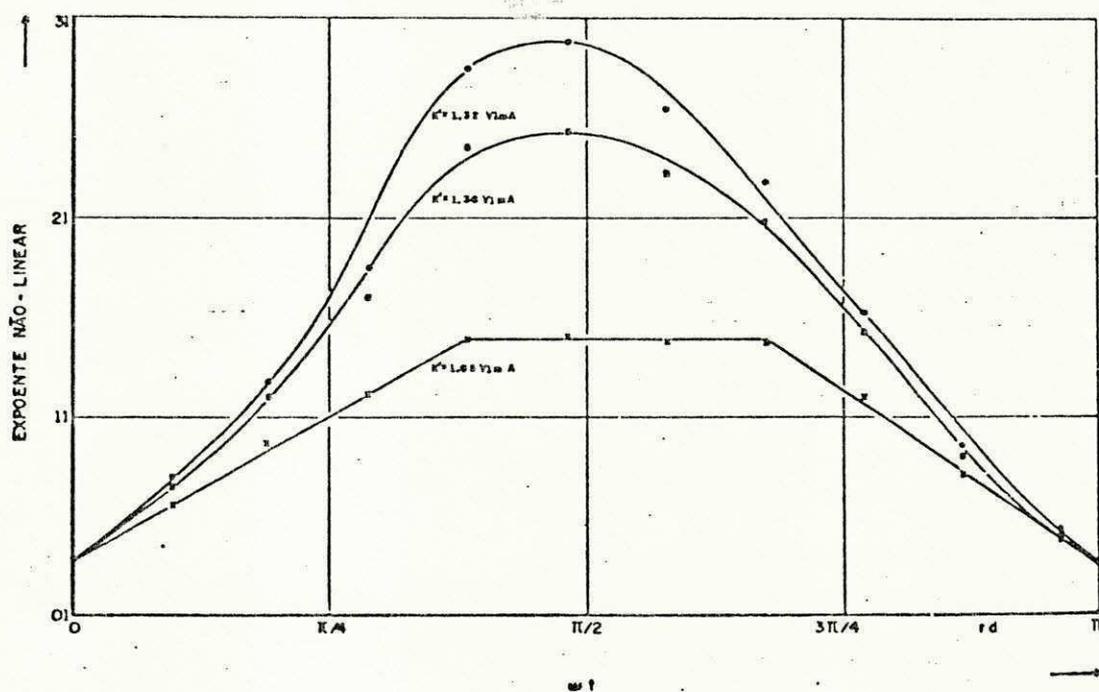
$$I = \left(\frac{V}{K'}\right)^{\alpha'} , \quad (14)$$

se o expoente não-linear é conhecido para todos valores de "V". Sendo a tensão aplicada senoidal, portanto periódica, o coeficiente não-linear, função da tensão aplicada, também deverá ser periódico. Assim, para cada mudança da amplitude da tensão aplicada, deverá ser conhecido o coeficiente não-linear.

Objetivando comparar as respostas dos métodos convencional e compensação por atenuador, inicialmente fotografamos a forma da onda da corrente de fuga resistiva e da tensão aplicada, obtida utilizando o método convencional, mostrada na figura 31(A). Tomando-se os valores correspondentes da tensão e corrente de fuga resistiva, em dez pontos igualmente espaçados em um semi-ciclo, calculou-se o correspondente valor do coeficiente não-linear, para diversas constantes correspondentes à resistência do bloco (K' - na fórmula



(A)



(B)

Fig. 31 (A) = Tensão aplicada e corrente de fuga resistiva pelo método convencional

(B) = Expoente não-linear em função do ângulo, calculado para os valores da Figura (A), para três diferentes constantes K' .

la empírica), pela fórmula abaixo, deduzida da fórmula 14,

$$\alpha' = \frac{\log_{10} I}{\log_{10} (V/K')} \quad (15)$$

Após, traçou-se as curvas do coeficiente não-linear em função do tempo, mostrado na figura 31(B), com os pontos calculados.

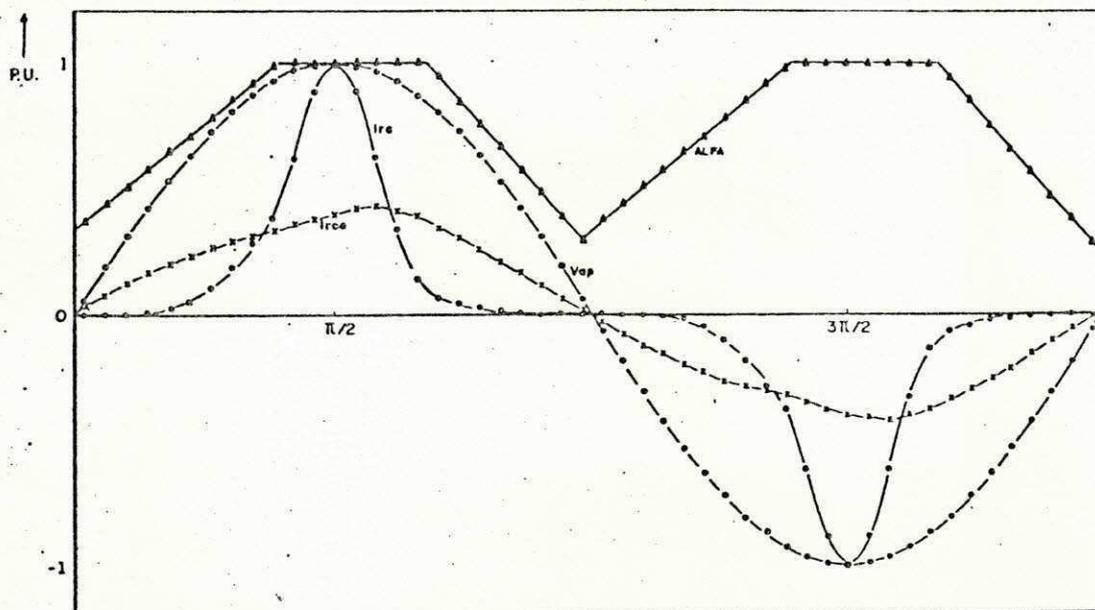
Como pode ser verificado, para a constante K' tomada igual a $1.65 V_{1ma}$, foi possível aproximar o expoente não-linear em função do tempo por três retas, em três regiões distintas. Estendendo esta curva para o ciclo completo, foi possível então calcular a resposta do método de compensação por atenuador juntamente com a resposta do método convencional, mostrado na figura 32.

Comparando o resultado obtido computacionalmente com aquele anteriormente medido, para o método convencional, verifica-se um erro de aproximadamente 6%, o qual foi assumido satisfatório. Comparando agora os resultados calculados para os dois métodos, verifica-se que há uma nítida diferença na forma de onda da corrente de fuga resistiva, calculada para o método de compensação por atenuador em relação a aquela obtida pelo método convencional.

Posteriormente, para confirmar na prática os resultados obtidos computacionalmente, fotografou-se as formas de ondas da tensão aplicada e da corrente de fuga resistiva para cada um dos métodos, mostrados na Figura 33.

Pode ser verificado, comparando figuras 33 e 32, a semelhança das curvas calculadas e medidas. Portanto, consta-

ta-se que o método de compensação por atenuador apresenta-se com limitações na medição da corrente de fuga resistiva em pára-raios de óxido de zinco.

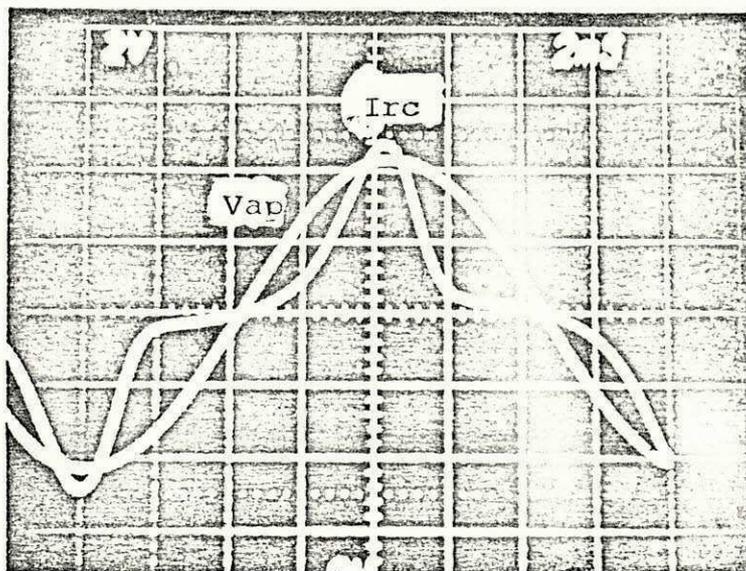


Valores Base

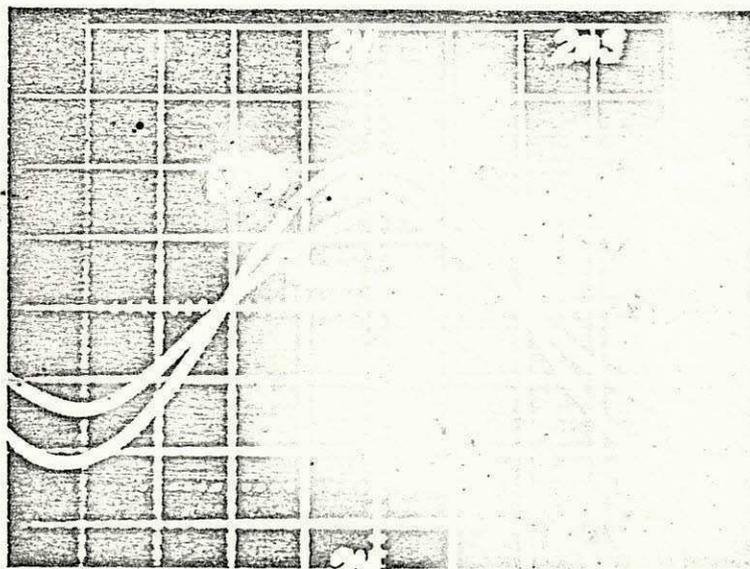
Tensão base = 4500 V
 Corrente base = 1402 μ A
 Coeficiente base = 14.857

Fig. 32 - Resultados Calculados

Vap = Tensão aplicada
 ALFA = Expoente não-linear
 Irc = Corrente de fuga resistiva pelo método convencional
 Irca = Corrente de fuga resistiva pelo método de compensação por atenuador.



(A)



(B)

Fig. 33 - Resultados Medidos

A = Método convencional

B = Método compensação por atenuador

Vap = Tensão aplicada

Irc = Corrente de fuga resistiva - Método convencional

Irca = Corrente de fuga resistiva - Método compensação por atenuador.

4.3.2 - Resultados Experimentais

Os resultados foram obtidos utilizando-se, como amostras, dois blocos de óxido de zinco novos, com 47,8 e 74,6mm de diâmetro por 23,1 mm de espessura, os quais foram esforçados com impulsos de corrente de polaridade negativa, de forma de onda e valor de pico mencionados anteriormente, espaçados de noventa (90) segundos.

4.3.2.1 - Bloco de menor diâmetro - Arranjo encapsulado

As medições das correntes de fuga resistiva e total, feitas após o bloco ter sido aquecido pelos esforços de corrente, tiveram a tensão aplicada variando segundo as curvas apresentadas para cada grupo de impulsos na Figura 34.

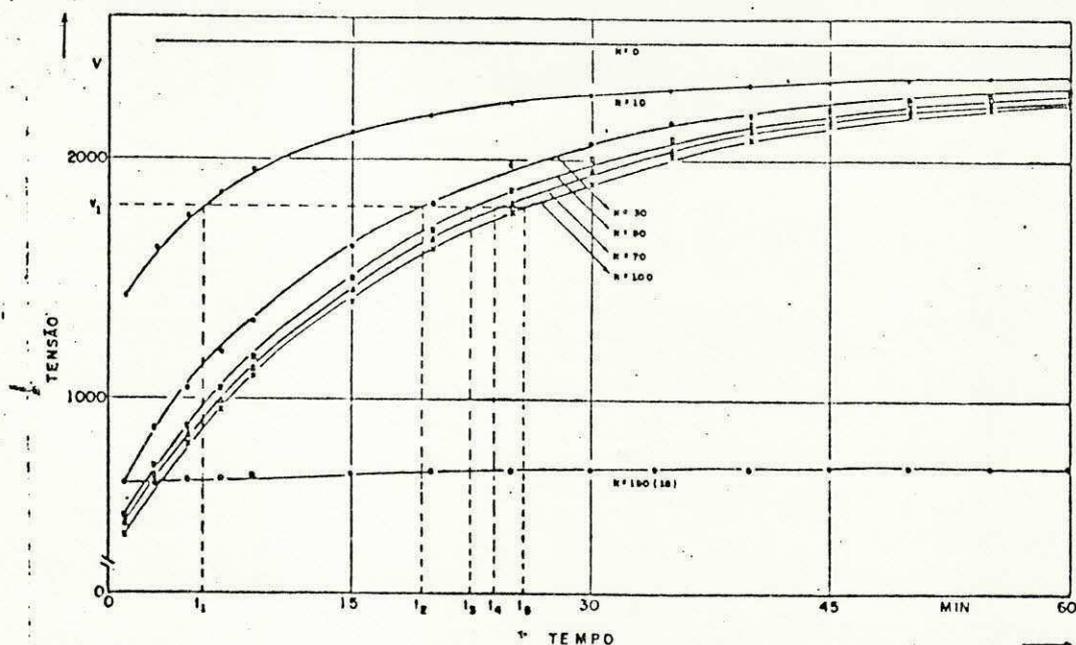


Fig. 34 - Característica tensão aplicada versus tempo antes e após esforços de corrente em grupos de N=10, 30, 50, 70, 100 e 150(18) impulsos de 20 KA - 8/20. μ s

Como pode ser verificado, embora os ajustes do circuito tenham sido mantidos contantes, a tensão aplicada à amostra teve significativa variação de valores. Nos instantes iniciais, que se seguiram à aplicação dos impulsos, a tensão aplicada ao bloco, medida através do voltímetro de pico, teve seu valor reduzido. Porém, à medida que passava o tempo, esta tensão foi aumentando, e decorrido o período de observação, seu valor aproximou-se daquele obtido anteriormente à aplicação dos impulsos de corrente, exceto para a curva obtida após ocorrência de ruptura do bloco, na qual o comportamento da tensão aplicada com o tempo manteve-se praticamente constante. Seu valor decresceu de aproximadamente três vezes e apresentou uma taxa de crescimento com o tempo muito pequena.

Este comportamento da tensão com o tempo pode ser explicado da seguinte maneira: O bloco, devido a absorção de energia, é aquecido sofrendo alteração de sua microestrutura. O coeficiente de temperatura negativo, característico do bloco de óxido de zinco na região de baixa corrente, é responsável por uma diminuição da sua resistência não-linear, levando a corrente de fuga resistiva a crescer. Porém, devido as características dos equipamentos utilizados (Apêndice A) - especificamente estabilizador, regulador de tensão e reatores - a potência do circuito ficou limitada à potência do estabilizador dividida pela relação de transformação do regulador, e a tensão fornecida aos terminais da amostra ficou limitada pela alta impedância dos reatores. Assim, o circuito não foi capaz de fornecer a corrente exigida pelo blo

co na tensão de 2450 V, conseqüentemente havendo uma redução da tensão. Através de uma figura esquemática da característica V-I do bloco de óxido de zinco, para temperaturas ambiente e a alcançada após os esforços, este fato pode ser melhor entendido (Figura 35).

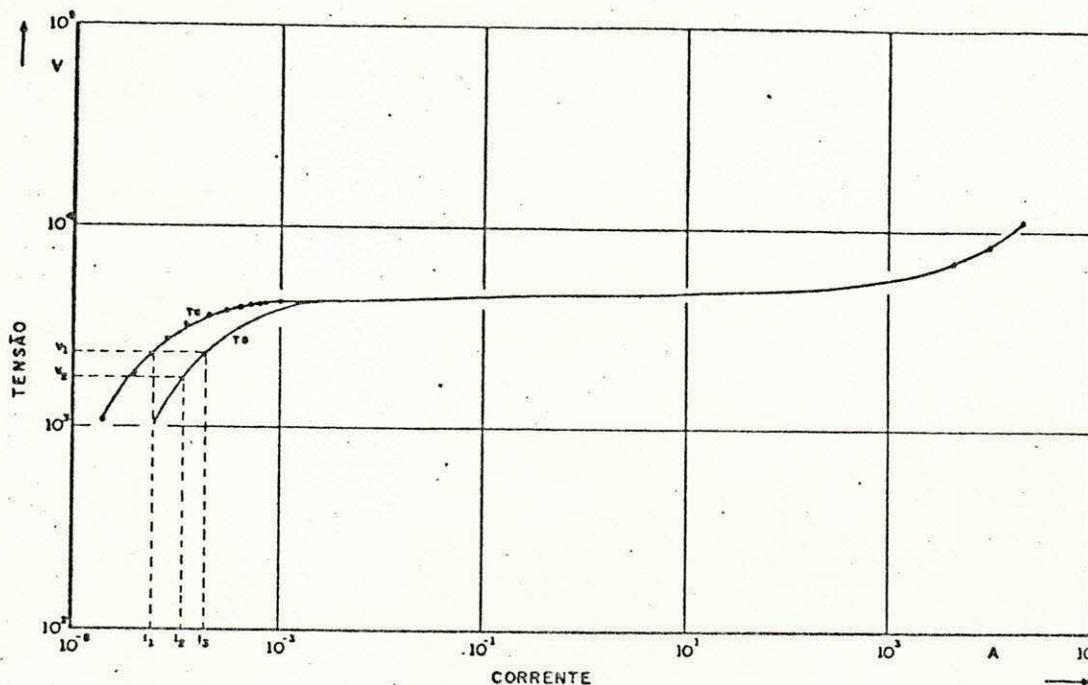


Fig. 35 - Diagrama esquemático da característica V-I

T_a = Temperatura ambiente

T_s = Temperatura após os esforços

$V_1(I_1)$ = Tensão (corrente) inicial

$V_2(I_2)$ = Tensão (corrente) após os esforços na temperatura T_s .

Para exemplificar, seja I_1 a corrente na tensão V_1 aplicada ao bloco, na temperatura ambiente (T_a). Submetendo o bloco aos esforços de corrente, a energia absorvida provoca uma elevação de temperatura do bloco de T_a para T_s . Con-

sequentemente, a corrente que deveria passar pelo bloco, na tensão V_1 , seria I_3 . Porém, o circuito é capaz de fornecer somente uma corrente igual a I_2 , cuja tensão correspondente na temperatura T_s é V_2 . Assim, há uma redução da tensão de V_1 para V_2 . Mas, à medida que o bloco se resfria, a tensão V_2 desloca-se no sentido de V_1 , alcançando este valor quando o bloco retorna a temperatura ambiente.

O comportamento da corrente de fuga resistiva, após os grupos de impulsos de corrente aplicados ao bloco de óxido de zinco, para um período de observação de sessenta (60) minutos, é apresentado na Figura 36.

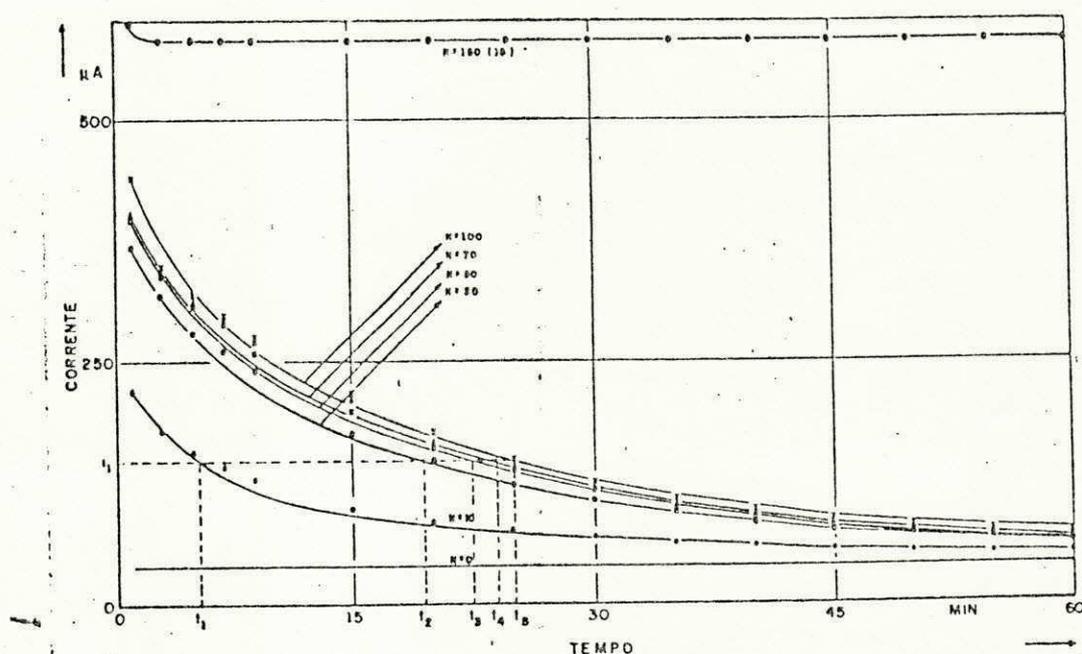


Fig. 36 - Característica da corrente de fuga resistiva versus tempo antes e após a aplicação de impulsos de corrente divididas em grupo de $N=10, 30, 50, 70, 100$ e $150(18)$ de $20 \text{ KA} - 8/20 \mu\text{s}$

Analizando-a, verifica-se que a corrente de fuga resistiva, inicialmente elevada, diminui gradualmente com o

tempo e que, decorrido o período de observação seu valor era próximo daquele obtido antes de submeter o bloco aos esforços ($N=0$). Entretanto, com a ocorrência de ruptura do bloco, este procedimento foi alterado, tendo a corrente permanecido praticamente constante durante todo o período observado.

Por outro lado, considerando-se as Figuras 34 e 36, verifica-se que a um determinado valor de tensão corresponde um valor de corrente comum a todas as curvas, porém, em tempos diferentes. Por exemplo, tomando a tensão na Figura 34 igual a V_1 , tem-se os tempos t_1 , t_2 , t_3 , t_4 e t_5 correspondentes às curvas para $N=10$, 30, 50, 70 e 100, respectivamente.

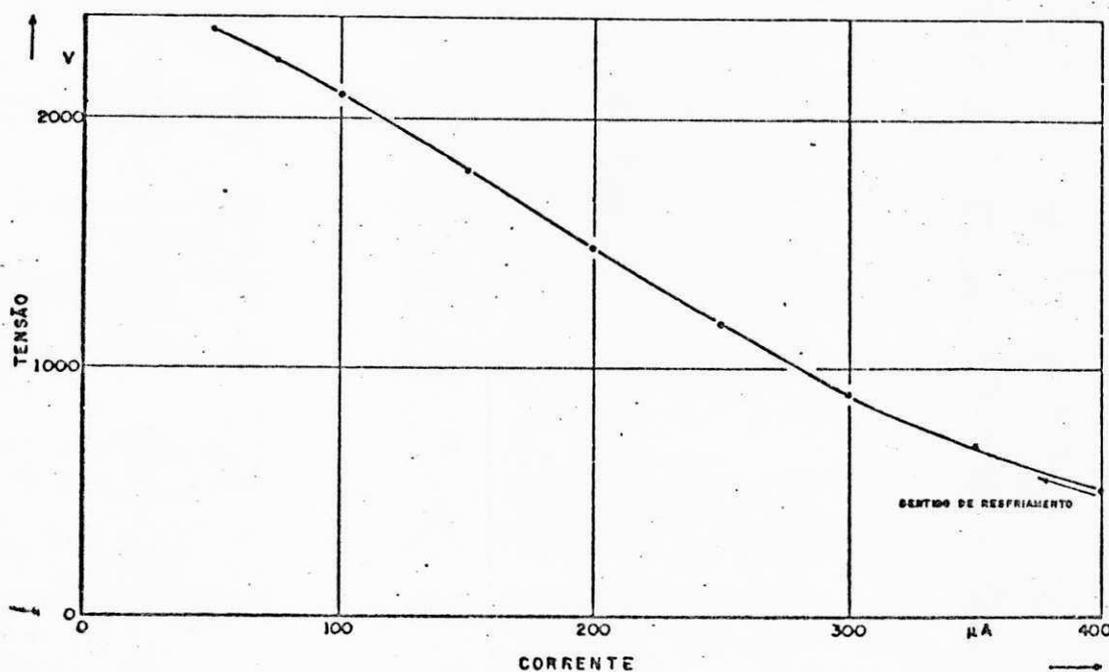


Fig. 37 - Característica V-I do bloco de óxido de zinco na região de tensão inferior a 2450 V: após esforços de corrente.

Tomando agora os valores de corrente na Figura 36 nas cur-

vas para $N=10, 30, 50, 70$ e 100 correspondente aos tempos t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5 , verifica-se que o valor de corrente é único. Isto significa que, para o valor de corrente ou tensão correspondente se tem um único valor de temperatura. Desta maneira, a característica V-I do bloco de óxido de zinco, na região de tensão inferior a 2450 V, pode ser traçada, Figura 37, onde cada ponto caracteriza uma temperatura.

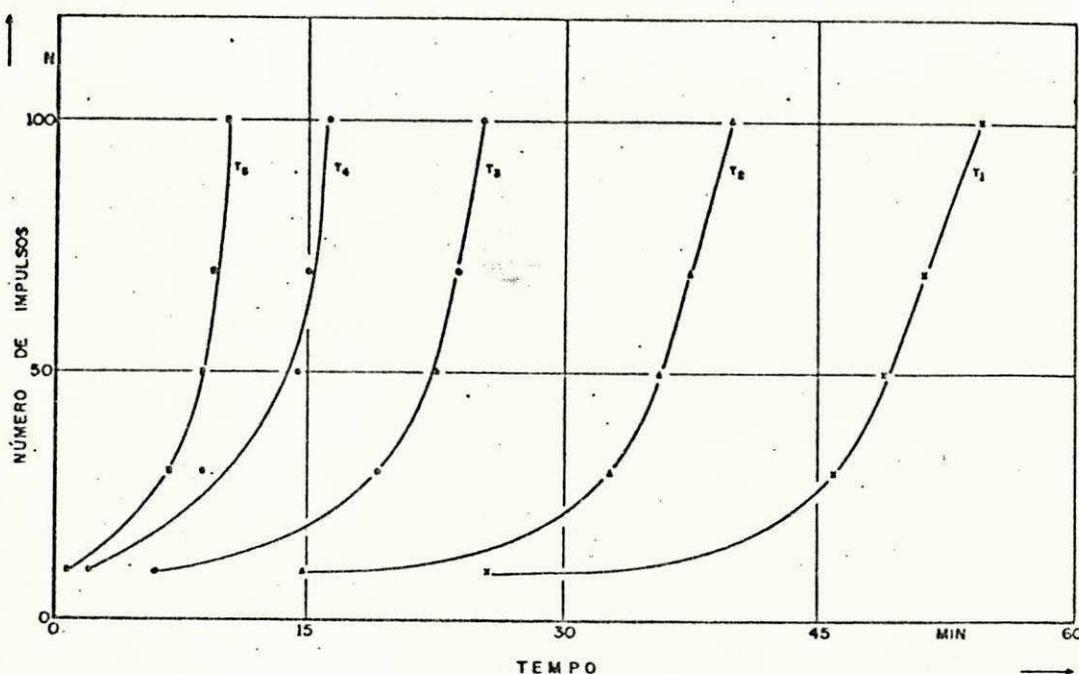


Fig. 38 - Comportamento de resfriamento do bloco de óxido de zinco em função do número de impulsos e do tempo. $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$

Seguindo este raciocínio, o comportamento de resfriamento do bloco de óxido de zinco após ser submetido aos esforços de corrente, pode ser traçado, Figura 38. Estas curvas dão o tempo que o bloco necessitou para resfriar a uma determinada temperatura, após ter sido aquecido pelos esfor

ços de corrente. Este tempo, logicamente, é dependente da temperatura alcançada pelo bloco, das condições de dissipação de calor e da tensão aplicada. Com relação as temperaturas apresentadas na Figura 37, deve ser dito que se tem somente a relação entre elas, pois, não foi feita medições de temperatura durante a experiência.

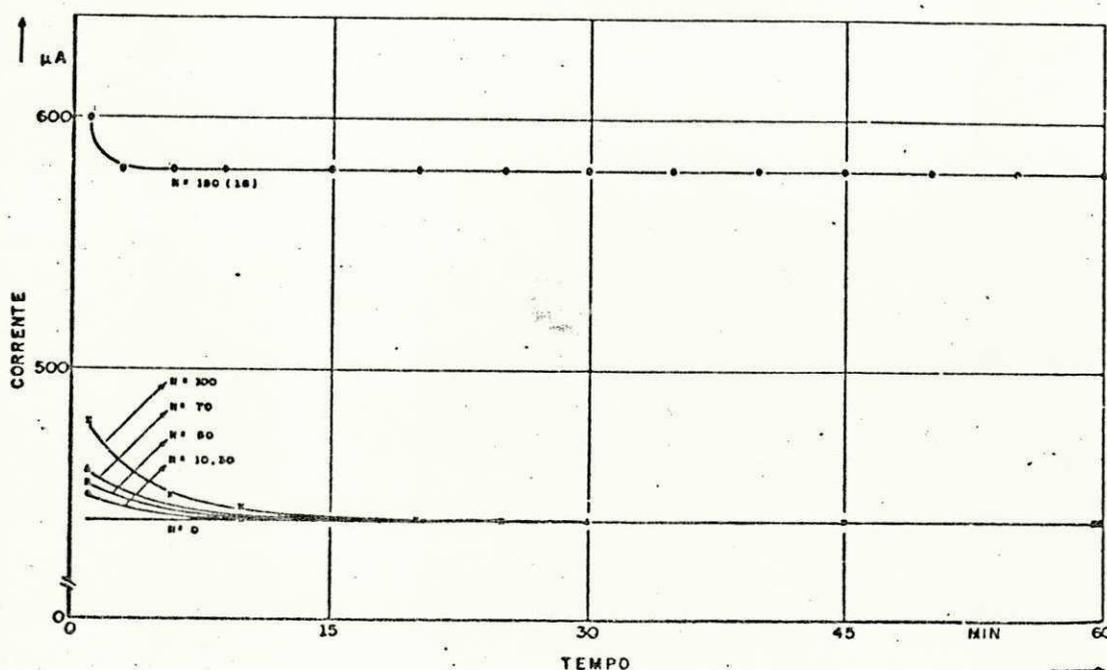


Fig. 39 - Característica corrente de fuga total versus tempo após impulsos de corrente divididos em grupos de $N=10, 30, 50, 70, 100$ e $150(18)$ de $20 \text{ KA} - 8/20 \mu\text{s}$.

A Figura 39 apresenta o comportamento da corrente de fuga total com o tempo, após aplicações de impulsos de corrente ao bloco encapsulado. Verifica-se um comportamento de crescente e que, no final do período observado todas as curvas convergem para um único valor, que é aquele obtido antes de sudmeter o bloco aos esforços. Percebe-se também, a

variação crescente da corrente total com o número de impulsos absorvidos. Quando a ruptura se fez presente, a corrente de fuga total, medida posteriormente, assumiu comportamento idêntico à corrente de fuga resistiva, ambas tendo praticamente o mesmo valor.

O procedimento da corrente total se explica pois, quando o bloco é aquecido devido aos esforços absorvidos, a corrente de fuga resistiva cresce exponencialmente com a temperatura (Efeito SCHOTTKY), fazendo com que a corrente total também se eleve, uma vez que ela é a soma das componentes resistiva e capacitiva.

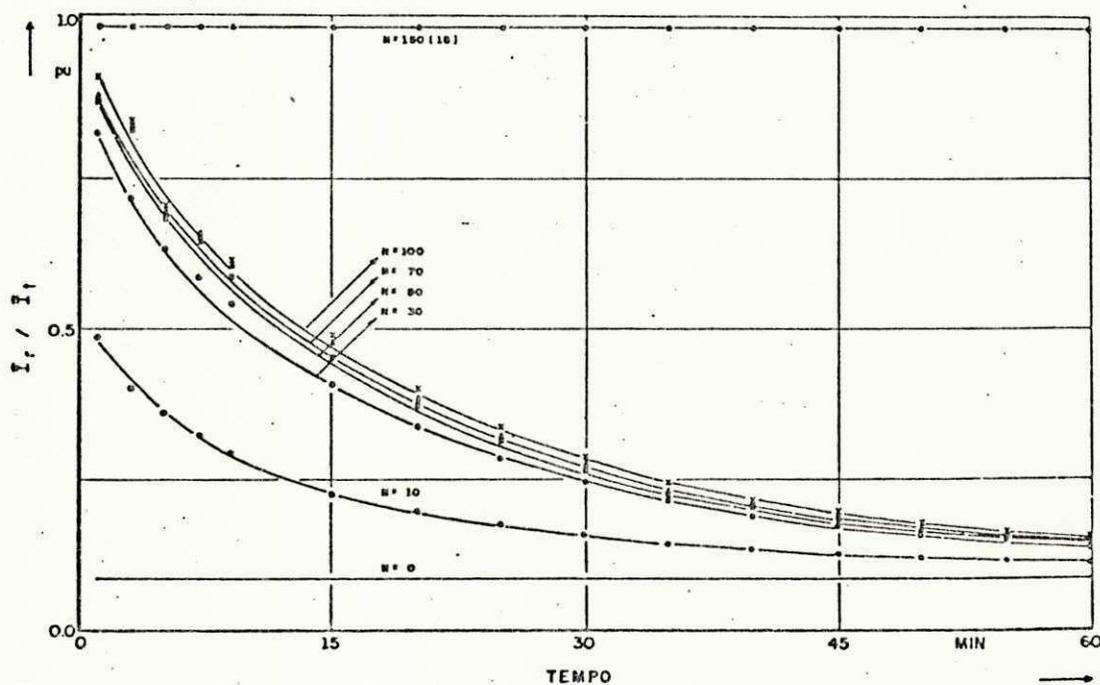


Fig. 40 - Característica relação corrente de fuga resistiva pela total versus tempo após impulsos de corrente divididos em grupos de $N=10, 30, 50, 70, 100$ e $150(18)$ de $20 \text{ KA} - 8/20 \mu\text{s}$.

A Figura 40 mostra o comportamento decrescente da re-

lação corrente de fuga resistiva pela total (\hat{I}_r/\hat{I}_t) com o tempo. No final do período observado, verifica-se a convergência das curvas para a relação \hat{I}_r/\hat{I}_t obtida antes do bloco ter sido submetido aos esforços ($N=0$), exceto quando a ruptura se fez presente, onde a relação \hat{I}_r/\hat{I}_t manteve-se praticamente igual a unidade. Assim, a tendência de aproximação da corrente de fuga resistiva da total é um indicativo do número de impulsos de corrente que foram aplicados sucessivamente ao bloco de óxido de zinco. Em adição, verifica-se que os esforços absorvidos pelo bloco de óxido de zinco não foram suficientes para submetê-lo a instabilidade térmica, uma vez que as correntes de fuga retornaram ao valor inicial, após o período observado.

Fixando o tempo e tomando a relação da corrente de fuga resistiva pela total (\hat{I}_r/\hat{I}_t) em função dos grupos de impulsos, mostrado na Figura 41, para tempos extremos e intermediário de observação, verifica-se um comportamento crescente da relação \hat{I}_r/\hat{I}_t , com a existência de três regiões distintas: (1) na região "A" a relação \hat{I}_r/\hat{I}_t apresenta-se com uma taxa de crescimento praticamente constante e elevada; (2) na região "B" há uma transição gradual da região "A" para a região "C", onde a taxa de crescimento da relação \hat{I}_r/\hat{I}_t decresce gradativamente; (3) na região "C" o crescimento da relação \hat{I}_r/\hat{I}_t é pouco influenciado com o aumento do número de impulsos em relação a região "A". Em adição a este comportamento, a ruptura do bloco de óxido de zinco se deu no décimo oitavo impulso (18º) do VI grupo ($N=150$), enquanto que em um outro bloco semelhante a este, com as mesmas di-

mensões, foi esforçado seguindo o mesmo roteiro, tendo sua ruptura ocorrido no vigéssimo oitavo (28º) impulso do IV grupo (N=70). Assim, a interseção das regiões "A" e "B" parece determinar um limite crítico, acima do qual, um bloco de óxido de zinco, que já tenha sofrido alguma degradação, considerando-se suas dimensões, corre sério risco de ruptura.

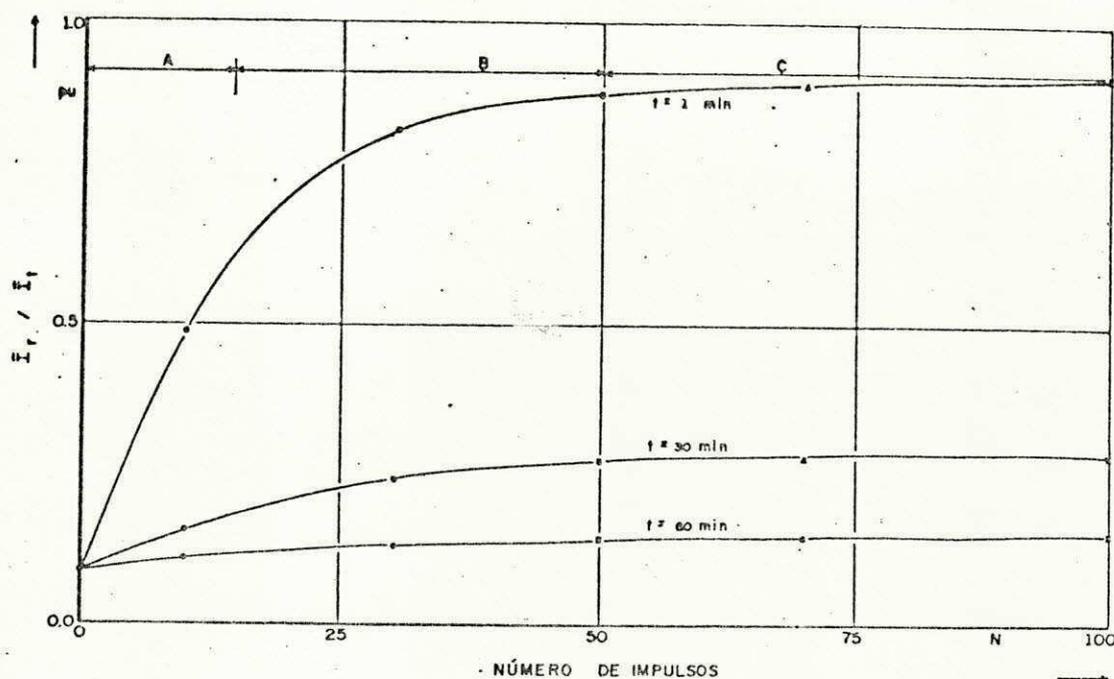


Fig. 41 - Característica relação corrente de fuga resistiva pela total versus número de impulsos, para os tempos extremos e intermediário de observação.

4.3.2.1.1 - Estudo do local de ruptura do bloco

Segundo KNECHT e MENTH [4], uma condição de distribuição uniforme da corrente sobre a superfície do bloco de óxido de zinco é que, para um dado caminho de corrente, leve

ao mesmo número de barrêiras isolantes. Obviamente, isto requer uma uniformidade dos grãos de óxido de zinco e da espesura das camadas intergranulares, o que realmente não ocorre. Assim, haverá uma distribuição não uniforme da corrente, ocorrendo pontos mais aquecidos que outros.

Objetivando mostrar que a danificação do bloco de óxido de zinco com a ocorrência de ruptura é localizada, devido a concentração de corrente em um determinado caminho, superaquecendo a microestrutura vizinha e danificando-a, seconou-se o bloco, retirando a parte danificada em duas etapas. Na primeira retirou-se somente o local carbonizado e na segunda retirou-se toda a região vizinha. Após cada etapa, o local foi recoberto com esmalte isolante, de modo a se evitar fuga de corrente pelo local, e o levantamento da sua característica força de campo elétrico - densidade de corrente (F-J) foi feito, mostrado na Figura 42. Conforme pode ser visto, a característica do elemento de óxido de zinco com toda a parte danificada e matéria vizinha retirada (curva B) mostra-se superior aquela obtida com somente a parte carbonizada retirada (curva A). Fixando a tensão naquela de operação contínua ($\sqrt{2} \times 4 \text{ KV}/\sqrt{3}$) tem-se para a curva "A" uma densidade de corrente de $47 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, enquanto para a curva "B" uma densidade de corrente de somente $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Desta maneira, mostra-se que a ruptura apresentou-se localizada, confirmando a teoria da existência de caminhos de corrente mais aquecidos que outros, devido a não uniformidade da distribuição da corrente |4, 9|.

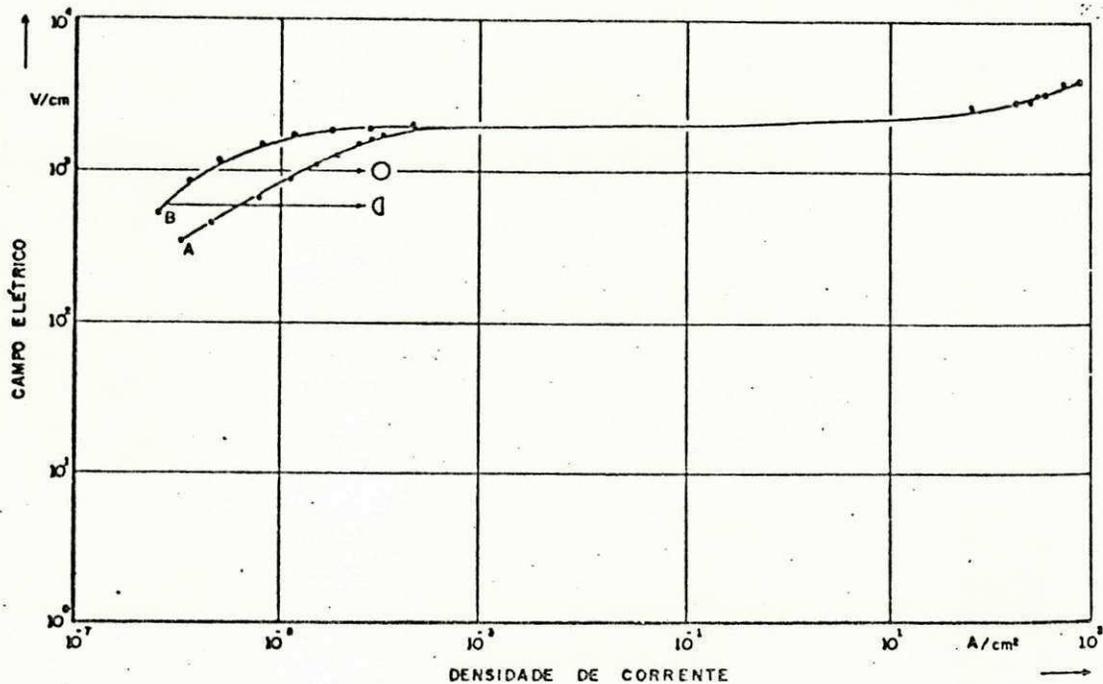


Fig. 42 - Característica força de campo elétrico versus densidade de corrente para o bloco danificado.

A = Somente camada carbonizada retirada.

B = Camada carbonizada e matéria vizinha retiradas.

4.3.2.2 - Bloco de maior diâmetro - Arranjo aberto

A característica V-I do bloco de óxido de zinco, à temperatura ambiente, é apresentada na Figura 43. A região de baixa corrente foi levantada através da aplicação de tensão ca com a respectiva medição da corrente de fuga resistiva. O levantamento da região de alta corrente foi feito com aplicação de impulsos de corrente, de polaridade negativa,

com valor de pico de 5-10 e 20 KA, com forma de onda padronizada de 8/20 μ s, sendo tomado os pontos de máximas tensão e corrente para cada impulso.

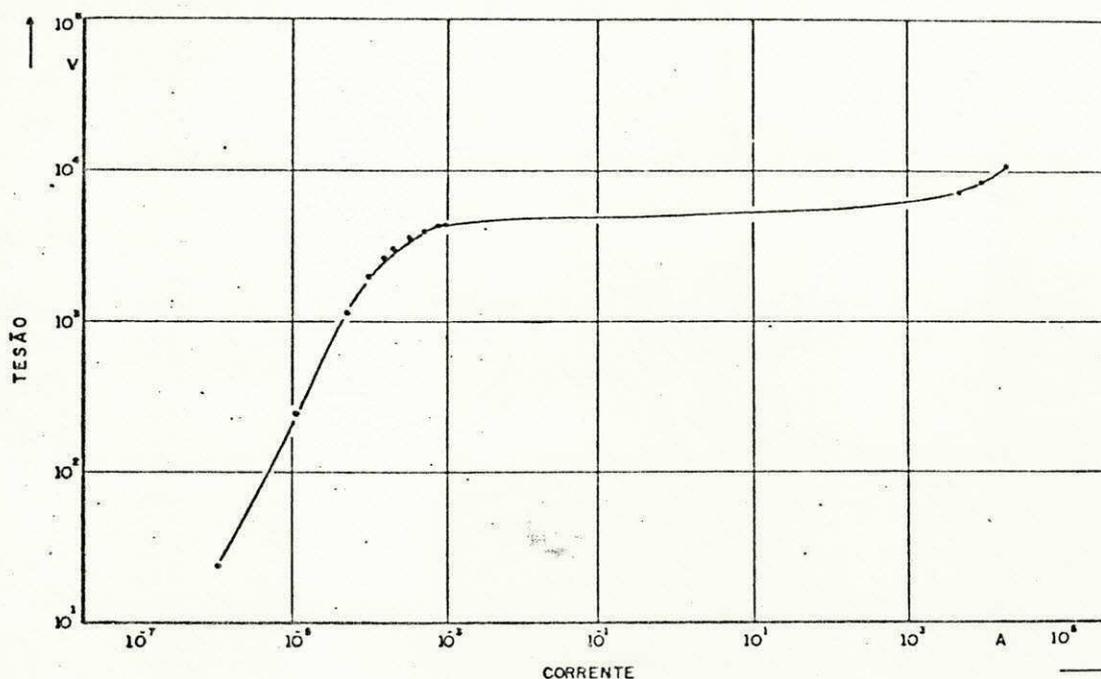


Fig. 43 - Característica V-I do bloco de óxido de zinco

Diâmetro = 74,6 mm

Espessura = 23,1 mm

Observando a característica V-I acima, nota-se quatro regiões distintas: (1) região linear ($I < 10^{-5}$ A) - o bloco tem um comportamento ôhmico; (2) região de baixa não-linearidade ($10^{-5} < I < 10^{-3}$ A) - local onde situa o ponto de operação dos para-raios em regime contínuo; (3) região de alta não-linearidade ($10^{-3} < I < 10^3$ A) - local onde se encontra os maiores valores do expoente não-linear; (4) região de "upturn" ($I > 10^3$ A) - local onde a característica é atri -

buída a resistência dos grãos de óxido de zinco.

Desejando verificar as alterações na característica V-I após a absorção de impulsos de corrente, o bloco de óxido de zinco foi submetido a impulsos com forma de onda, valor de pico e frequência de aplicação citados anteriormente. Os resultados são apresentados na Figura 44, mostrando somente uma porção da característica - região de baixa corrente - pois, como elas mesmas indicam, a mudança acima de 1mA é muito pequena.

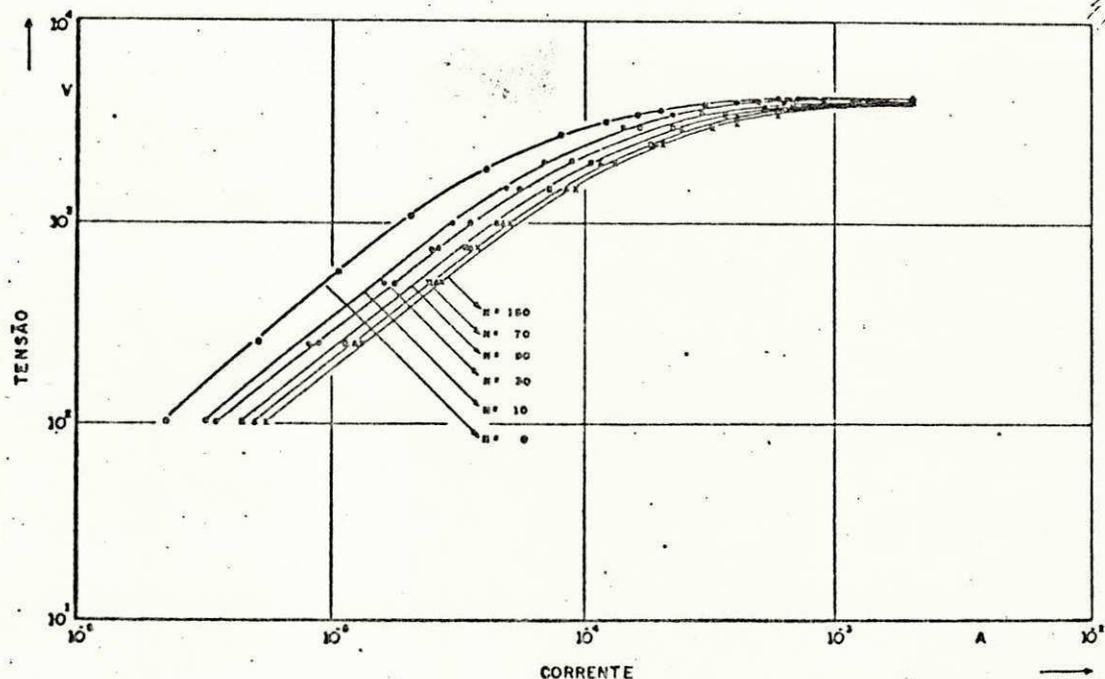


Fig. 44 - Alterações na região de baixa corrente da característica V-I, antes e após esforços de corrente divididos em grupos de $N=10, 30, 50, 70$ e 150 impulsos de $20 \text{ kA} - 8/20 \mu\text{s}$.

Analisando as curvas, verifica-se um deslocamento em um sentido no qual há um aumento da corrente à medida que o

número de impulsos absorvidos se eleva, conforme visto previamente [11]. Referindo à curva sob condição normal ($N=0$), com a tensão igual a de operação contínua ($\sqrt{2} \times 4 \text{ KV}/\sqrt{3}$), tem-se uma corrente de 120 μA , enquanto que, após 150 impulsos, a corrente de fuga resistiva aumentou para 417 μA . Nestas condições, pode-se estimar que as perdas aumentaram de 0,15 para 0,5 watt, aproximadamente. Desta maneira, avaria térmica e eventual fuga não são esperadas.

A Figura 45 mostra o comportamento da relação das correntes de fuga resistiva pela total (\hat{I}_r/\hat{I}_t) em função da relação de tensão aplicada ($\hat{V}/\hat{V}_{1\text{ma}}$), para diversos grupos de impulsos de corrente aplicados ao bloco. ($\hat{V}_{1\text{ma}}$ é definido como a tensão correspondente a corrente de fuga resistiva de um miliampère. Pela Figura 43 verifica-se que $\hat{V}_{1\text{ma}} = 4250 \text{ V}$).

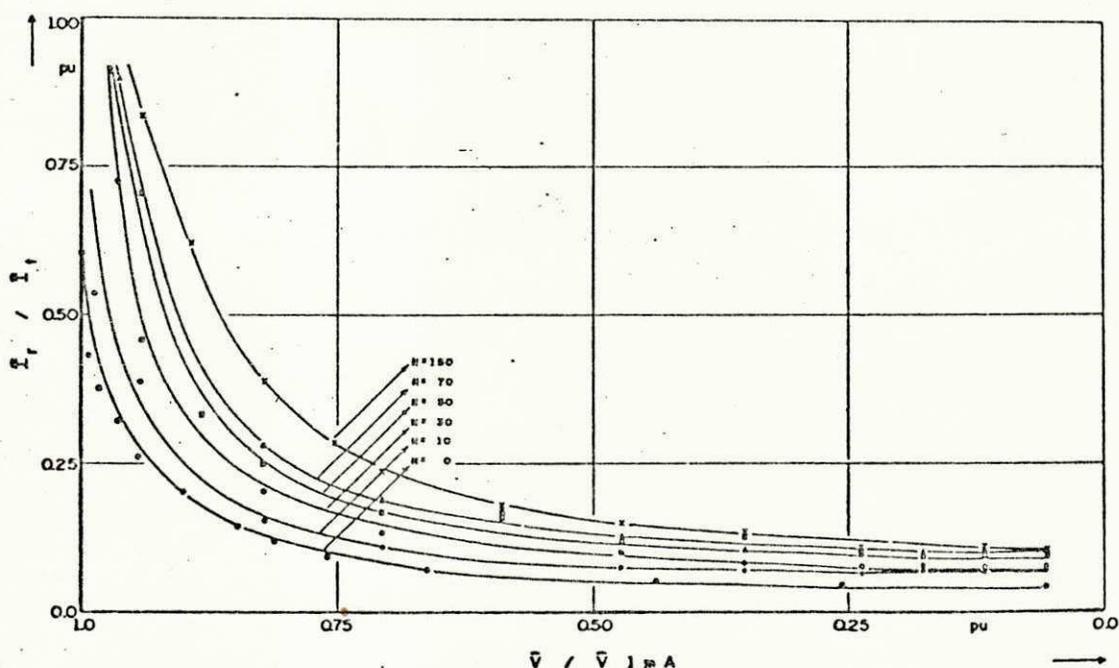


Fig. 45 - Característica relação corrente de fuga resistiva versus relação de tensão aplicada ($\hat{V}/\hat{V}_{1\text{ma}}$) após esforços de corrente aplicados em grupos de $N=10, 30, 50, 70$ e 150 impulsos de $20 \text{ KA}-8/20 \mu\text{s}$.

Os resultados mostram que há um crescimento da relação de corrente de fuga resistiva pela total (\hat{I}_r/\hat{I}_t) com a elevação da relação de tensão aplicada. Sendo este crescimento até uma relação de tensão aplicada de sessenta por cento ($\hat{V}/\hat{V}_{lma} \% = AVR = 60\%$) pouco significativo. Entretanto, quando esta relação se aproxima da unidade ($AVR \sim 100\%$), a relação das correntes (\hat{I}_r/\hat{I}_t) cresce exponencialmente. Por exemplo, referindo à curva com $N=150$, tem-se que a relação $\hat{I}_r/\hat{I}_t < 0,2$ para $\hat{V}/\hat{V}_{lma} = 0,6$. Enquanto que, para $\hat{V}/\hat{V}_{lma}=0,9$, a relação $\hat{I}_r/\hat{I}_t > 0,6$.

Observando agora a Figura 46, nota-se o crescimento da relação das correntes (\hat{I}_r/\hat{I}_t) com o número de impulsos absorvidos, para várias relações de tensão aplicada.

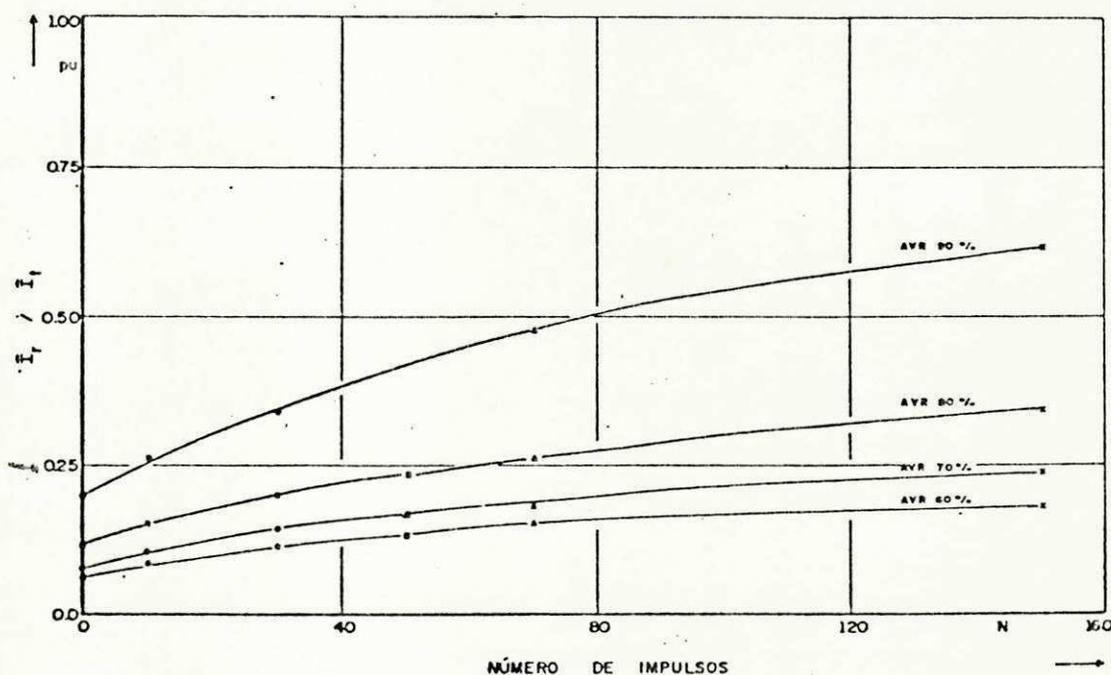


Fig. 46 - Característica relação corrente de fuga resistiva pela total versus número de impulsos para diversas relações de tensão aplicada (AVR)

Os resultados apresentados nas Figuras 45 e 46 mostram a importância de definição de uma relação de tensão de operação contínua, na qual, os riscos de ocorrência de instabilidade térmica são minimizados. Uma menor relação de tensão de operação contínua leva a uma menor corrente de fuga resistiva fluindo pelo bloco, resultando em menor temperatura de operação. Conseqüentemente, o bloco poderá absorver uma maior quantidade de energia sem o risco de instabilidade térmica. Em adição, haverá uma menor degradação das características do elemento de óxido de zinco, e desta maneira, uma longa vida é esperada. Mas, por outro lado, uma menor relação de tensão de operação leva a uma elevação do nível de proteção, e assim, um nível de isolamento mais alto é requerido.

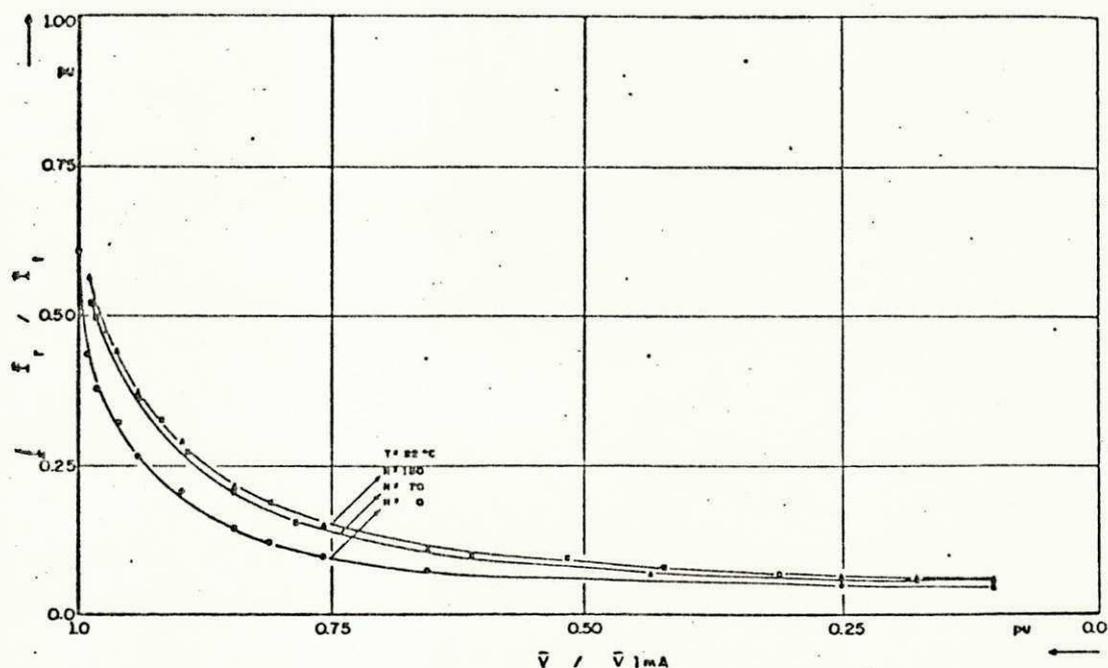


Fig. 47 - Característica relação da corrente de fuga resistiva pela total versus relação de tensão aplicada (\bar{V} / \bar{V}_{1mA}) na temperatura ambiente.

Finalmente a Figura 47 apresenta a relação das correntes de fuga (\hat{I}_r/\hat{I}_t) em função da relação de tensão aplicada (\hat{V}/\hat{V}_{1ma}), à temperatura ambiente, antes e após o bloco de óxido de zinco ser submetido aos esforços de corrente.

Os resultados mostram nitidamente a degradação do bloco à medida que o mesmo foi sendo esforçado. Verifica-se, para uma dada tensão de operação, que há uma elevação da corrente de fuga resistiva em relação a total com a evolução do processo de degradação. Este efeito se traduz num aumento das perdas através da resistência não-linear, aumentando a temperatura de operação contínua, que, por sua vez, facilita a ocorrência de instabilidade térmica devido a absorção de um surto de alta energia, ou em última análise, leva a uma diminuição da sua vida, devido a aceleração da reação química irreversível pelo aumento da temperatura [12].

CAPÍTULO V

C O N C L U S Ã O

Neste trabalho foram desenvolvidos estudos de comportamento dos elementos de óxido de zinco, quando submetidos a impulsos de corrente, relacionados ao processo de estabilização térmica e alterações na característica V-I, na região de baixa corrente. Em adição, verificou-se a compatibilidade dos métodos de medição convencional e compensação por atenuador, na medição da corrente de fuga resistiva.

Os resultados relacionados aos métodos de medição obtidos computacionalmente e através de medições, mostraram que o método compensação por atenuador apresenta-se com limitações na medição da corrente de fuga resistiva. Em adição, verificou que deve se ter cuidado em medições com o método convencional, utilizando o circuito mostrado na Figura 23, na presença de harmônicos.

Os resultados referentes ao processo de estabilização térmica mostram que o bloco de óxido de zinco, em condição de dissipação de calor bastante severa, resfria à temperatura ambiente em um período que depende da energia absorvida, mas, próxima de sessenta minutos (Figura 36), com decaimento exponencial.

A tendência de aproximação da corrente de fuga resis-

tiva da total é um indicativo do número de impulsos de corrente que foram aplicados sucessivamente ao bloco de Óxido de zinco. Entretanto, verifica-se que os esforços absorvidos pelo bloco não foram suficientes para submetê-lo a instabilidade térmica, uma vez que as correntes de fuga retornaram ao valor inicial, após o período observado.

Na curva de \hat{I}_r/\hat{I}_t versus grupos de impulsos, verifica-se três regiões distintas. A interseção das regiões "A" e "B" (Figura 41) parece determinar um limite crítico, acima do qual, um bloco de óxido de zinco, que já tenha sofrido alguma degradação, corre sério risco de ruptura.

A ruptura do bloco de óxido de zinco se apresentou localizada, ou seja, sua característica FxJ não se alterou após a remoção da matéria comprometida.

Os resultados relacionados às alterações da característica $V-I$ mostram que, embora haja um deslocamento da característica $V-I$ do elemento de óxido de zinco, após a absorção de impulsos de corrente, num arranjo aberto, com o consequente aumento da corrente de fuga resistiva, o risco de avaria e fuga térmica são pouco prováveis, confirmando os dados de Bronikowski e Dupont [11].

Os resultados apresentados nas Figuras 45 e 46 mostram que a definição de uma relação de tensão aplicada ao bloco é de fundamental importância na minimização da ocorrência de instabilidade térmica.

Finalmente, o bloco de óxido de zinco, quando submetido a impulsos de corrente, sofre degradação de sua característica, onde há, em decorrência, uma elevação da corrente

de fuga resistiva. Este efeito se traduz no aumento das perdas através da resistência não-linear por efeito Joule, elevando a temperatura de operação contínua do bloco de óxido de zinco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01) BURGER, U. & KNECHT, B. Surge Arresters: Conventional Technology - Metal-Oxide Resistors. *Brown Boverly Review*, 66 1979 (11) 734-738.
- 02) NOWACKI, K. *Sobretensões e Coordenação de Isolamento*, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, Apostila de Curso.
- 03) SAKSHAUG, E. C.; KRESGE, J. S. & MISKE, J. A. Jr. A New Concept in Station Arrester Design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS 96 (2): 647-656, march/april 1977.
- 04) KNECHT, B. & MENTH, A. Zinc Oxide Based Non-linear Resistances. *Brown Boverly Review*, 66 1979 (11) 739-742.
- 05) LEVINSON, L. M. & PHILIPP, H. R. The Physics of Metal Oxide Varistors. *Journal of Applied Physics*, 46 (3) : 1332-1341, march 1975.
- 06) TOMINAGA, S.; Shibuya, Y; FUJIWARA, Y. & NITTA, T. Electrical Properties of Zinc Oxide Valve Element for a Surge Arrester. *IEEE PES Summer Meeting*, Los Angeles, CA, july 1978.
- 07) PHILIPP, H. R. & LEVINSON, L. M. High-temperature Behavior of ZnO - Based Ceramic Varistors. *Journal Applied Physics*, 50(1): 382-389, january 1979.
- 08) KNECHT, B. *Solid-state Arresters*. Brown, Boverly & Com -

pany, Ltd., Baden, Switzerland. Apresentado em Simpósio.

- 09) MIZUKOSHI, A.; OZAWA, J.; SHIRAKAWA, S. & NAKANO, K. *Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS 102(5): 1384-1390, may 1983*
- 10) DEEP, S. G.; MEIRA, U. R. & NOWACKI, K. *Measurement of Resistive Leakage Current of Metal-oxide Surge Arresters. International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, september 1983*
- 11) BRONIKOWSKI, R. J. & DUPONT, J. P. *Development and Testing of Move Arrester Elements. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 101(6): 1638-1642, june 1982*
- 12) TOMINAGA, S. & NAGAI, N. *Metal Oxide Surge Arresters. Mitsubishi Electric Advance: 49-51, march 1978*
- 13) INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION - TC 37: *Surge Arresters. Part 3: Metal Oxide Surge Arresters for a. c. Systems, september 1981, 1-40.*
- 14) OYAMA, M.; OHSHIMA, I.; HONDA, M.; YAMASHITA, M. & KOJIMA, S. *Life Performance of Zinc-oxide Elements Under DC Voltage. IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, PAS 101(6): 1363-1368, june 1982*
- 15) THIES, B. *Thermisches Verhalten von ZnO - Varistoren unter besonderer Berücksichtigung von Inhomogenitäten Tese de Doutorado, Aachen, 1984.*
- 16) KOBAYASHI, M.; MIZUNO, M.; AIZAWA, T.; HAYASHI, M. &

- MITANI, K. Development of Zinc-oxide Non-linear Resistors and their Applications to Gapless Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS 97(4): 1149-1158, july/aug 1978.
- 17) MILLMAN, J. & HALKIAS, C. C. *Eletrônica Dispositivos e Circuitos*, vol. 2, McGraw Hill do Brasil, 1981. p. 785-792.
- 18) SATO, K.; TAKADA, Y.; MAEKAWA, H.; OTOTAKE, M. & TOMINAGA, S. Electrical Conduction of ZnO Varistors under Continuous DC Stress. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(5): 909-907, may 1980.
- 19) EDA, K. Conduction Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramics. *Journal of Applied Physics*, 49(5): 2964-2972, may 1978.

APÊNDICE A

CARACTERÍSTICA DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

1) CIRCUITO DE GERAÇÃO DE IMPULSOS DE CORRENTE

A) Gerador

Haefely

100 KV - 50 KJ

B) Osciloscópio

Haefely

Impulse Oscilloscope

Type 721

C) Mesa de Controle

I) Módulo de medição

Haefely

Impulso teste set

Metering module

Type 10

II) Módulo de Controle

Haefely

Impulse test set

Control module

Type 221

III) Módulo de controle do trigatron

Haefely

Trigatron

type 94

IV) Módulo de medição de pico de tensão

Haefely

Impulse peak voltmeter

Type 64 M

D) Impressora

Haefely

Printer

Type 100

2) CIRCUITO DE TENSÃO ALTERNADA

A) Estabilizador de Tensão

Philips

Type DE 1402/12

Entrada $220 \pm 10 \%$

Saída $220 \pm 1 \%$

2.5 A 50/60 HZ 400 VA

B) Regulador de tensão

Sociedade Técnica Paulista

Tipo VTE 011
Entrada 0-380 V
Saída 0-400 V
I_{max} 15A KV_{max} 10 KV
60 HZ Trifásico

C) Reator

Philips
Type RVM 125 8 126
220 V 60 HZ 1.15 A
Cos γ 0.55

D) Transformador

Messwandler - Bau GmbH Gallspach
Form TEO 100/10
Entrada 0.22 (2 x 0.22) KV 22.7 (2 x 11.4) A
Saída 100 KV
5 KVA 50 HZ X% 4%

E) Ponta de Prova

Tektronix
P 6015 1000 X
20 KV_{max} cont.
40 KV peak pulse

F) Voltímetro Digital

Fluke
8022 B multimeter

G) Capacitor de Alta-tensão

Messwander - Bau GmbH Gallspach

100 KV 10.000 PF

H) Osciloscópio com Entrada Diferencial

Tektronix

Scope mobile

Type 203

US. panted D-192.792