

SANDRA ANDRÉA MEDEIROS LEITÃO

ESTUDO DA POLARIZAÇÃO ELÉTRICA RESIDUAL NOS RESISTORES
NÃO LINEARES À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO

Dissertação apresentada à Coordenação
de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento parcial às
exigências para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Edson Guedes da Costa

Sreeramulu Raghuram Naidu

Campina Grande - PB

Setembro de 1991

ESTUDO DA POLARIZAÇÃO RESIDUAL NOS
RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE
ÓXIDO DE ZINCO



L533e Leitao, Sandra Andrea Medeiros
 Estudo da polarizacao eletrica residual nos resistores
 nao lineares a base de oxido de zinco / Sandra Andrea
 Medeiros Leitao. - Campina Grande, 1991.
 133 f. : il.

 Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
 Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
 Tecnologia.

 1. Polarizacao Eletrica 2. Resistores Nao Lineares 3.
 Oxido de Zinco 4. Engenharia Eletrica 5. Dissertacao I.
 Costa, Edson Guedes, M.Sc. II. Naidu, Sreeramulu Raghuram,
 Dr. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande
 (PB) IV. Título

CDU 621.3.095.1(043)

ESTUDO DA POLARIZAÇÃO RESIDUAL NOS RESISTORES NÃO LINEARES
À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO

SANDRA ANDRÉA MEDEIROS LEITÃO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11.09.91

Edson Guedes da Costa.
EDSON GUEDES DA COSTA, Mestre, UFPB
Orientador

Sreeramulu Raghuram Naidu
SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.d., UFPB
Orientador

Ubirajara Rocha Meira
UBIRAJARA ROCHA MEIRA, Mestre, UFPB
Componente da Banca

Ruth Herta Goldschmidt
RUTH HERTA GOLDSCHMIDT A. KIMINAMI, Dra., UFSCar
Componente da Banca

Humberto Maribondo de Moraes
HUMBERTO MARIBONDO DE MORAES, Mestre, CHESF
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
SETEMBRO - 1991

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pela paciência e incentivo demonstrados.

Agradeço aos meus orientadores, pela experiência e conhecimentos postos a minha disposição.

Agradeço ao CEPEL, na pessoa do Eng^o Jorge Luiz de Franco, pela doação dos blocos de óxido de zinco utilizados na realização dos experimentos.

Agradeço ao Eng^o Marcus Vinícius Lia Fook, pela compreensão e incentivo.

Agradeço a todos os funcionários do Laboratório de Alta Tensão do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPB, pelo auxílio nas montagens experimentais.

Meu agradecimento especial ao Msc. Prof. Edson Guedes da Costa, pela dedicação e incentivo, que possibilitaram o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.

Agradeço, enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se o fenômeno da polarização elétrica residual nos resistores não lineares à base de óxido de zinco quando estressados com impulsos de corrente, e como esta polarização afeta o nível de proteção do pára-raios de ZnO. O pára-raios de ZnO consiste de resistores não lineares à base de óxido de zinco montados em série ou em combinação série-paralelo.

Para o estudo deste fenômeno realizou-se, inicialmente, ensaios de tangente de perdas, capacitância e descargas parciais em todos os resistores não lineares à base de óxido de zinco. Estes ensaios tiveram o objetivo de selecionar os resistores não lineares à base de ZnO com o padrão de qualidade necessário para o bom desempenho deste trabalho.

O estudo da polarização dos resistores não lineares à base de óxido de zinco foi analisado quando submetidos à impulsos de corrente, com forma de onda 8 / 20 us (padronização européia). Os impulsos de corrente foram obtidos através de um gerador de impulso HAEFELY tipo 221 - 100 KV, 100 KA.

Durante a realização do trabalho, os resistores não lineares à base de óxido de zinco (33 amostras), padrão internacional, foram submetidos às análises enumeradas a seguir:

1. Verificação do efeito da polarização com o tempo (07 amostras);
2. Verificação do efeito da temperatura na polarização/ despolarização (14 amostras);
3. Verificação do efeito da polarização com o tempo, com a tensão continuamente aplicada, e com a temperatura (02 amostras);
4. Verificação do efeito da polarização sobre a tensão residual nos resistores não lineares à base de ZnO (10 amostras).

Os resultados obtidos durante todo o procedimento experimental comprovam a existência da polarização elétrica residual nos resistores não lineares à base de óxido de zinco estressados com impulsos de corrente, bem como a sua diminuição com o tempo e com a tensão continuamente aplicada. Os resultados também mostram o comportamento da polarização com a temperatura e a influência no nível de proteção do pára-raios de ZnO.

SIMBOLOGIA

V_s	- tensão normal fase-fase
Z	- Impedância
Z_t	- impedância de surto da torre
Z_g	- impedância de surto dos cabos pára-raios
V_t	- tensão no topo da torre
I	- corrente
V	- tensão
V_m	- tensão resultante no cabo pára-raios
b	- coeficiente de refração
V_t'	- tensão na cadeia de isoladores
s	- desvio padrão
V_{ft}	- tensão normal fase-terra
V_{mx}	- valor de crista da sobretensão de manobra
N_p	- nível de proteção
N_i	- nível de isolamento
V_p	- tensão assegurada
K_s	- fator de sobretensão de manobra
V_r	- tensão residual
Z_0	- impedância de surto da linha
\bar{V}	- sobretensão
V_{ab}	- tensão nos terminais do pára-raios
V_a	- tensão de descarga do pára-raios
K_b	- constante dependente do material (SiC)
K_d	- constante dependente do material (ZnO)

- \mathcal{L} - coeficiente de não linearidade
- Cp - centelhadores principais
- Ca - centelhadores auxiliares
- Re - resistores lineares
- Ra - resistor não linear
- Rb - resistor não linear de bypass
- Is - corrente de controle
- B - bobina de sopro magnético
- E - gap principal
- Ia - corrente de surto
- Rs - resistência linear de equalização da tensão
- In - corrente subsequente
- Vl - tensão do gap
- VRa - tensão do resistor não linear
- d - tamanho médio do grão
- t - espessura da camada intergranular
- It - corrente total
- Ir - corrente ativa
- Ic - corrente capacitiva
- W - frequência angular
- T - temperatura
- Fb - campo elétrico
- ϵ_g - permeabilidade relativa do grão
- ϵ_0 - permeabilidade relativa do ar
- D - distância entre os eletrodos
- A - área dos eletrodos

I_0 - corrente inicial
 V_g - tensão no grão de ZnO
 N_g - número de grão de ZnO
 l_g - espessura da amostra
 R_t - resistência da barreira de Schottky
 C_t - capacitância da barreira de Schottky
 R_i - resistência da camada intergranular
 C_i - capacitância da camada intergranular
 C - capacitância
 R - resistência
 L - indutância
 R_d - resistência do circuito do gerador HAEFELY
 R_{sh} - resistor shunt
 I_{mcoV} - corrente na tensão de mcoV
 I_+ - corrente de polarização positiva
 I_- - corrente de polarização negativa

ÍNDICE

CAPÍTULO		PÁGINA
I	- INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	01
1.	Introdução	01
2.	Objetivos	02
II	- REVISÃO DA LITERATURA	03
1.	Coordenação de Isolamento	03
2.	Sobretensões	04
2.1.	Sobretensões Externas	04
2.2.	Sobretensões Externas quanto ao local de incidência	08
2.3.	Sobretensões Internas	13
3.	Aspectos Gerais e Critérios da Coordenação de Isolamento	14
4.	Pára-Raios Convencionais	23
5.	Pára-Raios de ZnO	27
6.	Resistores não Lineares à base de ZnO	30
6.1.	Microestrutura e Comportamento dos Resistores não Lineares à base de ZnO	34
6.2.	Mecanismos de Condução	41
6.3.	Degradação dos resistores não Lineares à base de ZnO	50

III	-	MATERIAIS E MÉTODOS	51
1.		Materiais	51
2.		Métodos	52
2.1.		Verificação do efeito da Polarização com o Tempo	56
2.2.		Verificação do efeito da Temperatura na Polarização / Despolarização	57
2.3.		Verificação do efeito da Polarização com o Tempo, com a Tensão continuamente aplicada, e com a Temperatura	59
2.4.		Verificação do efeito da Polarização sobre a Tensão Residual nos Resistores não lineares à base de ZnO	60
IV	-	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
1.		Verificação do efeito da Polarização com o Tempo	61
2.		Verificação do efeito da Temperatura na Polarização / Despolarização	70
3.		Verificação do efeito da Polarização com o Tempo, com a Tensão continuamente aplicada, e com a Temperatura	83
4.		Verificação do efeito da Polarização sobre a Tensão Residual nos Resistores não lineares à base de ZnO	90
V	-	CONCLUSÕES	97
VI	-	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
VII	-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

ANEXO A	103
	Circuito para Medição de Tangente de Perdas e Capacitância	103
ANEXO B	111
	Circuito para Medição de Descargas Parciais e Verificação de Polarização	111
1.	Calibração	121
1.1.	Calibração de Instrumentos de Medição de Carga Aparente, q (Indireta)	121
1.2.	Calibração do Instrumento no Circuito de Ensaio Completo (Direta)	121
ANEXO C	125
	Circuito para Geração / Medição de Impulsos de Corrente e Verificação de Tensão Residual	125
1.	Circuito RLC série	125
1.1.	Caso Subamortecido	125
1.2.	Caso Amortecimento Crítico	126
1.3.	Caso Superamortecido	126
2.	Determinação dos Elementos do Circuito de Impulso	126
3.	Cálculo dos Elementos do Circuito de Geração de Impulso	128

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de proteção eficaz contra sobretensões é o mais importante aspecto no projeto de um sistema elétrico. O pára-raios é um componente projetado para proteger os equipamentos elétricos dos grandes transitórios de tensão, limitando a tensão entre os terminais do equipamento protegido bem abaixo da tensão de ruptura e mantendo durante a sua operação uma tensão residual superior a tensão nominal de operação.

Antes de 1975, todos os pára-raios da distribuição, subtransmissão e transmissão utilizavam centelhadores (gaps) em série com o resistor não linear de carbeto de silício para assegurar a tensão limite necessária à proteção dos equipamentos elétricos. Para os dias atuais, os pára-raios à base de SiC têm seu comportamento tecnológico limitado devido a sua baixa não linearidade da curva $V \times I$.

A partir de 1970, os fabricantes de equipamentos elétricos têm melhorado a qualidade dos pára-raios com o uso de material baseado no óxido de zinco. Este material cerâmico apresenta um alto grau de não linearidade na característica $V \times I$. Inicialmente, a sua utilização ocorreu nos equipamentos eletrônicos, mas a sua capacidade de absorção de energia proporcionou o seu uso em sistemas elétricos de grande porte, como elementos ativos, isto é, sem a necessidade da utilização de centelhadores em série.

Os pára-raios à base de óxido de zinco, recentemente utilizados em substituição aos pára-raios convencionais, têm demonstrado desempenho aparentemente bem superior, embora todas as suas características ainda não sejam totalmente conhecidas.

Atualmente, no mundo, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para se conhecer melhor as suas propriedades elétricas, físicas, químicas e mecânicas.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho, tem por objetivo estudar o fenômeno da polarização elétrica nos resistores não lineares à base de óxido de zinco, individualizados.

Os pára-raios utilizados nos sistemas elétricos de potência compoem-se de associação série ou série-paralelo de resistores não lineares à base de óxido de zinco, mantendo as suas características de alta não linearidade, elevando a sua capacidade de absorção de potência e o nível de tensão operativa.

O fenômeno da polarização elétrica residual nos resistores não lineares à base de óxido de zinco foi analisado em relação as variáveis: tempo, temperatura, tensão continuamente aplicada, quantidade de impulsos e corrente total de fuga.

O objetivo maior na realização deste trabalho, foi o de relacionar a polarização residual dos resistores não lineares à base de óxido de zinco com a eficiência da proteção dos pára-raios de ZnO. A partir deste fato, como seria a influência da temperatura no nível de polarização do resistor não linear, bem como se comportaria o tempo como fator de despolarização, e se a aplicação continuamente da tensão afetaria uma despolarização mais rápida dos resistores não lineares à base de óxido de zinco, são questões básicas e pertinentes aos objetivos deste trabalho.

CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, descreve-se os tipos de sobretensões as quais estão sujeitos os sistemas elétricos de potência, bem como os critérios usados na Coordenação de Isolamento. Também disserta-se sobre os dispositivos de proteção, atualmente usados nos sistemas elétricos, quais sejam: Pára-Raios de Carbetto de Silício (SiC) e Pára-Raios de óxido de Zinco (ZnO).

1. COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

A função das linhas de transmissão e das redes de distribuição de energia elétrica, é fornecer permanentemente aos usuários a energia elétrica a uma tensão que permaneça com valor o mais próximo possível do nominal prefixado. Contudo, os sistemas elétricos de potência estão submetidos, frequentemente, a sobretensões de origem externa e interna, que, apesar de não poderem ser evitadas totalmente, podem ter suas amplitudes limitadas através de dispositivos de proteção, evitando que haja danificação no isolamento dos equipamentos dos sistemas. Enfim, o que se espera desses sistemas é que os mesmos sejam capazes de fornecer energia com requisitos de confiabilidade, segurança e de forma econômica.

O estudo de Coordenação de Isolamento estabelece o nível de isolamento, tendo como base a amplitude e a probabilidade de ocorrência das sobretensões. Como frequentemente essas amplitudes são elevadas, torna-se economicamente inviável a construção de equipamentos com esse nível de isolamento, problema esse, que é resolvido com a colocação de dispositivos de proteção. Para isso, a Coordenação de Isolamento tem como princípio básico, detectar como as sobretensões se propagam no sistema, qual a frequência de ocorrência, os tempos de frente das ondas de surto e seus valores de amplitude, o tipo de descarga, o número de descargas sucessivas e a polaridade [01, 03, 22].

2. SOBRETENSÕES

Sobretensão é uma tensão variável com o tempo, entre uma fase e a terra ou entre fases, sendo o seu valor de crista superior ao valor de crista da tensão máxima do sistema ($V_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ ou $V_s \sqrt{2}$ respectivamente). Distingui-se dois tipos de sobretensões: Externas (atmosféricas) e Internas (manobra e temporária), cuja diferença entre ambas depende da localização dos eventos que as originaram. O conhecimento dos tipos de sobretensões que podem ocorrer em um sistema elétrico é fundamental na Coordenação de Isolamento, pois assim poderá ser feito um projeto de um sistema confiável e ao mesmo tempo econômico [01, 03, 22].

2.1. SOBRETENSÕES EXTERNAS

Sobretensão atmosférica é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, originada fora do sistema, cuja origem é uma descarga atmosférica ou outra causa, cuja forma de onda pode ser considerada, para a coordenação de isolamento, similar a uma onda de impulso atmosférico normalizada para ensaios - $1,2 \times 50 \mu s$, sendo de duração muito curta e amplitude máxima na ordem de 6 pu. Ressalta-se que a reignição através de espaçamentos dielétricos de equipamentos de manobra pode dar origem a sobretensões com taxas de crescimento elevadas, similares àquelas originadas por descargas atmosféricas [03, 22, 23].

Como a onda de surto atmosférico possui uma íngreme inclinação na frente, a sollicitação da isolação entre espiras dos enrolamentos dos equipamentos é maior, porém devido a curta duração, a isolação poderá suportar um esforço ligeiramente maior, em amplitude [03, 22].

A descarga atmosférica pode ocorrer diretamente sobre o equipamento (no caso de surtos atmosféricos atingindo as subestações), sobre as linhas de transmissão do sistema, dando origem, assim, a ondas de tensão que se propagam ao longo destas linhas, até atingir os equipamentos nas subestações, ou nas proximidades das linhas, dando origem aos surtos induzidos. Esse tipo de sobretensão é suficientemente elevada, podendo causar falhas nos isolamentos, tanto nas linhas, quanto nos equipamentos das subestações, com a consequente perda de continuidade no fornecimento de energia. Para que esse fato não ocorra, a proteção dos sistemas elétricos é feita para garantir a confiabilidade, evitando que as descargas atmosféricas atinjam diretamente as linhas e as subestações. A proteção é obtida através de cabos pára-raios (cabos guarda) para linhas e subestações e mastros para subestações, escoando as descargas para a terra [03, 22].

Com um sistema de proteção bem projetado, dificilmente as descargas atingem diretamente as subestações, ficando o estudo de sobretensões atmosféricas mais voltado para as linhas de transmissão até 230 KV, já que para sistema com tensão superior a este valor, o isolamento é geralmente imposto pelas sobretensões de manobra, partindo-se do pressuposto de que as linhas de transmissão sejam adequadamente projetadas. Com o aumento do nível de tensão do sistema e, conseqüentemente, do nível de isolamento das linhas de transmissão, as solicitações atmosféricas têm sua importância diminuída [10, 22, 03].

O fenômeno das descargas atmosféricas é relatado por D'LUZ e Outros [03], MOURA [10] e NOWACKI [22] e pode-se dizer que a descarga atmosférica basicamente ocorre, quando há uma ruptura da isolação em ar entre duas superfícies carregadas eletricamente com polaridades opostas. O fenômeno do carregamento das nuvens se dá através da separação de cargas, onde as correntes ascendentes de ar transportam as partículas positivas e as pequenas gotas de água para a parte superior das nuvens, enquanto as partículas negativas são levadas para a base das nuvens pelas grandes gotas de água.

Com a formação de um centro de cargas negativas na região inferior da nuvem e um centro de cargas positivas induzido na terra, resulta uma diferença de potencial entre ambos. Esses centros de carga continuam a se desenvolver até que o gradiente elétrico numa concentração de cargas na nuvem ou na terra, excede a suportabilidade do ar, provocando o movimento de cargas em direção à terra ou à nuvem. A rigidez dielétrica é da ordem de 30 KV/cm para o ar sêco nas condições atmosféricas normalizadas, mas pode ser bem menor, devido tanto à redução da pressão atmosférica, em função da altura da nuvem, devido à presença de gotas de água na mesma, como também da configuração do campo.

A descarga piloto se forma através de uma série de degraus, onde cada um deles tem de 15 a 50 metros de comprimento. Os degraus são retos, porém cada avanço segue geralmente uma nova direção em forma de ramos, podendo terminar no ar, ou seja, devido a insuficiência de cargas elétricas na frente da descarga, a mesma não se completa, havendo a necessidade de aguardar que uma carga suficiente seja transferida da nuvem para esta frente; esse fenômeno dá um aspecto tortuoso característico das descargas atmosféricas. Tudo acontece como se uma carga elétrica concentrada na extremidade do " leader " se destacasse da nuvem, embora se mantivesse ligada à mesma por um filamento condutor, e fosse autopropulsionada por forças elétricas resultantes da própria carga que se move. Vê figura 1.

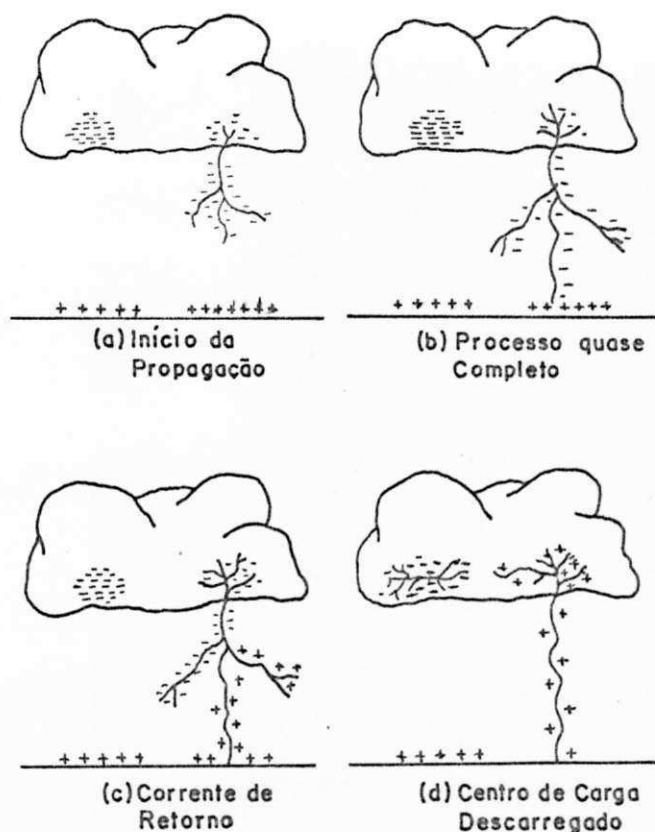


fig. 1 - A Descarga Atmosférica [03]

Quando a descarga piloto atinge a terra, surge uma corrente de retorno extremamente brilhante, que se propaga da terra para a nuvem, seguindo o mesmo caminho da descarga piloto, porém com polaridade oposta, descarregando para a terra tanto as cargas existentes no canal ionizado como parte da carga da nuvem. Após a corrente de retorno completar a descarga, o potencial do centro de cargas que iniciou o processo fica reduzido. Com isto, desenvolve-se uma elevada diferença de potencial entre este centro de cargas e um outro centro qualquer dentro da nuvem. Assim, são criados canais pelos quais essas regiões são ligadas ao caminho ainda ionizado pela primeira descarga. Um novo raio desenvolve-se entre a nuvem e a terra, seguindo um caminho sem ramificações e, com velocidade maior que a da descarga piloto. Depois de atingir a terra, uma segunda corrente de retorno volta para a nuvem. Esse processo pode se repetir várias vezes. Cerca de 80% dos raios apresenta no mínimo dois componentes luminosos, e 20% têm três a cinco componentes, mas existem registros de descargas múltiplas com até 40 componentes.

Os raios podem ser ascendentes ou descendentes, como mostra a figura 2. Os descendentes (A e B) são mais representativos, enquanto os tipo C e D são mais observados no topo de montanhas ou em estruturas muito altas.

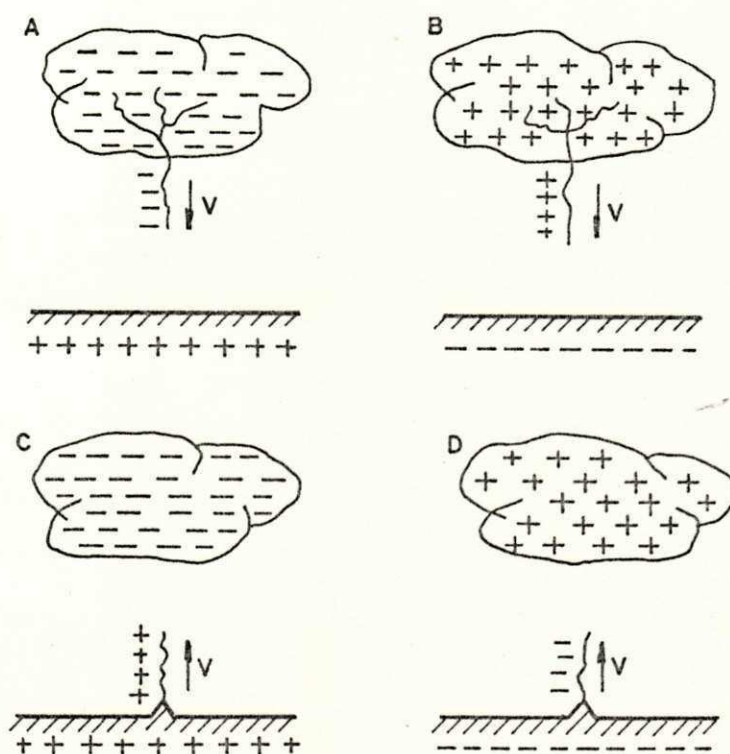


fig. 2. - Tipos de Descargas Atmosféricas [03]

Em seu livro, D'LUZ e Outros [03] afirma que 90% dos raios são de polaridade negativa, o que é de grande importância para o desempenho da linha e dos equipamentos do sistema em virtude da diferente resposta de suas isolações para cada polaridade da descarga. Contudo a corrente do raio é a propriedade mais importante do mesmo, tanto para o projeto da proteção dos sistemas elétricos, como para a análise do desempenho das linhas de transmissão. O valor dessa corrente depende apenas da impedância do canal do raio, que é em torno de milhares de ohms.

O valor médio para as primeiras descargas negativas é aproximadamente 30 KA, enquanto as descargas positivas, que são menos frequentes, segundo a referência acima citada, possuem um valor médio de 35 KA. Portanto, as descargas positivas possuem amplitudes muito maiores que as negativas. Porém, as descargas positivas apresentam geralmente, uma única componente, além de se caracterizarem por grandes cargas e frente de onda mais lenta do que as descargas negativas.

Por outro lado, estudos ainda não divulgados oficialmente, realizados pela CEMIG (estação experimental), indicam que no Brasil as descargas positivas ocorrem mais frequentemente.

2.2. SOBRETENSÕES EXTERNAS QUANTO AO LOCAL DE INCIDÊNCIA

Quanto ao local de incidência do raio, existem três possibilidades de descargas: Queda Direta no condutor, Queda Indireta de raios nas torres, mastros ou cabos pára-raios, e incidência de raios nas proximidades da linha [03, 10, 22]. A seguir comenta-se as principais implicações das sobretensões quanto ao local de incidência.

Nas sobretensões de origem direta a ocorrência de falha na isolação vai depender principalmente da intensidade da corrente da descarga, além da impedância de surto dos condutores, isolamento do sistema e do valor da tensão de fase no momento da descarga. Uma descarga diretamente sobre o condutor de fase, faz surgir uma elevada sobretensão, que na maioria dos casos, acarretará a falha da isolação da linha. Como uma isolação que suporte valores elevados de sobretensão é inviolável, a solução consiste em limitar as mesmas a valores muito menores. Isso é assegurado com o uso de mastros e cabos pára-raios, blindando os equipamentos e circuitos contra descargas diretas.

Para linhas de alta e extra alta tensão, um número grande de descargas no condutor não causará a falha da linha, porque a sua isolação é suficiente para suportar as tensões geradas pelas descargas de pequena amplitude, já que o projeto de isolação dessas linhas é elaborado para suportar sobretensões de manobra que são intrinsicamente dependentes das tensões nominais desses sistemas. Os surtos de tensão se propagarão pela linha até atingir a subestação, onde, devido as várias descontinuidades (disjuntores, transformadores, reatores, etc.), podem elevar ainda mais os níveis das sobretensões.

O estudo da sobretensão de origem indireta mostra que sua incidência envolve vários parâmetros de origem aleatória, como: corrente do raio, isolamento do sistema, aterramento das torres, etc. , isto exige, toda uma análise estatística. A ocorrência de uma descarga atmosférica nos pára-raios, ou nas torres de uma linha de transmissão pode acarretar seu desligamento, devido ao crescimento da tensão no ponto de incidência da descarga. Ao contrário da queda direta, os desligamentos em consequência deste fenômeno dificilmente são eliminados na origem, porém esses efeitos podem ser minimizados através de um projeto adequado de aterramento das estruturas e um ajuste dos elementos de projeto da cabeça da torre [03, 10, 22].

Quando um raio atinge uma das torres de uma linha de transmissão é estabelecido um processo de propagação de ondas de tensão e corrente nos cabos guarda, nas torres próximas e nos sistemas de aterramento, com reflexões de acordo com as impedâncias envolvidas. Na referência [03], é claramente relatado esse fenômeno. Através da figura 3 mostra-se o circuito elétrico representativo de uma descarga atingindo diretamente a torre.

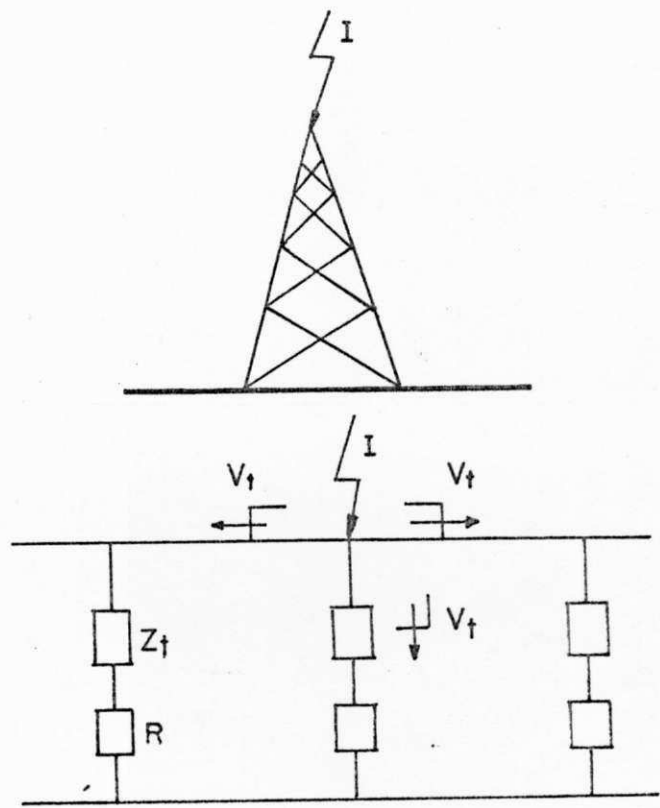


fig. 3. - Descarga na Torre [03]

A impedância de surto equivalente é o paralelo entre a impedância de surto da torre (Z_t) e as impedâncias de surto dos cabos pára-raios (Z_g).

$$\text{Logo, } Z = Z_t / (1 + 2Z_t / Z_g) \quad (1)$$

$$V_t = I \times Z$$

A onda de surto de tensão resultante sofre modificações devido a reflexões na base da torre e ainda por reflexões nas torres adjacentes.

A propagação de um surto de tensão nos cabos pára-raios, induz, nos condutores de fase, o aparecimento de ondas de tensão acopladas, através da relação de capacitâncias próprias e mútuas desses cabos, de mesma polaridade e K_a vezes a tensão do cabo. Assim, a cadeia de isoladores, que é o ponto onde o isolamento entre os cabos pára-raios e os condutores é mais fraco, ficará sujeita a diferença entre a tensão no topo da torre e a tensão induzida no condutor.

$$\text{Portanto, } V_t' = (1 - K_a) \times V_t \quad (2)$$

Onde K_a , que é o fator de acoplamento mútuo, fica na ordem de 0,15 a 0,30, com isto, V_t' fica reduzida pelo efeito do acoplamento.

O valor da resistência de pé de torre é extremamente importante para o desenvolvimento da tensão de topo de torre porque, sendo normalmente inferior à impedância de surto da torre, o coeficiente de reflexão para as ondas que são refletidas na base da torre é negativo, fazendo com que o crescimento da tensão no topo da torre sofra uma redução num intervalo de tempo relativamente pequeno devido a altura da torre. O coeficiente de reflexão para as ondas refletidas nas torres adjacentes é também negativo, fazendo com que as tensões refletidas sejam de polaridade inversa mas, como o tempo de propagação relativo ao vão é da ordem de 10 vezes superior ao tempo de propagação da torre, estas ondas refletidas podem chegar à torre atingida num instante em que a tensão no topo da mesma já tenha passado pelo seu máximo, como esta relatado por D'ALUZ e Outros [03] e NOWACKI [22].

As implicações do efeito das descargas nos cabos pára-raios dependem do ponto de incidência, podendo ser bem maior que no caso de incidência nas torres. As referências [22, 03] mostram que quando um surto de tensão atinge o cabo pára-raios em algum ponto do vão, a tensão resultante será:

$$V_m = I \times Z_g / 2 \quad (3)$$

A figura 4. mostra o circuito elétrico representativo de uma descarga atingindo o cabo pára-raios.

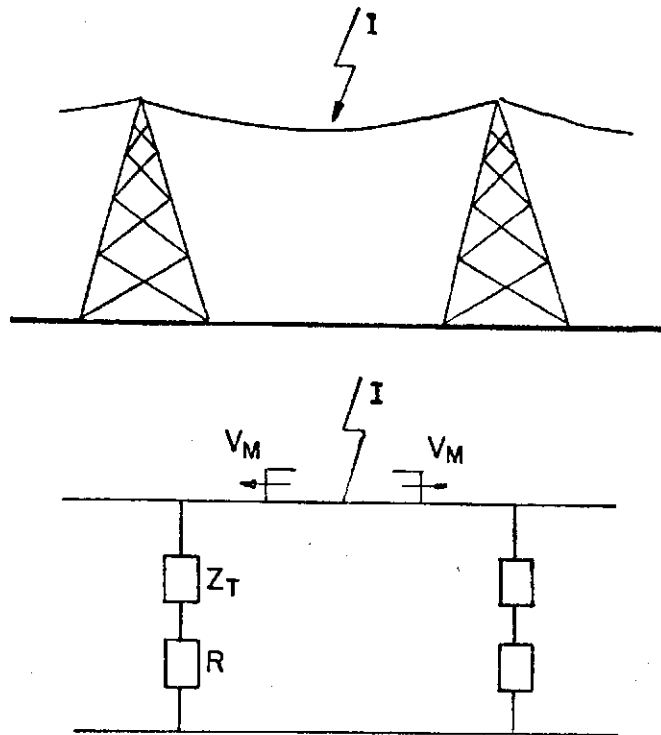


fig. 4. - Descarga no Cabo Pára-Raios [03]

A tensão V_m (tensão resultante no cabo pára-raios) assumirá valores tanto maiores quanto maior for o afastamento em relação às torres, portanto, o ponto de incidência que acarretará maior crescimento da tensão é o meio do vão.

A tensão $(1 - K_a) \times V_m$, à qual o isolamento em ar entre os cabos pára-raios e condutores ficará submetido, é bem maior do que a tensão à qual a cadeia de isoladores ficaria submetida se uma descarga de mesma intensidade atingisse a torre.

A partir da suposição de que não ocorreu falha no meio do vão, a tensão V_m irá se propagar pelo cabo guarda em direção as torres adjacentes, onde será atenuada por reflexões. A torre se apresenta como descontinuidade para as ondas que chegam pelos cabos guarda. Então, ondas refletidas retornam ao ponto da descarga atmosférica enquanto duas ondas refratadas são geradas. Uma seguirá para o próximo vão pelo cabo guarda, enquanto uma outra desce pela torre até a terra.

A tensão no topo da torre será:

$$V_t = b \times V_m$$

(4)

onde coeficiente de refração (b) é dado por:

$$b = 2 \times Z / (Z + Z_g) \quad (5)$$

e a impedância equivalente ao cabo guarda e a torre (Z)

$$\text{é:} \quad Z = Z_g \times Z_t / (Z_g + Z_t) \quad (6)$$

$$\text{Logo,} \quad V_t = V_m \times Z_t / (Z_t + Z_g/2) \quad (7)$$

Assim sendo, a tensão que irá aparecer através da cadeia de isoladores será:

$$V_t' = (1 - K_a) \times V_t \quad (8)$$

Para descargas que atingem os cabos guardá, as máximas solicitações que serão impostas ao isolamento das torres são de mesma ordem de grandeza daquelas onde a torre é atingida diretamente. Com isto, as descargas no meio do vão podem resultar na ocorrência de falhas na torre mesmo que nada tenha ocorrido ao longo do vão [03].

Finalmente, uma descarga atmosférica ocorrendo próxima de uma linha de transmissão, pode induzir uma tensão na linha, a qual quase nunca excede 500 KV. Linhas blindadas com cabos pára-raios e de tensão nominal superior a 69 KV, normalmente possuem isolamento capaz de impedir a ocorrência de descargas para tensões dessa ordem. Para linhas de tensões inferiores, entretanto, com níveis de isolamento menores do que 500 KV, podem falhar por surtos de tensão induzidos. Na maioria dos casos, estes circuitos não têm cabos guarda, estando, sujeitos a falharem cada vez que forem atingidos por uma descarga direta. Em geral, falhas por surtos induzidos não constituem um problema maior, já que o número de falhas por descargas diretas excede aquele decorrente de surtos induzidos [22 , 03].

2.3. SOBRETENSÕES INTERNAS

As sobretensões internas são causadas por ocorrências dentro do sistema, como manobra de disjuntores ou curtos circuitos. As referências [10, 03, 22] relatam dois tipos de sobretensões internas, ou seja, sobretensões de manobra e sobretensões temporárias.

Em alguns casos, as sobretensões se confundem, como: a energização de uma linha terminada em transformadores que origina uma sobretensão que pode ser considerada como de manobra ou temporária, dependendo do grau de amortecimento das cristas sucessivas (isto é, dos parâmetros do circuito); um surto atmosférico transferido através de um transformador pode produzir, no lado secundário, ondas de curta duração similares àquelas devido à operação de manobra [03].

A sobretensão temporária é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, em algum ponto do sistema elétrico, oscilatória, de duração relativamente longa e fracamente amortecida ou não amortecida. Estas sobretensões tem origem normalmente nas manobras, faltas, fenômenos não lineares, como por exemplo: ferro ressonância e efelto Ferranti. Estas sobretensões se caracterizam por amplitudes geralmente inferiores a 1,5 pu, frequência de oscilação menor, igual ou maior que a fundamental e tempo de duração superior a dezenas de milissegundos [03, 10, 22, 23].

A sobretensão de manobra é uma sobretensão fase-terra ou entre fases, em algum ponto do sistema, tendo origem na operação de um equipamento de manobra, energização e religamento de linhas, ou outra causa. Esta sobretensão é fortemente amortecida e de curta duração, ou seja, com tempo de frente entre 100 a 500 us e com tempo de cauda da ordem de 2500 us, e seu enquadramento como sobretensão de manobra é determinado mais por sua forma de onda do que por sua fonte de origem [03, 10, 22, 23].

A distribuição destas sobretensões ao longo da linha e da isolação é equivalente àquela devido as sobretensões temporárias, porém não são repetitivas e somente um valor de crista, qualquer que seja a polaridade, é significativo. A amplitude e duração das sobretensões de manobra dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das suas condições no instante da manobra. Assim sendo, para um mesmo sistema, a mesma operação pode resultar em valores diferentes para a sobretensão [22, 10, 03, 27].

3. ASPECTOS GERAIS E CRITÉRIOS DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

A função básica de um pára-raios é evitar que uma sobretensão exceda os limites de isolamento dos equipamentos do sistema, como transformadores, disjuntores, isoladores, etc. Não só a amplitude de uma sobretensão é importante, bem como a taxa de crescimento da onda, que caso seja alta, poderá danificar os isolamentos das bobinas dos transformadores [03, 10].

Portanto, a tensão suportada pelo isolamento e a tensão de descarga do pára-raios dependem da forma de onda. Como a tensão suportável é função do tempo, observamos as características dos três tipos de sobretensão na fig. 5 : a das ondas de origem atmosférica, a das sobretensões de manobra e temporária. A taxa de crescimento das sobretensões atmosféricas é bem mais rápida se comparada com a das sobretensões de manobra e temporária [03, 10, 22, 27].

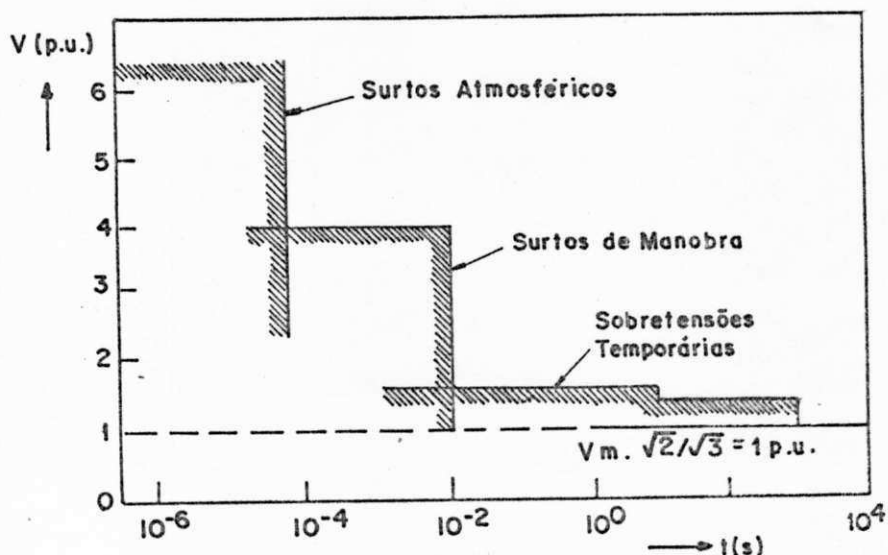


fig. 5. - Característica dos tipos de sobretensões [03]

A coordenação de isolamento dos equipamentos de um sistema elétrico de potência pode se exemplificar, de forma geral, através do gráfico da figura 6 mostrado nas referências [01, 11].

O ponto A da figura 6 indica a tensão fase terra do sistema, sendo que o grau de aterramento do mesmo é que irá determinar a máxima tensão 60 Hz fase-terra a que estará sujeito o pára-raios. A tensão nominal do pára-raios deverá ser sempre igual ou maior que a máxima tensão fase-terra do sistema. O sistema com neutro efetivamente aterrado pode usar pára-raios com tensão nominal menor do que o sistema com neutro isolado, sem impor risco ao pára-raios. O ponto B indica o pára-raios selecionado. O valor médio da rigidez dielétrica, ou seja, o valor médio da tensão suportável pelo equipamento sem que haja danificação no seu isolamento, é mostrado no ponto C. O nível básico de impulso (N.B.I.) que determina a suportabilidade mínima do equipamento à sobretensões é indicado pelo ponto D.

A distribuição normal de frequência é indicado em D e possui um valor médio em C.

O ponto E mostra o valor médio de tensão disruptiva ou residual, a diferentes níveis de corrente.

O valor máximo suportável pelo pára-raios é mostrado pelo ponto F.

A partir daí, é definida uma "Margem de Proteção", que é a diferença entre o nível mínimo de suportabilidade do equipamento mostrado em D e o nível máximo de proteção do pára-raios mostrado em F. A margem de proteção pode ser expressa em KV ou em percentual baseado no N.B.I. do equipamento. Quanto maior for a margem de proteção, maior será a certeza de que o isolamento do equipamento não sofrerá danos devido a excessivas sobretensões.

O risco de falha de isolamento, pode ser calculado se a função densidade de probabilidade de descarga e a probabilidade de falha de isolamento são conhecidas.

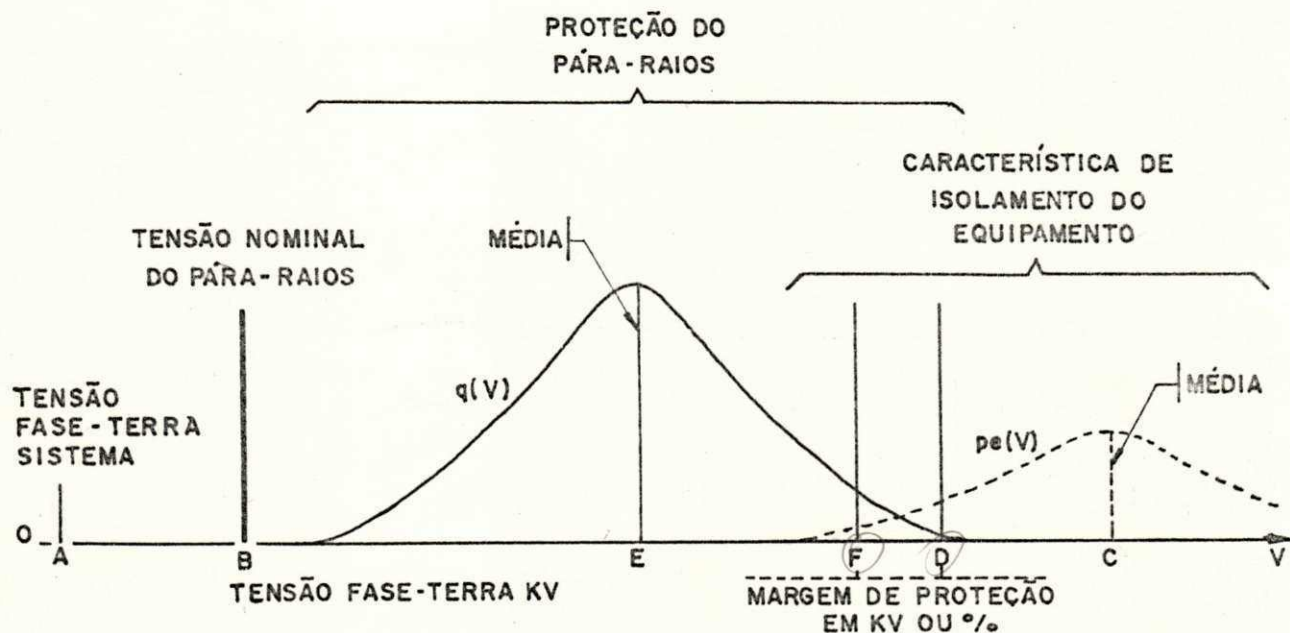


fig. 6. - Coordenação de Isolamento dos equipamentos de um Sistema Elétrico [D1, 11]

O nível de isolamento de todos os equipamentos montados numa mesma instalação de alta tensão não tem de ser o mesmo. São distintos os níveis para os isolamentos "auto-regenerativos" e para os "não auto-regenerativos". Os primeiros são os que recuperam inteiramente suas propriedades isolantes depois de submetidos a uma descarga, é o caso dos intervalos de ar. Os últimos, após a perfuração decorrente de uma descarga, perdem as suas propriedades isolantes ou não as recuperam inteiramente, é o caso dos isolantes sólidos.

A referência [10], relata os critérios da coordenação de isolamento nas redes de média e alta tensão (6 KV a 220 KV), o pára-raios deve atuar quando a tensão atinge o seu nível de proteção, sendo porém, o nível de isolamento do equipamento protegido superior ao nível de proteção do pára-raios. A relação entre os dois valores é denominada de "relação de proteção". Para as ondas de origem atmosférica, esta relação não deve ser inferior a 1,2. Para sobretensões de manobra, a coordenação de isolamento poderá seguir um dos dois critérios mostrados abaixo:

a) O pára-raios não deve atuar com sobretensões de manobra, para isto, o nível de proteção deverá ser maior do que o valor da crista da máxima sobretensão de manobra prevista. Com o uso desse critério, adota-se uma margem de segurança de 20 %, assegurando que não haverá atuação do pára-raios para tensão de manobra.

b) O pára-raios deve atuar quando a sobretensão de manobra atingir um valor instantâneo pré-fixado. Isto permite controlar as sobretensões de manobra e reduzir os níveis de isolamento, mas obriga o pára-raios a suportar maiores fadigas térmicas.

Os pára-raios devem assegurar a interrupção da corrente residual, não só sob a tensão de serviço, mas também sob as sobretensões ditas "contínuas". Estas sobretensões têm frequência próxima ou igual a de serviço, podendo atingir amplitudes cerca de 80 % superiores à amplitude de tensão normal fase-terra, podendo ter duração de algumas horas. Podem ser causadas, por exemplo, por um defeito fase-terra, pelo desligamento de uma linha externa em vazio, ou pelo corte de um condutor ativo. Se os pára-raios conduzirem correntes à frequência de serviço serão, provavelmente, destruídos por excessivas solicitações térmicas [05, 03, 10].

A curva de Gauss pode representar a probabilidade de descarga de um pára-raios. As tensões de atuação distribuem-se em torno de um valor médio, a tensão V_{50} , onde são iguais as probabilidades de descarga e de não descarga [10, 22]. Para uma distribuição normal a probabilidade de descarga é dada pela tabela 1.

TABELA 1. Probabilidades de descarga (distribuição normal com desvio padrão s [KV]) [10] .

Amplitude da onda	Probabilidade de descarga (%)
V50 - 3s	0,13
V50 - 2s	2,30
V50 - 1,28s	10,00
V50 - s	15,90
V50	50,00
V50 + s	84,10
V50 + 1,28s	90,00
V50 + 2s	97,70
V50 + 3s	99,87

De acordo com a referência [10], para os pára-raios atuais, o desvio padrão (s) varia entre 2,4 e 5 %.

Na fig. 7. são mostrados os limites inferior e superior, onde o nível de proteção é definido pelo limite superior; supondo $s = 4\%$, tem-se:

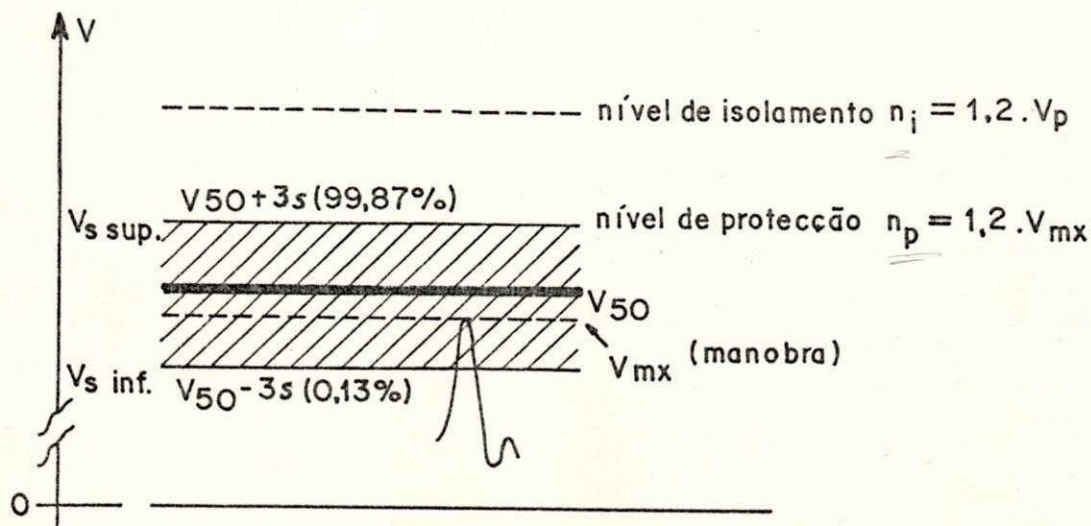


fig. 7. - Limites de Protecção [10]

Para cristas de tensão repetitivas, causadas por certos equipamentos ligados a rede, o pára-raios não deve atuar, já que o tempo de duração dessas cristas é muito curto, evitando-se, assim, que seja destruído por fadigas térmicas excessivas [05, 03, 24].

A Coordenação de Isolamento de um sistema elétrico de média tensão é mostrada através do gráfico da fig. 8, onde tem-se a curva 1 representando a máxima tensão de serviço fase-terra em condições normais, $V_{ft} = \sqrt{2} V_s$. Por desligamento intempestivo das cargas, a tensão subiu para $1,12 V_{ft}$ (curva 2). Em 3 observa-se as sobretensões repetitivas. No instante t' uma manobra origina uma sobretensão (4) com um valor de crista V_{mx} . O nível de proteção do pára-raios, V_{sup} é 20 % superior a V_{mx} (5). O nível de isolamento dos equipamentos é representado em (6), que é 20 % superior a V_{sup} .

$$\begin{aligned}
 & V_{ft} = 1,12 V_{ft} \\
 & = 1,2 V_{mx} \\
 & \left. \begin{aligned} & V_p = 1,2 V_{mx} \\ & V_s = 1,2 V_p \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

Através do estudo dos regimes transitórios da rede é definido o valor de V_{mx} . A relação (num ponto dado da rede) entre o valor de crista da tensão em relação a terra decorrente de uma manobra e o valor de crista da tensão da rede entre fase e neutro imediatamente anterior a manobra (deduzida da tensão composta multiplicando-a por $\sqrt{2} / \sqrt{3}$) designa-se por "fator de sobretensão de manobra em relação a terra" (Definição 16 das Recomendações (CEI. 71/1967)). Na fig. 8. de acordo com esta definição , este fator é expresso por $K_s = V_{mx} / 1,12 V_{ft}$.

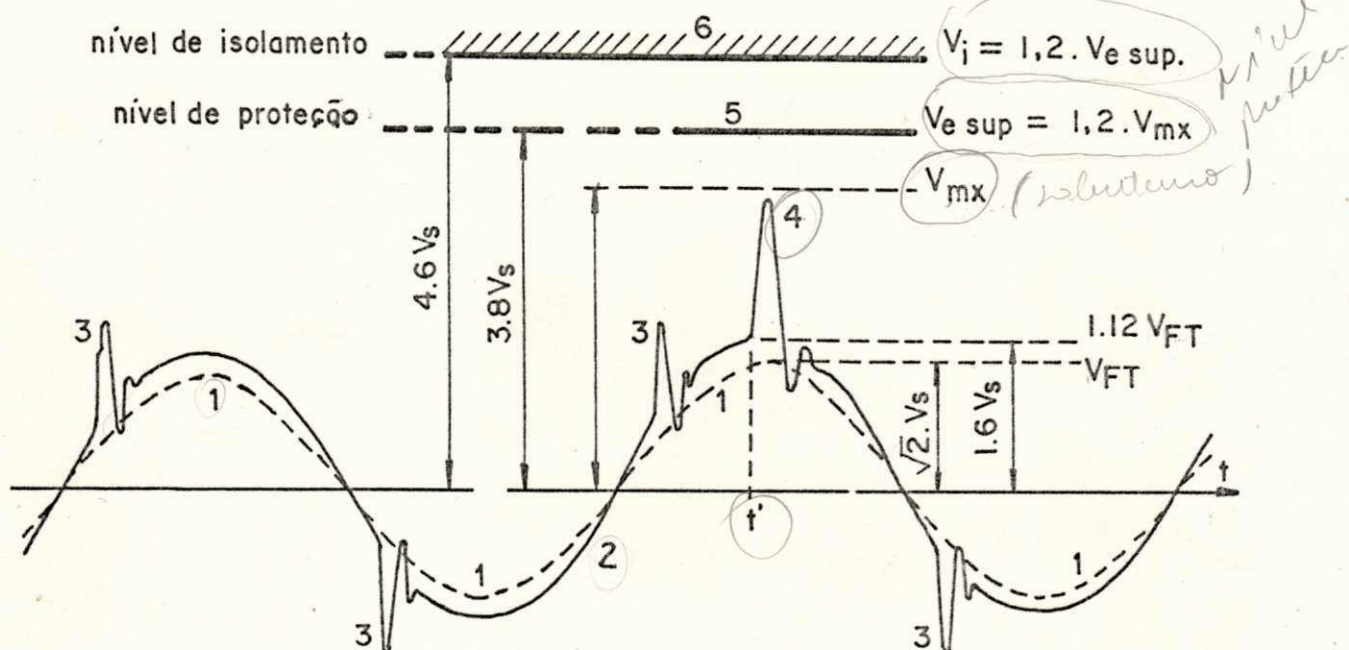


fig. 8. - Coordenação de Isolamento [10]

Para redes de média tensão (60 KV) admiti-se que os fatores de sobretensão de manobra não excedem 2,5 a 3,5. Nas redes de 400 KV e 500 KV o fator de sobretensão é limitado em 1,5 a 2,5 através de resistências de amortecimento nos disjuntores. Para níveis de 800 KV e 1200 KV procura-se limitar o fator de sobretensão em 1,4 a 1,5, tentando-se reduzir este, de modo a não ultrapassar 1,1 a 1,2 [10].

De acordo com a fig. 8. o fator de sobretensão é,

$$K_s = V_{mx} / 1,12 V_{ft} = 2 \quad (9)$$

E a relação entre a crista da sobretensão de manobra e o valor eficaz V_s da maior tensão entre fase e neutro em condições normais é:

$$V_{mx} / V_s = 2 \times 1,12 \times \sqrt{2} = 3,18 \quad (10)$$

O nível de isolamento é dado por três fatores multiplicadores:

$$N_i = 4,6 V_s \quad (11)$$

$$N_i = 3,23 V_{ft} \quad (12)$$

$$N_i = 2,88 (1,12 V_{ft}) \quad (13)$$

A tensão residual V_r , será superior a tensão de atuação se a intensidade da descarga exceder o valor nominal da classe do pára-raios em uso. O aumento de V_r com a intensidade da descarga é lento, porém o princípio básico da coordenação de isolamento está no valor do nível de proteção e por isso deve evitar-se que o valor nominal do pára-raios seja excedido. Se a instalação de alta tensão e as linhas aéreas estiverem eficazmente cobertas por cabos guarda e se as resistências de terra na área protegida tiverem um valor suficientemente pequeno, a maioria das ondas incidentes aos equipamentos da instalação tem origem fora da zona protegida, a descarga inicial ramifica-se e as ondas atenuam-se, sendo que sua frentes aplanam-se; assim, a maioria das ondas de tensão à entrada da zona protegida não excederá significativamente a tensão de contorno dos isoladores da linha (pelo menos nas redes a partir de 220 KV), a amplitude das ondas de corrente associadas é limitada pela impedância de onda Z0. Nestas condições probabilidade de que a intensidade da descarga exceda o valor nominal é bem menor [03, 10,22].

Descargas maiores do que o valor nominal do pára-raios podem ser originadas ou por uma falha da cobertura do cabo pára-raios, permitindo uma descarga direta sobre o condutor da fase ou por um contorno inverso dos isoladores na vizinhança do pára-raios, ou seja, quando uma descarga atinge o cabo pára-raios, tendo a resistência de aterramento da torre um valor relativamente alto, a diferença de potencial que se estabelece entre o mesmo e topo da torre é idêntico ao que fica submetida a cadeia de isoladores, permitindo uma descarga no sentido dos condutores para o início da cadeia. A primeira falha evita-se com um projeto cuidadoso, a segunda diminuindo a resistência de terra da zona protegida [03, 10, 22].

Para tensões extremamente altas (800 a 1200 KV), agora existe uma outra filosofia de coordenação de isolamento e da concepção e utilização dos pára-raios, pois para a redução dos níveis de isolamento, foi necessário reduzir os níveis de proteção; aos pára-raios era imposto limitar apenas as sobretensões de manobra. Isto significa usar os pára-raios como uma segunda linha de defesa contra sobretensões de manobra e construí-los para dissiparem energias térmicas acrescidas; a primeira linha de defesa é constituída pelos dispositivos que atenuam as sobretensões de manobra, por exemplo, resistores de pré-inserção [10].

4. PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS

De maneira clássica, são definidos os pára-raios convencionais como elementos constituídos de centelhadores em série com resistores não lineares à base de Carbetto de Silício. A fig. 9 mostra um diagrama esquemático de um pára-raios de SiC e sua característica $V \times I$ [01, 08, 13].

O comportamento desse pára-raios pode ser expresso pelas relações abaixo.

Se a tensão entre os terminais do pára-raios, V_{ab} , é menor do que a tensão de descarga, V_a , não haverá circulação de corrente.

$$V_{ab} < V_a \text{ então } I = 0 \quad (14)$$

Se a tensão V_{ab} é maior do que V_a haverá circulação de corrente e V_{ab} irá depender das características do pára-raios.

$$V_{ab} \geq V_a \text{ então } I \text{ diferente de } 0 \text{ e } V_{ab} = V_r \quad (15)$$

A característica $V_r \times I$ do pára-raios pode ser expressa pela equação:

$$I = K_b \times V_r^\alpha \quad (16)$$

Onde os valores típicos de alfa (α) para região de maior não linearidade, ficam entre 3 e 8.

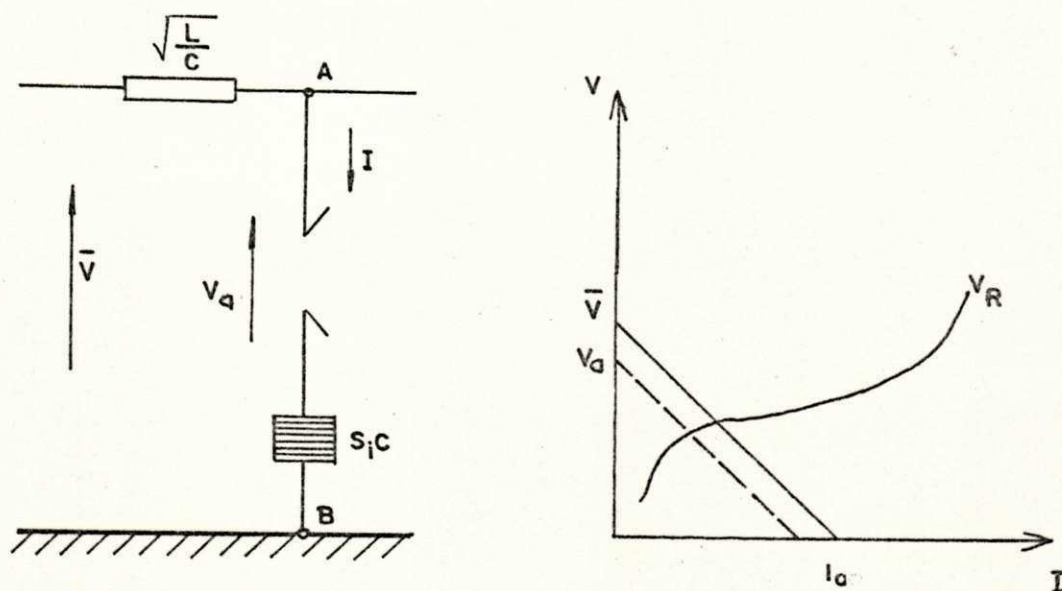


fig. 9 - Diagrama esquemático de um pára-raios de SiC e sua característica $V \times I$ [08, 13]

A figura 10, apresenta esquematicamente uma célula centelhadora de um pára-raios convencional de última geração.

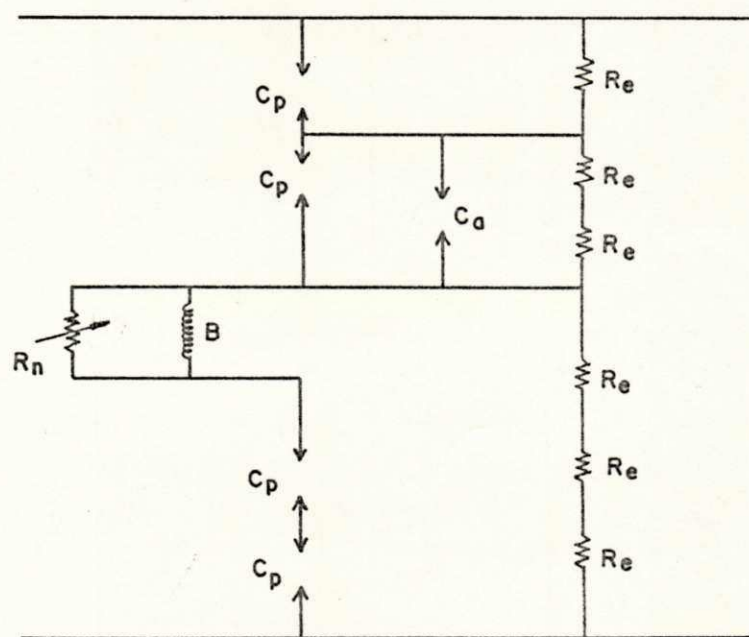


fig. 10 - Célula centelhadora de um pára-raios convencional de última geração [08, 13]

Em paralelo com os centelhadores principais C_p , existem centelhadores auxiliares C_a , controladores do início das descargas. Esses centelhadores liberam os primeiros elétrons para a formação da descarga, aumentando a precisão no valor da tensão da descarga.

Os resistores lineares R_e , posicionados em paralelo com os centelhadores principais C_p , são denominados de resistores equalizadores, os quais forçam uma distribuição uniforme da tensão ao longo dos centelhadores principais.

Em série com os centelhadores principais, tem-se um conjunto formado pelo paralelo de um resistor não linear auxiliar R_n e uma bobina B . No início do processo, a descarga está associada a frequências elevadas e com isso a bobina será um circuito aberto. Após a passagem do surto, tem-se a passagem da corrente subsequente, associada a frequência do sistema, ocorrendo a divisão da corrente entre o resistor auxiliar R_n e a bobina B . A passagem da corrente através da bobina, gera um campo magnético, o qual é utilizado como sopro magnético nos centelhadores principais, aumentando o comprimento do arco, facilitando sua extinção.

A figura 11., ilustra esquematicamente o princípio de funcionamento do pára-raios convencional, citado nas referências [08, 13]. Na figura 11.a tem-se uma tensão senoidal e em determinado instante ocorre uma sobretensão até o nível V_a , tensão de descarga do pára-raios, o surto cai em seguida até o nível de V_r , que é a tensão residual. A curva i_s apresenta o valor da corrente nos diferentes estágios.

As figuras 11.b,c,d e e apresentam a operação do pára-raios, partindo da condição inicial em b onde este se encontra conduzindo a corrente de controle. Em c tem-se o pára-raios conduzindo a corrente de descarga durante o surto de tensão, em d o pára-raios, conduzindo a corrente subsequente associada à frequência do sistema e em e retorna às condições iniciais. Como pode ser visto em ti tem-se um surto que faz com que provoque a descarga no pára-raios e neste momento tem-se a corrente i_a como mostrada na figura 11.c, passando pelo resistor R_b . Nesta situação, a tensão nos gaps provocada pelo arco é praticamente nula. Como a passagem do surto está associada a altas frequências, nenhuma corrente passa pela bobina. Passado o surto, a corrente volta a estar associada com a frequência do sistema e assim consegue passar pela bobina de sopro magnético, que, por sua vez, faz com que o arco se alongue fazendo a tensão V_L no gap crescer. Como a tensão no pára-raios é a soma da tensão V_{Ra} no resistor não linear com a tensão V_L no gap, esta última crescendo faz V_{Ra} diminuir e com isto o valor da resistência no resistor não linear cresce, e isto vai acontecendo enquanto a corrente vai diminuindo, até que a tensão V_L iguale-se a tensão V_s do sistema: com isso, o pára-raios volta a sua característica inicial.

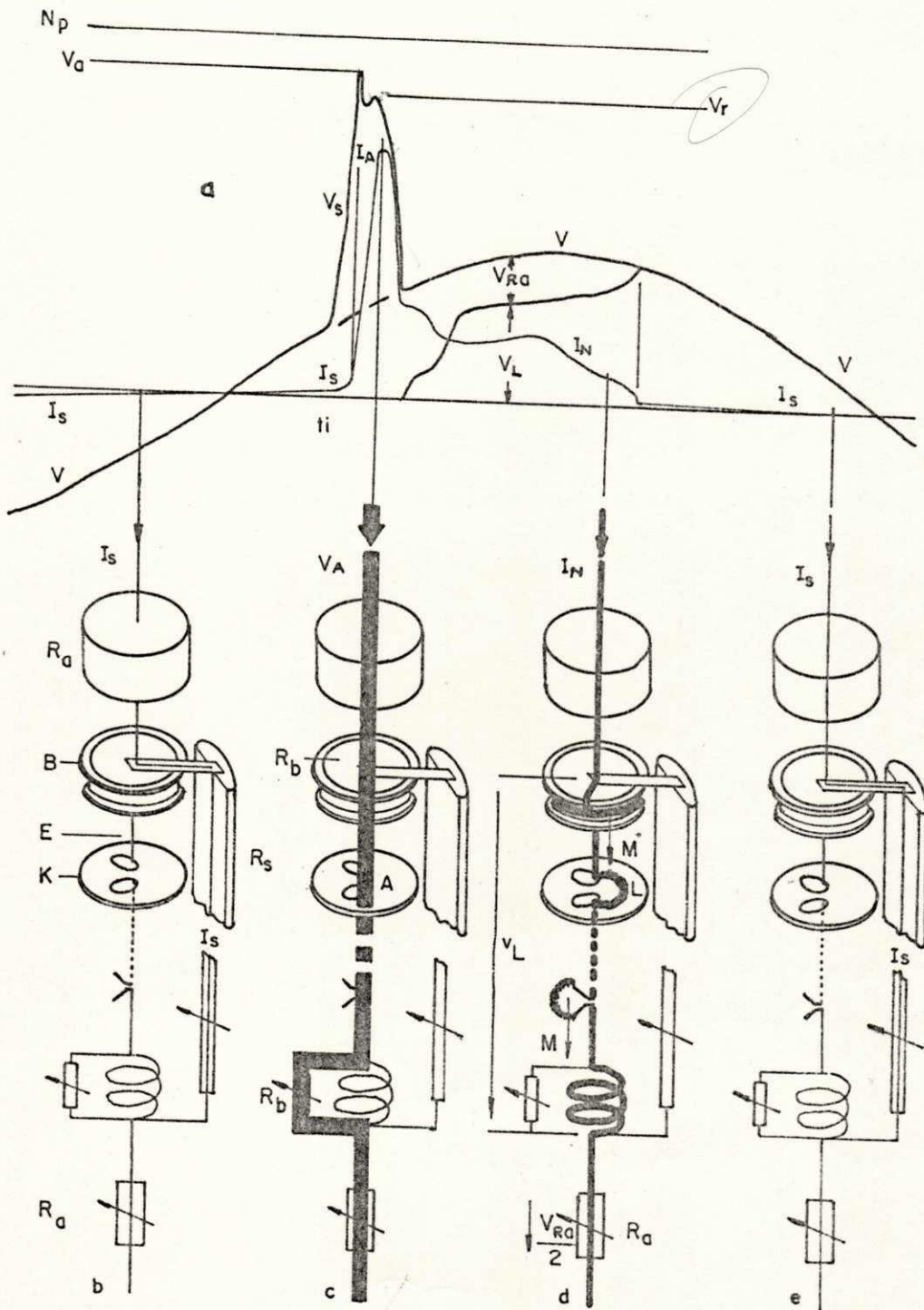


fig. 11 - Princípio de funcionamento de um pára-raios convencional [DB, 13]

5. PÁRA - RAIOS DE ÓXIDO DE ZINGO

Um pára-raios ideal é aquele que, em sua tensão normal de operação não conduza corrente, comportando-se como uma impedância infinita, e que na presença de uma sobretensão, conduza apenas a corrente suficiente para reduzi-la ao nível de proteção do mesmo, como é definido nas referências [08, 03, 22]. A fig. 12. mostra a característica dos resistores não lineares à base de ZnO.

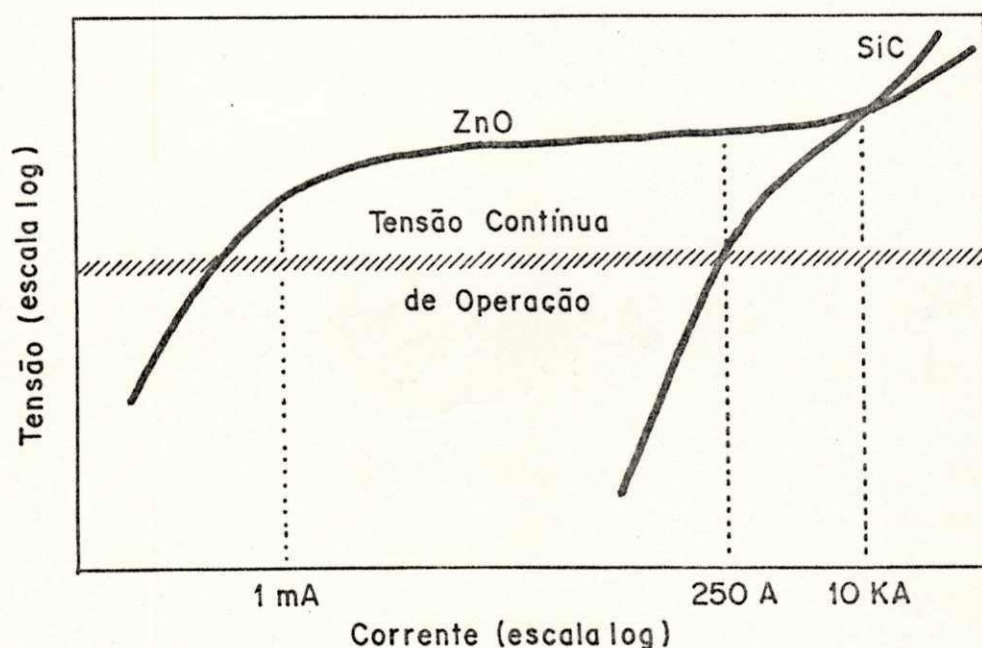


fig. 12 - Curva característica $V \times I$ dos resistores não lineares à base de ZnO e SiC [03]

A procura constante de um dispositivo de proteção ideal, levou ao desenvolvimento dos resistores não lineares à base de óxido de zinco, que possuem um alto coeficiente de não linearidade e cuja característica $V \times I$ se aproxima da ideal, mostrada na figura 13.

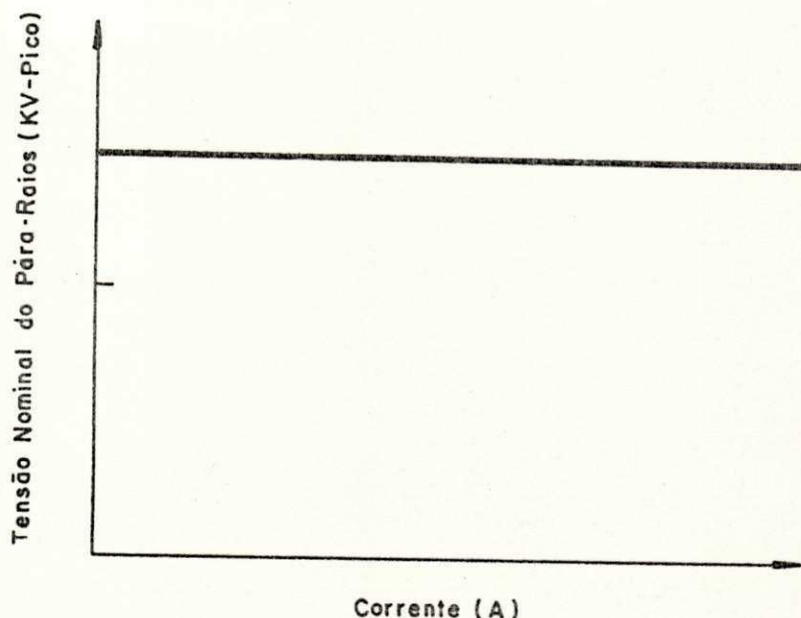


fig. 13. - Característica Ideal de um pára-raios
[03]

Pelo fato de não possuírem centelhadores, os pára-raios formados por associação série ou série-paralelo de resistores não lineares à base de ZnO ficam submetidos permanentemente à tensão de operação fase-terra do sistema, com isto, pelo mesmo fluirá sempre uma corrente de fuga na ordem de microampères. A associação desta corrente de fuga com surtos atmosféricos ou de manobra, levam a uma degradação progressiva da estrutura físico-química dos resistores de ZnO, sendo a taxa de degradação dependente do número e da amplitude das descargas sucessivas e do nível de tensão continuamente aplicada [05].

O pára-raios de ZnO tem uma excelente capacidade de suportar sobretensões, pois além de não possuir corrente subsequente, absorve uma maior quantidade de energia; sendo esta energia dependente das características construtivas do pára-raios e das necessidades do sistema elétrico, bem como das características dos pára-raios conectados nas proximidades.

O pára-raios de ZnO deve ser projetado para que nas condições normais de operação, não atinja o desequilíbrio térmico, que ocorre quando o aquecimento interno ultrapassa a capacidade de dissipação de energia para o meio externo [05].

Outro aspecto a ressaltar é a não dependência da variação estatística das descargas inerentes aos pára-raios com centelhadores, já que para os pára-raios convencionais a iniciação da descarga depende da existência de elétrons livres no espaço entre os eletrodos. Como o pára-raios de ZnO não possui gaps, o seu nível de proteção é função apenas do resistor não linear à base de óxido de zinco. A ausência de centelhadores traz uma outra vantagem que é a suave transição do estado de condução para o de não-condução e vice versa, que ocorre sem o pico de tensão do pára-raios convencional.

As características dos pára-raios de ZnO são descritas nas mais diversas literaturas sobre o assunto. A seguir relata-se as mais importantes para o objetivo deste trabalho.

As características negativas do pára-raios à base de óxido de zinco são: o coeficiente de temperatura da resistência é negativo, para baixas correntes e a possível instabilidade na estrutura físico-química, isto é, a existência de uma temperatura crítica, intrinsecamente ligada ao projeto do pára-raios, a temperatura do invólucro e a tensão aplicada, para o resistor não linear à base de ZnO, acima da qual há dificuldade de dissipação de calor. Devido ao coeficiente de temperatura negativo do resistor não linear, se por acaso o pára-raios atingir uma temperatura acima deste valor, quando de uma sobretensão, mesmo quando a tensão volta a ser apenas a de serviço, a corrente através de resistência pode ser suficientemente alta para impedir ou dificultar o resfriamento, podendo conduzir, em virtude da instabilidade na estrutura físico-química, ou a uma avalanche térmica ou a um envelhecimento físico-químico [05].

Os aspectos positivos dos pára-raios de ZnO são os seguintes: alta não linearidade; alta capacidade de absorção de calor; melhor estabilidade e resposta a impulsos de alta taxa de crescimento; projeto e construção mais simples, aumentando a confiabilidade; melhores características protetivas; o equipamento sob proteção não está sujeito aos transitórios decorrentes da disrupção dos centelhadores, não sofrem redução de tensão disruptiva devido ao efeito da variação na tensão, ao longo da porcelana, decorrente da contaminação. Isto provoca apenas uma elevação na corrente de escoamento através do resistor de óxido de zinco, conseqüentemente, o corpo da porcelana poderá ser lavado sem risco de operação indevida; o pára-raios de ZnO tem excelente capacidade de suportar sobretensões pois, não há corrente subsequente e possuem características operacionais precisas e previamente estabelecidas.

Os pára-raios à base de ZnO têm suas aplicações recomendadas na proteção de bancos de capacitores em série, na aplicação em subestações isoladas a gás SFB e nas aplicações mais vantajosas em AT e EAT. [7]

6. RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ZnO

A obtenção dos resistores não lineares à base de óxido de zinco é feita através de uma mistura cerâmica que tem como componente principal o óxido de zinco. Alguns estudos feitos por Entage, Matsuoka, Levinson, Philipp e mais recentemente por Lagrange, P. Manuel, R. Salomon em 1986 (citados na referência [11]) mostram que o mais alto coeficiente de não linearidade obtido foi decorrente da mistura nas seguintes proporções: 97 % de ZnO, 0.5 % de Bi₂O₃, 0.5 % de CoO, 0.5 % de MnO, 0.5 % de Cr₂O₃ e 1.0 % de Sb₂O₃. Nestas proporções de mistura e a uma temperatura de sintetização de 1350o C obteve-se um $\alpha = 50$, como pode-se observar na tabela 2 e figs. 14 e 15.

As etapas seguintes no processo de fabricação dos resistores não lineares à base de ZnO é a prensagem dos óxidos em forma de blocos cilíndricos e a sinterização para que se transformem em corpos cerâmicos densos, a uma temperatura na faixa de 1150^oC - 1350^oC, dependendo da composição; a próxima etapa é aplicação de uma camada isolante sobre as superfícies cilíndricas e a metalização das superfícies planas [01, 08, 11, 15].

No processo de fabricação de resistores não lineares à base de ZnO para aplicações em altas tensões, maiores cuidados devem ser observados tais como: prensagem, teor de umidade e principalmente, controle da microestrutura final (tamanho dos grãos, distribuição das fases inter e intra granulares). [15]

TABELA 2. Efeito dos aditivos óxidos, da temperatura de sinterização e da dimensão dos grãos de ZnO no coeficiente de não linearidade (α) dos resistores não lineares à base de óxido zinco [11]

ADITIVO (mol %)	TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO ($^{\circ}$ C)	COEFICIENTE DE NÃO LINEARIDADE (α)	DIMENSÃO DOS GRÃOS DE ZnO (μ m)
Bi ₂ O ₃ (0.5)	1150	4.0	20.0
Sb ₂ O ₃ (0.5)	1150	3.1	3.0
Bi ₂ O ₃ (0.5) CoO (0.5)	1250	13.0	25.0
Bi ₂ O ₃ (0.5) MnO	1350	18.0	30.0
Bi ₂ O ₃ (0.5) CoO (0.5) MnO (0.5)	1350	22.0	30.0
Bi ₂ O ₃ (0.5) CoO (0.5) MnO (0.5) Cr ₂ O ₃ (0.5)	1250	21.0	20.0
Bi ₂ O ₃ (0.5) CoO (0.5) MnO (0.5) Cr ₂ O ₃ (0.5) Sb ₂ O ₃ (1.0)	1350	50.0	10.0

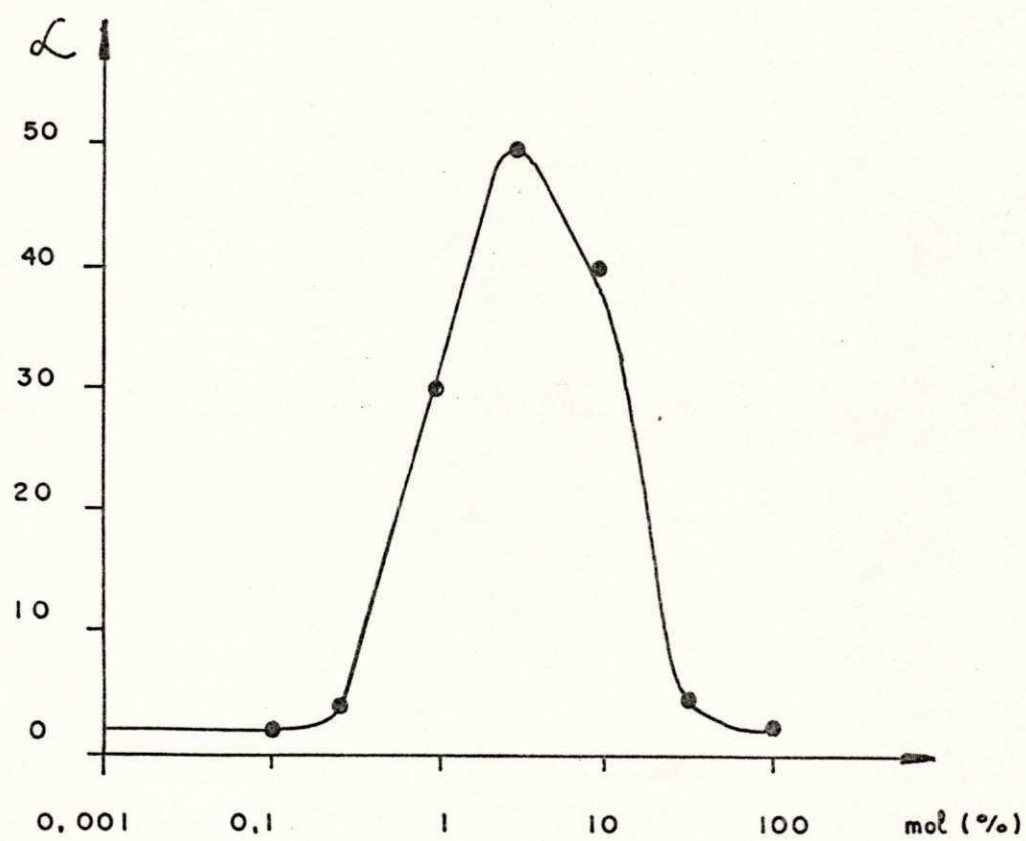


fig. 14. - Influência dos cinco aditivos no coeficiente de não-linearidade (\mathcal{L})
[17]

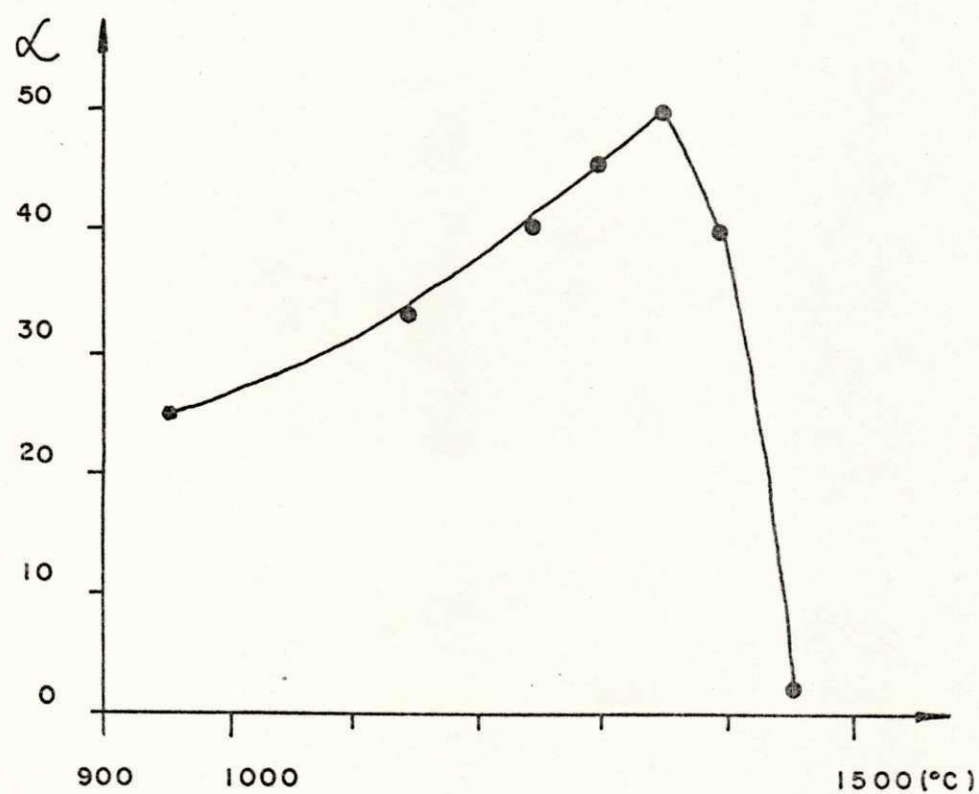


fig. 15. - Influência da temperatura de sinterização no coeficiente de não-linearidade (\mathcal{L}) [17]

6.1. MICROESTRUTURA E COMPORTAMENTO FÍSICO DOS RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ZnO

As figs. 16. e 17. mostram a microestrutura, real e ideal respectivamente, de um resistor não linear à base de óxido de zinco. O resistor consiste basicamente de grãos condutores de ZnO, de tamanho d , envoltos por camadas intergranulares de óxido isolante de espessura t .

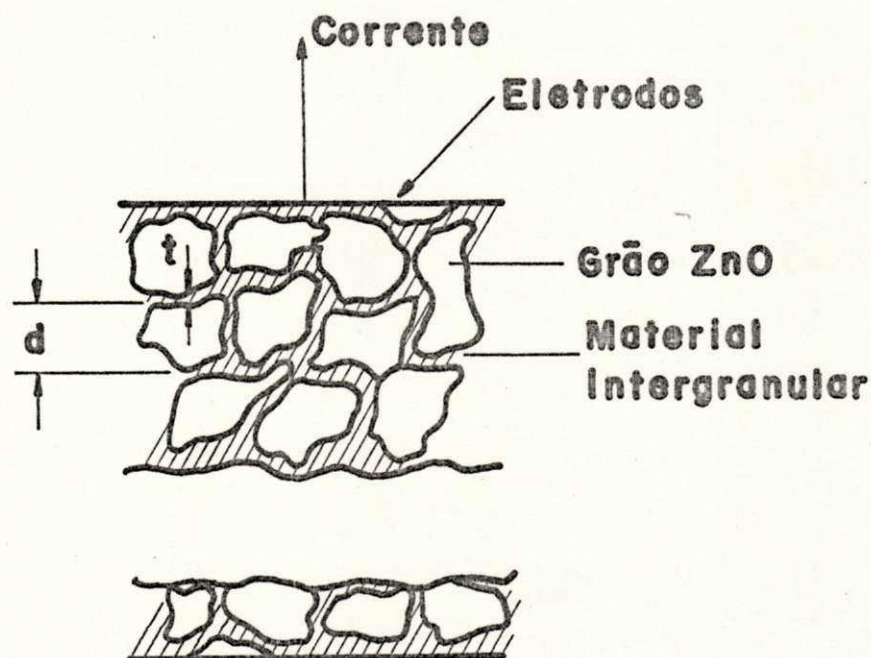


fig. 16.- Microestrutural Real do resistor não linear à base de ZnO
[02, 07, 08, 11, 14]

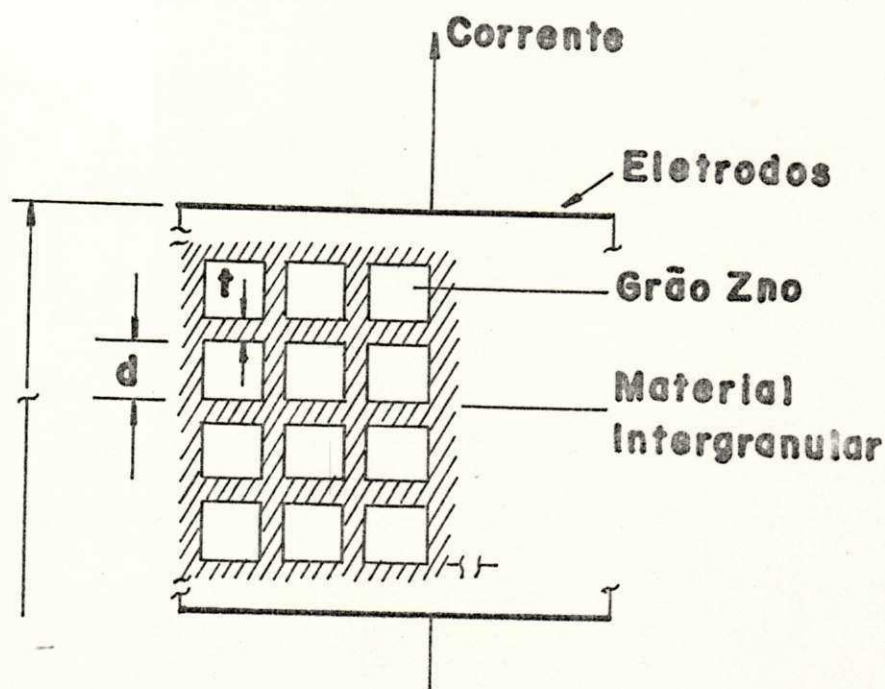


fig. 17. - Microestrutural Ideal do resistor não linear à base de ZnO
[02, 07, 08, 11, 14]

A análise das fronteiras dos grãos é feita por EDA, referência [17], que classifica as fronteiras, de uma maneira geral, em três tipos de estruturas. A primeira fronteira do grão, (Tipo I), denominada de fase líquida, é formada durante a sinterização do bloco, tendo a camada intergranular rica em Bi₂O₃ a espessura de (0.1 - 1 μm) representada na figura 18, sendo atribuída a mesma o acúmulo de buracos na envoltória dos grãos. O Tipo II de estrutura, mostrado na figura 18, possui a camada intergranular mais fina (10 - 1000 Å), aproximando os pontos de contato dos grãos. Finalmente, o Tipo III de estrutura, onde existe contato dos grãos, não distinguindo-se a camada intergranular podendo ser observados, apenas, através de microscópios adequados, também é mostrado na figura 18.

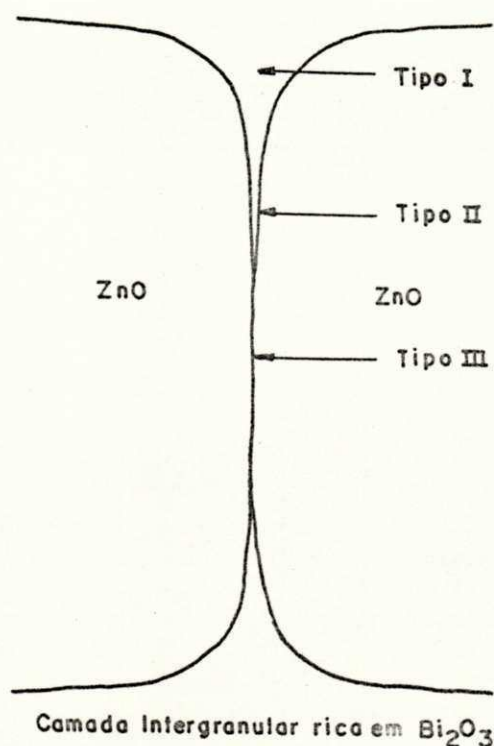


fig. 18 - Tipos de fronteiras dos grãos na microestrutura dos resistores não lineares à base de ZnO [17]

Os grãos de óxido de zinco, na microestrutura dos resistores não lineares à base de ZnO, possuem dimensões médias de 10 a 25 μm e as camadas intergranulares, constituídas pela solidificação do óxido de bismuto (Bi_2O_3), com 50 a 200 Å de espessura - sendo responsáveis pela formação de barreiras eletricamente isolantes e disposta na forma série / paralelo. Esta combinação dá origem a um elemento não linear [14, 15].

Para que haja uma distribuição uniforme de corrente pelo resistor não linear à base de ZnO, é necessário que o número de barreiras isolantes entre dois pontos seja o mesmo, por qualquer caminho entre ambos, assegurando assim, uma mesma impedância para qualquer caminho. A ocorrência de não-homogeneidade no resistor não-linear à base de ZnO gera uma distribuição irregular de corrente e, conseqüente aquecimento localizado na microestrutura [05].

A característica elétrica do resistor não linear à base de óxido de zinco é totalmente dependente do seu processo de fabricação. Para se obter um resistor não linear de elevada vida útil e capaz de absorver grandes quantidades de energia é preciso que haja uma homogeneidade na dopagem durante o processo de fabricação. O circuito elétrico equivalente do resistor não linear à base de ZnO é mostrado na fig. 19 [15].

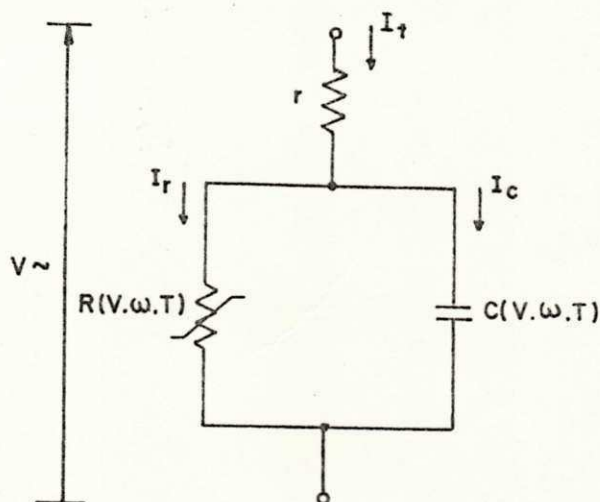


fig. 19. - Circuito elétrico equivalente
[08, 02]

Onde os valores de R e C estão associados a camada intergranular, sendo função basicamente do campo elétrico, da frequência e da temperatura; r representa a resistência dos grãos de ZnO, que, por ter valor pequeno, só é importante na região de altas correntes [08, 02].

A camada intergranular se apresenta como uma barreira isolante, até que sua tensão de ruptura é atingida, daí passa a ser condutora. O campo elétrico capaz de causar a descarga no bloco F_b para uma densidade de corrente de 1 mA/cm^2 é aproximadamente $1,3 \text{ KV/cm}$, portanto a tensão de ruptura pode ser vista pela relação abaixo, admitindo-se grãos de tamanho médio de 20 um e camada intergranular 1 um [20].

$$V_g = F_b \times d = 2,6 \text{ V} / \text{barreira} \quad (17)$$

Na referência [20], LEVINSON e PHILIPP relatam que a constante dielétrica (ϵ) típica do resistor não linear à base de ZnO é aproximadamente 1000 e a capacitância das camadas é dada por:

$$C_i = \epsilon_g \times \epsilon_0 \times A / (D \times t / d) \Rightarrow$$

$$C_i = (d / t) \times \epsilon_g \times \epsilon_0 \times A / D \quad (18)$$

Onde : $d / t = 100$

$$\epsilon_g = 10$$

$$d = 10 \text{ um}$$

$$t = 50 \text{ a } 200 \text{ Ao}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$$

A tensão de ruptura é diretamente proporcional a uniformidade dos grãos de ZnO e a espessura das camadas intergranulares. A ocorrência de ruptura localizada é devido a não uniformidade estrutural do resistor não linear à base de óxido de zinco.

O número e o tamanho dos grãos de ZnO, associados à disposição e espessura das camadas intergranulares, determinam a tensão de ruptura dos resistores não lineares à base de ZnO e a tensão nominal.

A curva característica $V \times I$ dos pára-raios formados pela associação série ou série-paralelo de resistores não lineares à base de ZnO é dividida em quatro regiões distintas, conforme sua declividade e os valores de corrente.

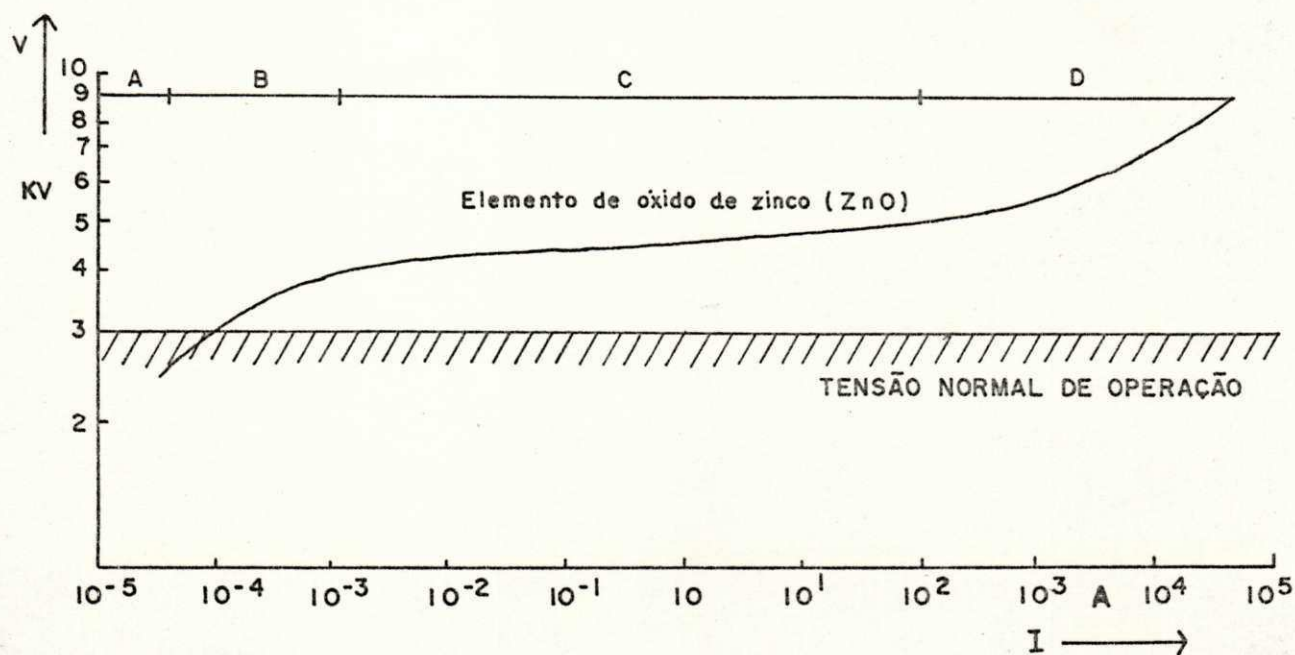


fig. 20 - Curva característica dos resistores não lineares à base de ZnO
[02, 08, 20]

Região A - região linear

Região B - região de pré-ruptura

Região C - região de ruptura

Região D - região de "UP TURN"

Analisando a curva da fig. 20, apenas com respeito a corrente, podemos redividi-la em duas regiões:

Região 1 (A + B) - Região de baixa corrente, é a região em que pelos resistores não lineares à base de ZnO fluirá correntes equivalentes a tensão contínua de operação, onde a corrente é basicamente capacitiva e o material é sensivelmente dependente da temperatura. Esta dependência pode ser descrita em termos de uma energia de ativação [02, 08, 20].

$$I = I_0 \exp (- e\phi / K \times t) \quad (19)$$

Onde: $e\phi = 0,6 - 0,8$ eV e temperatura $t = 300^{\circ}$ K

$K =$ constante de Boltzmann (= $0,86 \cdot 10^{-4}$ eV/K)

Região 2 (C + D) - Região de alta corrente, é a região onde ocorre a ruptura e praticamente não há uma dependência com a temperatura, já que o comportamento do resistor não linear depende dos grãos de ZnO [02, 08, 20].

A dependência da corrente x tensão pode ser descrita pela equação 20.

$$I = K_d \times V^{\mathcal{L}} \quad (20)$$

Onde V é a tensão aplicada, I é a corrente que flui no bloco, K_d é uma constante dependente do material e \mathcal{L} é o coeficiente de não linearidade que pode se encontrado pela expressão 21.

$$\mathcal{L} = d (\log I) / d (\log V) ==>$$

$$\mathcal{L} = (\log I_2 - \log I_1) / (\log V_2 - \log V_1)$$

(21)

Onde V_1 e V_2 são as tensões correspondentes as correntes I_1 e I_2 respectivamente.

6.2. MECANISMOS DE CONDUÇÃO

Em 1989, EDA [17], relata várias teorias a respeito do mecanismo de condução dos resistores não lineares à base de ZnO, enfatizando o fato desse mecanismo não ser explicado claramente. Por outro lado, não sendo objetivo deste trabalho o estudo aprofundado do mecanismo de condução, apenas algumas hipóteses teóricas citadas superficialmente por EDA, são expostas. O progresso na pesquisa do mecanismo de condução dos resistores não lineares à base de ZnO é mostrado na tabela 3. São oito os modelos propostos.

O primeiro modelo proposto por Matsuoka, foi o estabelecimento do " carga espacial limitadora de corrente " - (SCLC) " na camada intergranular. O segundo modelo foi " Tunelamento pela tênue fronteira do grão " de Levinson e Phillipp. O terceiro modelo foi o " Tunelamento pelas barreiras de Schottky causado pelos estados de interface ". Nesse caso, são propostos dois modelos. Um não leva em consideração as heterojunções compostas de ZnO e pela camada intergranular. Alguns artigos supuseram que o tipo III de estrutura, que foi descrito no item 6.1 deste capítulo, era essencial para a alta não linearidade. O outro modelo leva em consideração as heterojunções (grão-camada intergranular). O quarto modelo foi " Tunelamento pelas barreiras de Schottky com a formação de buracos ". O modelo demonstrou a importância dos buracos nas fronteiras dos grãos. O quinto modelo foi " Tunelamento paralelo pelas homojunções (grão-grão) de ZnO ", que mostra a importância entre o equilíbrio térmico e os defeitos formados durante a refrigeração das barreiras dos grãos. O sexto modelo foi " Buracos formados pela descarga ". O diagrama da banda de energia é mostrado na figura 21. De acordo com essa teoria, a alta não linearidade característica do resistor não linear à base de ZnO é causada pelo baixo potencial das barreiras nas fronteiras dos grãos devido a acumulação de buracos. Os buracos são criados pela aceleração dos elétrons na região de depleção. O potencial das barreiras depende dos estados de interface e dos volumes dos traps. O sétimo modelo foi o " Efeito bypass ", o qual representa a importância dos buracos da camada intergranular na região de baixa corrente e supõe que o caminho da corrente paralela através das heterojunções e da camada intergranular deve ser como mostra a figura 22. A fig. 22(a) ilustra a estrutura típica grão-barreira. A fig. 22(b) mostra o diagrama esquemático da banda de condução, e a fig. 22(c) mostra o circuito equivalente. O oitavo modelo foi " Corrente espaço-carga induzida na heterojunção " composta pela tênue película de ZnO e Bi₂O₃.

De acordo com essa linha de pensamento, o modelo da ruptura buracos induzidos, afirma EDA [17] aparentemente pode ser consistente com o alto valor de \mathcal{L} , com a propriedade da alta não linearidade, o efeito do estado de interface, o efeito do volume dos traps, o mecanismo de criação de buracos e as propriedades dinâmicas. A adição do modelo bypass, ainda segundo EDA [17], parece ser coerente com as propriedades elétricas na região de baixa corrente, o efeito da camada intergranular na degradação, a ação do resistor não linear à base de ZnO observada com uma grande quantidade de Bi₂O₃ (figura 23) e a tênue película de ZnO - Bi₂O₃ da heterojunção.

TABELA 3 Progresso na pesquisa dos Mecanismos de Condução dos resistores não lineares à base de ZnO [17]

ANO	MODELO
1968	Invenção do varistor de ZnO (Matsuoka)
1968	Descoberta de vários tipos de aditivos
1970	
1971	Espaço-carga-corrente limitada (Matsuoka)
1972	
1973	
1974	
1975	Tunelamento pela tênue fronteira (Levinson e Philipp)
1976	Tunelamento pelas barreiras de Schottky (Morris e Bernasconi)
1977	Tunelamento pelas barreiras de Schottky com heterojunções (Emtage)
1978	Tunelamento pelas barreiras de Schottky com heterojunções (Eda)
	Tunelamento pelas homojunções (Einzinger)
1979	Tunelamento pelas barreiras de Schottky (Hower e Gupta)
	Tunelamento pelos buracos da barreira de Schottky (Mahan, Levinson e Philipp)
1980	
1981	
1982	Efeito bypass pelas heterojunções (Eda)
1983	
1984	Descarga induzida através dos buracos (Pike)
1986	Efeito bypass pelas heterojunções (Levinson e Philipp)
	Descarga induzida através dos buracos (Blatter e Greuter)
1987	Corrente induzida pelo espaço-carga (Suzuoki)
1988	

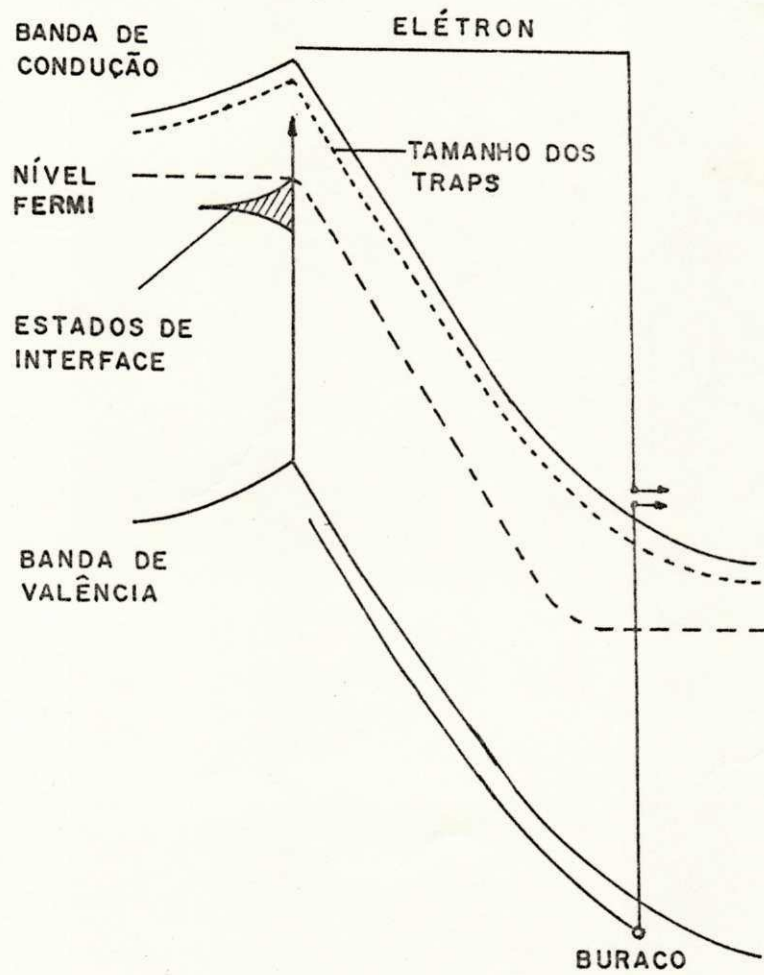
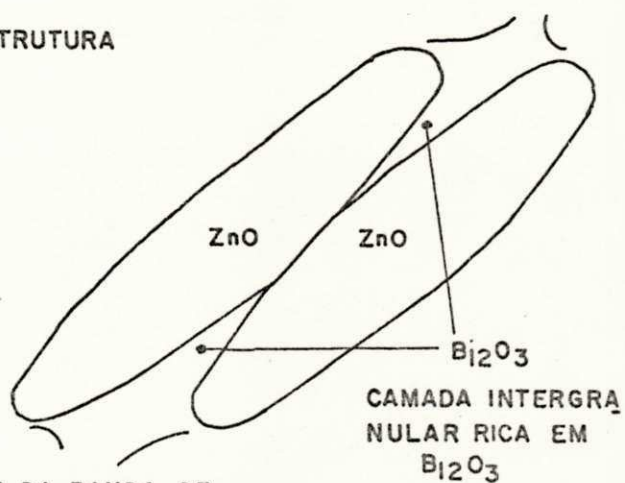
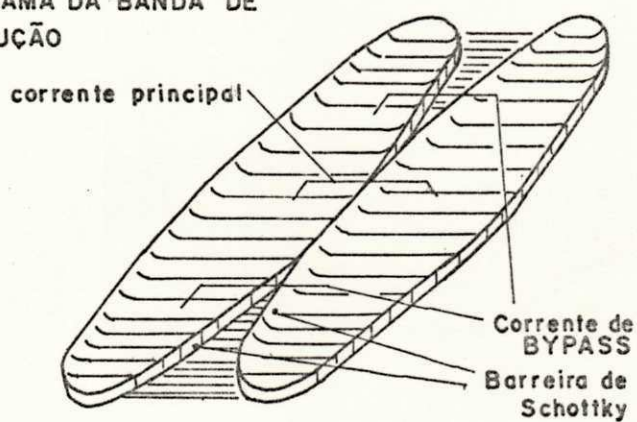


Fig. 21 - Diagrama da Banda de Energia [17]

(a) MICROESTRUTURA



(b) DIAGRAMA DA BANDA DE CONDUÇÃO



(c) CIRCUITO EQUIVALENTE

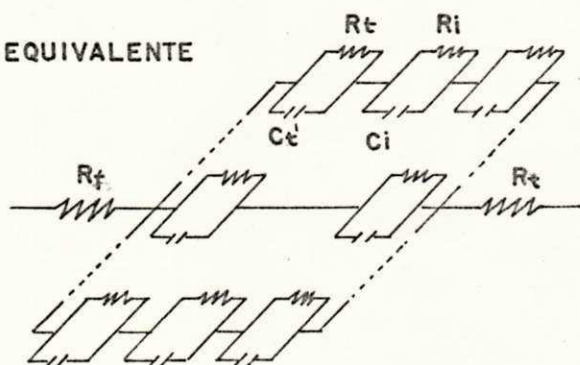


Fig. 22 - Diagrama do modelo Bypass para as variedades de estrutura grão-barreira [17]

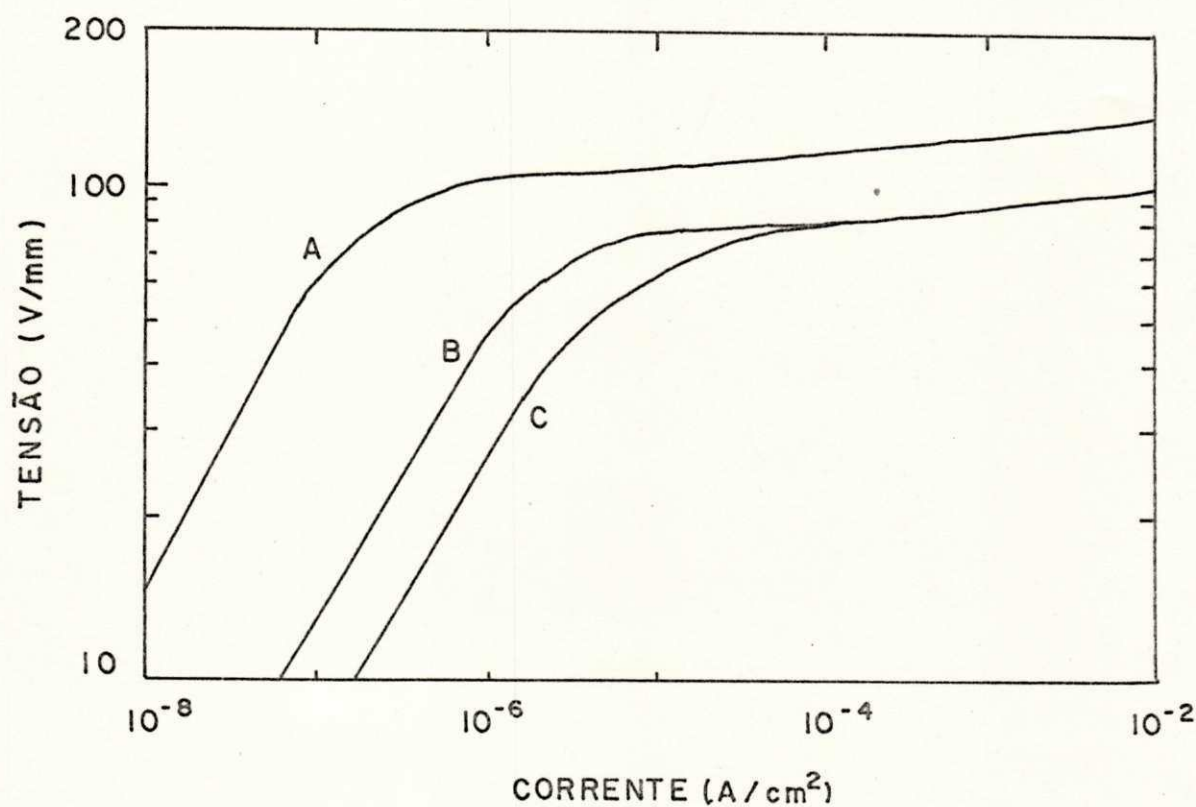


Fig 23 - Característica do varistor de ZnO para diferentes quantidades de Bi₂O₃. Curva A: 1 mol% de Bi₂O₃, CoO e Sb₂O₃, 0.5 mol% de MnO e 96.5 mol% de ZnO; Curva B: 5 mol% de Bi₂O₃, 1 mol% CoO, e Sb₂O₃, 0.5 mol% de MnO e 92.5 mol% de ZnO; Curva C: 10 mol% de Bi₂O₃, 1 mol% de CoO, e Sb₂O₃, 0.5 mol% de MnO, e 87.5% de ZnO [17]

A análise sobre a localização da barreira elétrica no resistor não linear à base de ZnO, feita na referência [18], levanta várias considerações a partir de resultados obtidos do estudo microestrutural.

Esse estudo microestrutural revelou que a margem do grão de ZnO é excessivamente dopada com Bi, com a concentração de Bi diminuindo conforme se aproxima o centro do grão. Essa difusão da camada de Bi acredita-se ter sido formada durante a sinterização e o grão cresce pela substituição de Bi por Zn. A concentração de outros dopantes, Sb, Mn, Cr, etc., é baixa nessa região, mas são uniformemente distribuídos no resto dos grãos de ZnO. Portanto, parece existir uma diferença na química do grão de ZnO desde a borda até o centro. O volume de ZnO pode ser imaginado como sendo composto por tais grãos de ZnO, onde há a diferença de potencial químico do Bi desde a borda até o centro e vice versa para outros dopantes. O grão de ZnO parece tocar um no outro em certas regiões, entretanto em outras regiões existe uma camada intergranular presente entre os grãos. A camada intergranular é rica em Bi, bem como de outros dopantes. A difusão da camada de Bi nos grãos de ZnO está presente se existir camada intergranular presente ou não.

As investigações a respeito da localização da barreira elétrica foi atribuída a camada intergranular entre os grãos de ZnO. Levinson e Philipp (artigo publicado no J. Appl. Phys. 46, 1332 (1975), citado na referência [18]) julgaram que os grãos de ZnO tinham uma condução perfeita e eram cercados por aditivos óxidos como uma forma de barreira para a condução elétrica. Eles atribuem que a camada intergranular tem espessura na ordem de aproximadamente 100 Å para funcionar o tunelamento de Fowler-Nordheim. Matsuoka (artigo publicado no Jpn. J. Appl. Phys. 10, 736 (1971), citado na referência [18]) também acredita que a localização das barreiras está na camada intergranular e sugere a carga espacial limitando a condução. Ele atribui que a espessura da barreira é da ordem de 1 um. Em ambas as investigações, o grão tem assumido uma alta condutividade, e tem o papel de suportar a tensão diante da descarga. Tais modelos, segundo a referência [18], implicaria que um grão de ZnO pode ser substituído por partículas metálicas, o qual quando circundado por óxido mostraria a ação similar do resistor não linear à base de ZnO. Isso, de acordo com a referência [18], ainda não foi demonstrado.

A observação feita por Clarke (artigo publicado no J. Appl. Phys. 49, 2407 (1978), citado na referência [18]) é usada para a reexaminação dos mecanismos do resistor não linear à base de ZnO. Clarke (artigo publicado no Am. Ceram. Soc. Annual Mtg., Detroit, 1978, citado na referência [18]), observou que de 98 barreiras de grãos examinadas, em apenas 5 foram observadas a camada intergranular. Esse estudo também revelou que poucos grãos de ZnO estão associados com a fase intergranular. Considerando que a maioria dos grãos estão em contato direto uns com os outros, é improvável que a camada isolante intergranular contribuirá significativamente para a condução (p.ex., tunelamento) como proposto por Levinson e Phillip. De fato, o recente estudo de Einzinger (artigo publicado no Appl. Surf. Sci., 1, 329 (1978), citado na referência [18]) demonstrou na realidade que, a ação do varistor está na fronteira diretamente sobre o grão. Esses grãos como são separados por detectáveis camadas intergranulares são isolados eletricamente uns com os outros. Isto sugere que a barreira nos varistores de ZnO reside na vizinhança da fronteira dentro dos grãos de ZnO que estão em contato e não na barreira isolante intergranular. Com isto, provavelmente a camada da barreira é desenvolvida devido a diferença química no próprio grão de ZnO. Baseado nesse argumento, duas possíveis localizações da barreira elétrica são sugeridas pelos pesquisadores da Westinghouse.

Primeiro, a barreira pode existir perto da borda dos grãos de ZnO. A diferença química entre a borda e o centro pode causar que tais barreiras sejam desenvolvidas. Esta hipótese é similar aquela proposta por Emtage (artigo publicado no J. Appl. Phys. 48, 4372 (1977), citado na referência [18]). Onde ele declara que uma dupla camada de depleção é formada no grão de ZnO e a camada de depleção é o principal obstáculo para a condução. Esse modelo naturalmente, assume a camada intergranular de traps elétrons e a carga é prontamente transferida através dessa camada. A segunda possibilidade é que a barreira existe na região de transição entre a borda altamente dopada do grão de ZnO (região de depleção) e a fronteira do grão. Aqui, a carga positiva na região de depleção é compensada pela superfície da carga negativa da fronteira do grão (a condição de fronteira do grão). Esse modelo requer apenas a região desordenada na fronteira do grão e não na fase intergranular, e assim satisfaz perfeitamente os requisitos microestruturais de limitador de tensão. Essa hipótese é similar a que foi originalmente proposta por Levine (artigo publicado no CRC. Crit. Rev. Solid-State Sci. 5, 597 (1975), citado na referência [18]) e posteriormente desenvolvida dentro do modelo de Hower e Gupta (artigo publicado no J. Appl. Phys. 50 (7), 4847 (1979), citado na referência [18]).

No parágrafo anterior foi dito que a barreira podia existir perto das bordas dos grãos de ZnO e que a segunda possibilidade seria a existência de uma região de transição entre a borda do grão altamente dopada e a fronteira do grão. Isto resulta que a tensão por grão, V_g , irá permanecer constante independente do tamanho do grão, quanto maior for o grão mais adequadamente será dopado durante a sinterização. Com essa concepção o grande número de grãos por unidade de espessura da cerâmica, a maior tensão está no começo da não linearidade e vice versa. A tensão, V , pode ser expressa por $V = N_g \times V_g$, onde N_g é o número de grãos em série dentro da amostra. O número de grãos N_g está relacionado com a espessura da amostra, l_g , pela relação $N_g = l_g/d$, onde d é o tamanho do grão. Assim, V_g , pode ser determinado pelo conhecimento de d , l_g e V .

Segundo a referência [18], o método experimental consiste em medir V a 1 mA (para a curva $V \times I$), a espessura e N_g (número de grãos / cm). N_g é obtido da análise microestural, primeiro pela medição do tamanho do grão (μm) e dividindo o tamanho médio por $10^4 \mu m/cm$ para obter N_g . Considerando o tamanho da amostra de 2 cm de diâmetro \times 0.3 cm de espessura. Cinco composições foram investigadas com 0.5 a 10 mol de aditivo. Esses aditivos foram Bi_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 , Sb_2O_3 . Variações das condições de sinterização, foram empregadas para se obter vários tamanhos de grãos. Os dados da curva $V \times I$ foram obtidos com osciloscópio Tektronix (tipo 576). A máxima corrente empregada foi 10 mA.

Os resultados medidos são plotados no gráfico da figura 24. A figura mostra (V / cm) \times (o número de grãos / cm), o qual fornece um conjunto de pontos cuja inclinação média foi de 2.2 V/g (V_g) com desvio padrão (s) de 0.33 V/g. O gráfico da fig.24 também ilustra a variação do tamanho do grão em cima do qual os dados foram coletados. Ele constata que a tensão por grão (V_g) é constante em cima da variação do tamanho do grão considerado e da concentração dos aditivos. O desvio da constância no grão de tamanho pequeno ou na larga concentração de aditivos. É possível também que os desvios possam ocorrer com outros gêneros de aditivos. Os dados são em geral combinados com os dados mostrados nas literaturas. Entretanto, as composições dos dados das literaturas não são precisamente conhecidas.

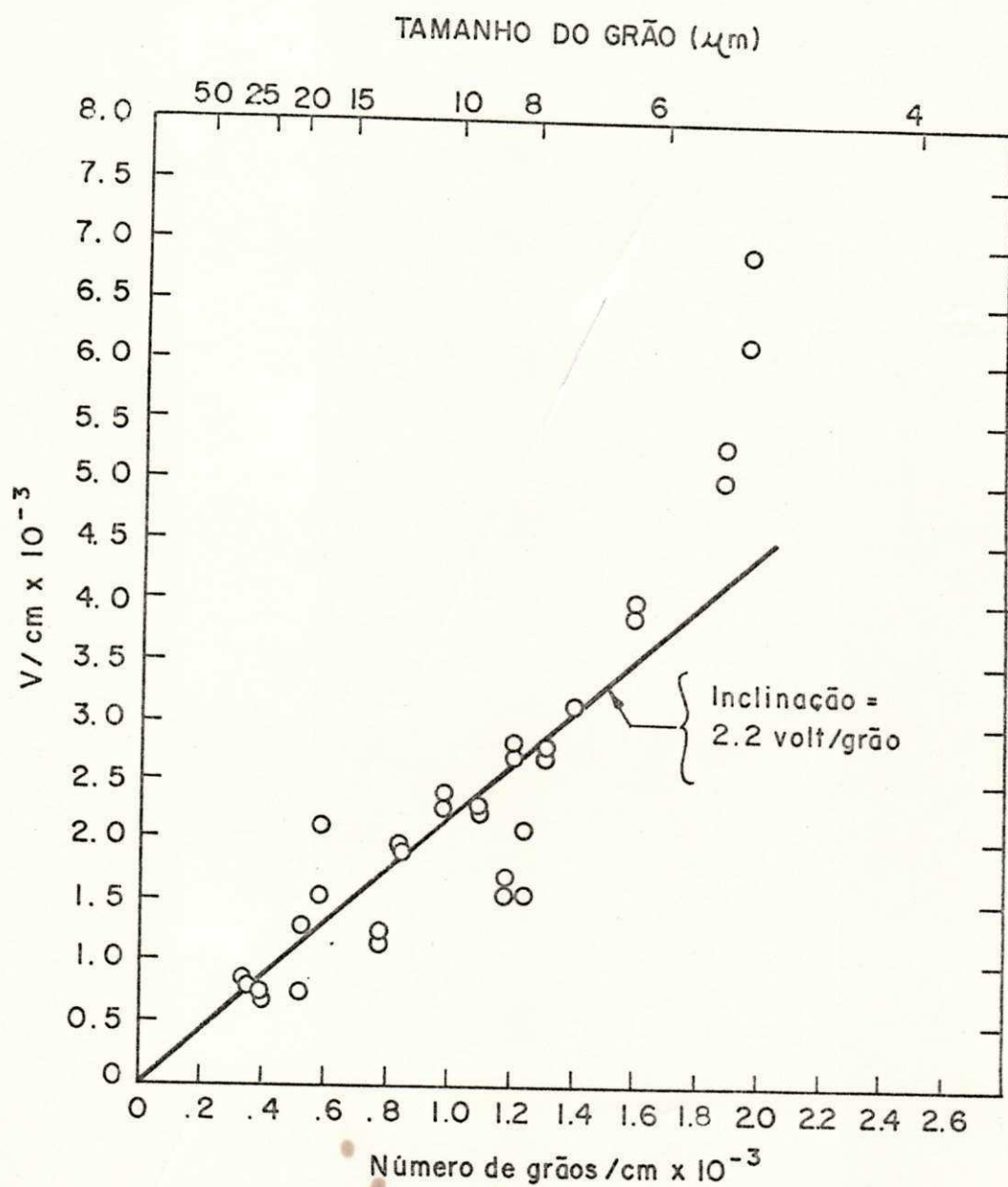


fig. 24 - V/cm x grão/cm para resistores não lineares à base de ZnO contendo grãos de vários tamanhos [18]

6.3. DEGRADAÇÃO DOS RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ZnO

Segundo a referência [11], a característica da camada intergranular dos resistores não lineares à base de óxido de zinco pode ser degradada pelos seguintes efeitos: degradação por reação química ao redor do grão, degradação pelo esforço da tensão e degradação pelo esforço da corrente.

A degradação por reação química acontece quando ao redor do material contém moléculas gasosas indesejadas, isto é, como radicais químicos, o óxido na camada intergranular irá reagir quimicamente com esses gases. Tais gases podem ser formados em serviço, isto é, descargas corona dentro do invólucro de porcelana, mas a reação química tem que ser evitada por um design adequado, ou seja, por uma camada impermeável na superfície do resistor não linear à base de ZnO.

A degradação pelo esforço da tensão de operação de temperatura ambiente proporciona uma lenta mudança no próprio material granular. É geralmente denominado como envelhecimento do material. O grau deste depende da natureza da qualidade da camada intergranular e pode ser reduzido para uma escala desprezível.

A degradação provocada pelos esforços das correntes de grandes intensidades através do resistor não linear à base de ZnO pode guiar para uma excessiva densidade de corrente local, através da camada granular (intergranular), logo destruindo-a parcialmente. Contudo, materiais obtidos atualmente quase não apresentam este tipo de degradação, pois correntes localizadas dependem bastante da granulometria dos óxidos, como também, do processo de fabricação.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descreve-se as características dos materiais e os métodos utilizados para o estudo da polarização residual nos resistores não lineares à base de ZnO.

1. MATERIAIS

Os resistores não lineares à base de óxido de zinco apresentam excelentes características elétricas e térmicas, tais como, alta não linearidade, alta capacidade de absorção de energia, melhor estabilidade e resposta aos impulsos de alta taxa de crescimento, melhores características de proteção, projeto e construção mais simples, não apresenta disrupção brusca e o efeito da poluição é bastante reduzido.

A alta não linearidade é a mais importante característica dos resistores não lineares à base de ZnO. Operacionalmente, os resistores não lineares atuam como isolantes na região de baixa corrente e como condutores na região de alta corrente, sendo esta mudança de estado isolante / condutor definida pelo coeficiente de não linearidade α , mencionado no Capítulo II deste trabalho.

A alta capacidade de absorção de energia é também uma característica relevante para a utilização dos resistores não lineares à base de ZnO, tanto nos varistores de baixa potência como nos pára-raios tipo estação. Os equipamentos elétricos de proteção estão sujeitos aos mais diversos tipos de sobretensão. As sobretensões atmosféricas com forma de onda 8 / 20 μ s, com grandes correntes, e as sobretensões temporárias requerem dos resistores não lineares grande capacidade de absorção de energia. Nos estudos da General Electric Company, referência [29], tem sido mostrado que com a aplicação de energia tão grande quanto 500 J / cm³, os resistores não lineares mantêm suas características elétricas e de reabilitação, embora microcavidades apareçam do súbito aquecimento localizado.

Os resistores não lineares à base de ZnO apresentam melhor estabilidade e resposta aos impulsos de alta taxa de crescimento porque, a sua transição do estado de isolante para condutor se dá de forma suave sob a curva $V \times I$, porém de forma bastante rápida (10^{-8} s) e de maneira reversível.

O projeto e construção dos pára-raios de ZnO é simples porque é possível o uso dos resistores não lineares tanto em associação série como série-paralelo, mantendo suas características. A associação em série proporciona um aumento da tensão nominal e a associação série-paralelo permite o incremento da capacidade de absorção de energia.

Como sempre existe a circulação de corrente nos pára-raios sem gap à base de ZnO, o efeito da poluição / contaminação da porcelana só implica no aumento da corrente de fuga, permitindo a lavagem despoluidora sem o risco de uma disrupção indevida.

As melhores características de proteção dos sistemas elétricos em geral, são obtidas com a utilização dos pára-raios formados por resistores não lineares à base de ZnO, porque os mesmos reúnem todas as excelentes propriedades elétricas e térmicas comentadas acima.

Os resistores não lineares à base de ZnO utilizados durante todo o experimento possuem características e padrão de qualidade internacional. Em acordo para cessão dos resistores, o fabricante não permite a divulgação das dimensões, fotografias ou algum dado que possa identificá-los. Os resistores utilizados nos experimentos são de um único fabricante, devido as dificuldades de compra e de cessão por parte dos fabricantes nacionais e internacionais.

A máxima tensão de operação contínua (mcoV) para os resistores não lineares utilizados é de 2,4 KV.

2. MÉTODOS

Com o intuito de se atingir os objetivos propostos para este trabalho, três arranjos experimentais foram necessários. Inicialmente foram realizados os ensaios para medição de capacitância e tangente de perdas, como também, a medição dos níveis de descargas parciais em todos os resistores não lineares à base de óxido de zinco. As medições visavam garantir a qualidade de todas as amostras a serem analisadas nos ensaios propostos para este trabalho. Posteriormente, os ensaios para a obtenção da polarização e verificação da tensão residual foram realizados no gerador de impulso. Os circuitos acima citados são explicados nos anexos A, B e C.

O gerador de impulsos de corrente utilizado na polarização dos resistores não lineares à base de ZnO é de fabricação HAEFELY 100KV, 100KA, com formas de onda 8 / 20 us, 0,5 / 9 us e onda quadrada, onde um grande número de alternativas para geração do impulso de corrente exponencial é possível com a variação dos parâmetros do gerador. O circuito do gerador pode ser dividido em uma parte de gatilhamento, e em outra destinada a obtenção da forma de onda desejada, onde este último é um circuito RLC série. Os parâmetros R, L e C são em forma de steps que podem ser conectados ao circuito, sendo seus valores escolhidos de acordo com o tipo de impulso desejado. A configuração do circuito, simplificado, para geração é mostrado nas figuras 25 e 26. O anexo C mostra o cálculo dos parâmetros de um gerador tipo série.

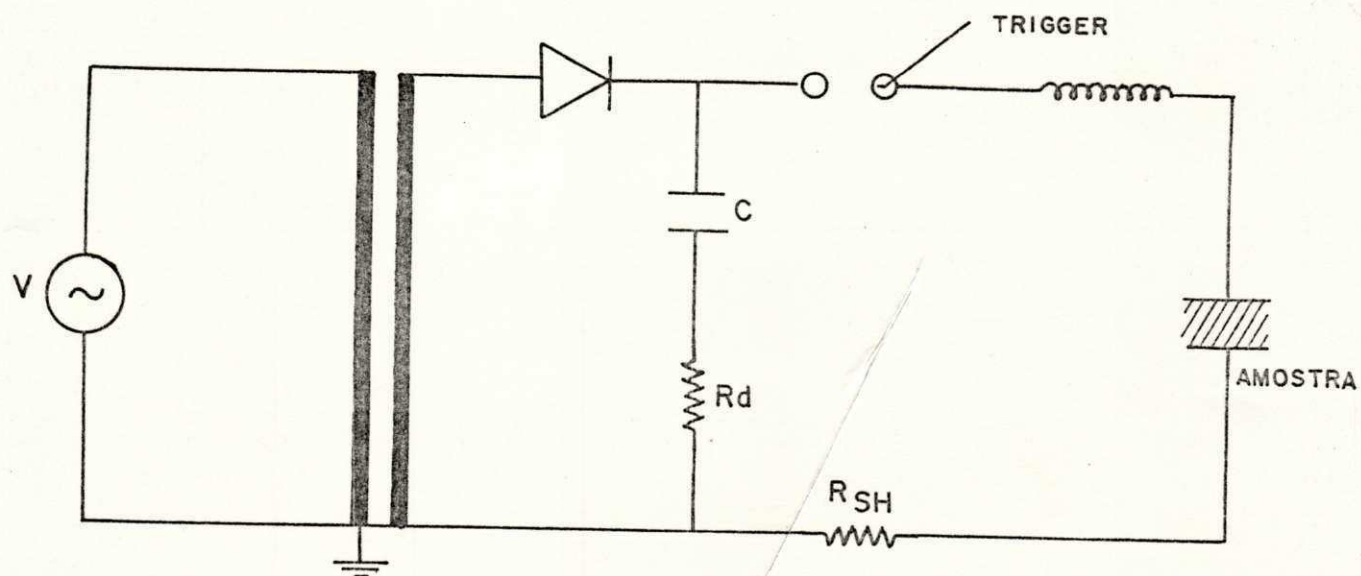


fig. 25 - Circuito simplificado para geração de impulsos de corrente [16]

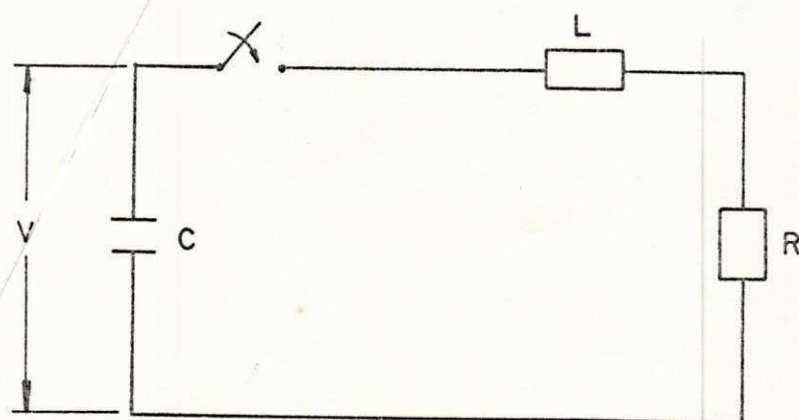


fig. 26 - circuito equivalente da fig. 25

O gatilhamento do gerador (TRIGGER) é feito através de um sistema de esferas vertical (Sparkover), enquanto que, o carregamento do banco de capacitores cabe ao variac, à resistência de carregamento e à ponte de retificação. As variações nas resistências e nas indutâncias, proporcionarão a obtenção de diferentes formas de onda. Enquanto a escolha da tensão de carregamento produzirá diferentes amplitudes de corrente. Este gerador de impulso possui um sistema de controle eletrônico do tempo de carregamento dos capacitores, permitindo intervalos iguais para as descargas.

A medição da capacitância e da tangente de perdas foi feita obedecendo a montagem do circuito da fig. A.5, descrito no anexo A, e com monitoramento da corrente total. As medições foram realizadas nas tensões de 0,9 mcov, 1,0 mcov e 1,1 mcov. Os valores da temperatura dos resistores não lineares à base de ZnO foram medidos durante todos os experimentos, através de um termômetro digital que proporcionava a leitura à distância.

As medições dos níveis de descargas parciais foram executadas em todos os resistores não lineares à base de ZnO, logo após a medição de capacitância e de tangente de perdas.

O circuito utilizado para a medição dos níveis de descargas parciais foi o circuito tipo A, sugerido pela ABNT [21]. A escolha do circuito A deveu-se a questão de segurança, pois o mesmo diminui sensivelmente o risco de vida para o operador e de danos para os equipamentos de detecção. A tensão utilizada para as medições de descargas parciais foi sempre de 1,0 mcov (= 2400 V), onde mcov é a máxima tensão de operação contínua do pára-raios. A montagem experimental do circuito é descrita pela figura B.8 do anexo B.

Os níveis de descargas parciais foram monitorados através do próprio detector BIDDLE, como também de um osciloscópio para visualização das descargas e sua identificação. O monitoramento foi realizado com todas as amostras por um período de uma hora, sendo anotadas todas as ocorrências. Não havendo anormalidades, os níveis de descargas parciais eram registrados a cada dez minutos.

Para assegurar o bom rendimento do circuito de medição de descargas parciais, foi utilizado um capacitor de acoplamento de 6400 pF, bem superior a capacitância do resistor não linear à base de ZnO, de aproximadamente 1000 pF. Antes dos ensaios de medição dos níveis de descargas parciais foram realizadas as calibrações dos instrumentos.

A calibração do circuito de ensaio de descargas parciais foi feita direta e indiretamente como é descrito no anexo B. Na calibração direta, através de um capacitor padrão de 150 pF, de baixa tensão, injetou-se pulsos de tensão que proporcionavam descargas de 10 pC no circuito de ensaio, então, o detector era ajustado para este valor. A calibração indireta foi feita logo após, comparando-se com a calibração direta, e os pulsos no osciloscópio. Com este procedimento evita-se que haja necessidade de se realizar uma nova calibração direta toda vez que se utiliza utiliza o circuito com capacitores de mesma ordem de grandeza, além do que, sendo de baixa tensão o gerador e o capacitor utilizados na geração das cargas da calibração direta, os mesmos têm que ser retirados do circuito no transcorrer do ensaio em alta tensão. Deste modo, é possível reajustar o circuito sem a necessidade de desligar a fonte de alta tensão.

O ensaio de descargas parciais foi realizado em uma sala blindada com folhas de zinco, evitando-se, assim, as interferências eletromagnéticas do meio exterior.

Para constatação do nível de ruído gerado no ambiente de ensaio, substituiu-se os resistores não lineares à base de ZnO, por um bloco de polietileno com as mesmas dimensões, constatando-se que na aplicação de 15 KV (eficaz), o ruído ficou abaixo de 1 pC. A tensão de ensaio não ultrapassou 2,8 KV (eficaz).

Na montagem de descargas parciais, também foi feito o monitoramento da corrente total através de um osciloscópio. O sinal foi obtido através de um resistor shunt de 1024 Ohms.

Após a seleção dos resistores não lineares à base de óxido de zinco, através dos ensaios de capacitância, tangente de perdas e descargas parciais, garantiu-se que as amostras se encontravam dentro do padrão de qualidade necessário ao bom desempenho dos trabalhos. Com as amostras selecionadas foram feitos os experimentos descritos a seguir.

2.1. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO COM O TEMPO

Este procedimento experimental tem o intuito de estudar o efeito da polarização com o tempo, para isto, os resistores não lineares à base de óxido de zinco foram submetidos à impulsos de corrente com forma de onda 8 / 20 us, tendo amplitudes da ordem de 15 KA e 11 KA, na plataforma do gerador de impulso HAEFELY, mostrado pelo circuito da figura C.3, anexo C. A tensão de carregamento dos capacitores foi de 26 KV e 34 KV e os valores dos parâmetros R, L e C foram calculados conforme é descrito no anexo C.

O tempo de carregamento foi de 60 segundos, com intervalos entre os impulsos de 120 segundos, assim escolhido, para que os capacitores de carregamento não fossem demasiadamente solicitados, evitando danos aos mesmos; simultaneamente necessitava-se que os resistores não lineares à base de ZnO realmente fossem estressados, portanto os intervalos entre os impulsos não poderiam ser longos.

Neste ensaio houve a variação de dois parâmetros, quantidade e polaridade dos impulsos, como mostra-se a seguir:

- AMOSTRA 1 - 50 impulsos positivos
- AMOSTRA 2 - 50 impulsos negativos
- AMOSTRA 3 - 30 impulsos positivos
- AMOSTRA 4 - 30 impulsos negativos
- AMOSTRA 5 - 30 impulsos negativos
- AMOSTRA 6 - 10 impulsos positivos
- AMOSTRA 7 - 10 impulsos negativos

Cada amostra, logo após estressada era instalado na montagem mostrada no circuito da figura B.8, anexo B, para a observação dos níveis de descargas parciais e da polarização através do monitoramento da corrente positiva e negativa. Os níveis de descargas parciais em cada amostra também foram observados após 3, 8 e 30 dias da aplicação dos impulsos de corrente.

2.2. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA POLARIZAÇÃO / DESPOLARIZAÇÃO

Esta etapa do trabalho tem o objetivo de estudar o efeito da temperatura na polarização / despolarização do resistor não linear à base de óxido de zinco. Para isso quatorze amostras selecionadas através de ensaios de tangente de perdas, capacitância e descargas parciais, foram submetidos à impulsos de corrente no gerador HAEFELY, com forma de onda do tipo 8 / 20 us com amplitudes da ordem de 15 KA e 11 KA, tensão de carregamento dos capacitores de 26 KV e 34 KV, tempo de carregamento de 60 segundos e intervalo de 120 segundos entre cada impulso. A sequência da aplicação dos impulsos, com variação da quantidade e da polaridade em cada amostra é descrita a seguir.

AMOSTRA 8 - 10 impulsos negativos

AMOSTRA 9 - 30 impulsos positivos

AMOSTRA 10 - 30 impulsos negativos

AMOSTRA 11 - 30 impulsos positivos

AMOSTRA 12 - 30 impulsos negativos

AMOSTRA 13 - 30 impulsos positivos

AMOSTRA 14 - 30 impulsos negativos

AMOSTRA 15 - 50 impulsos positivos

AMOSTRA 16 - 50 impulsos negativos

AMOSTRA 17 - 50 impulsos positivos

AMOSTRA 18 - 50 impulsos negativos

AMOSTRA 19 - 50 impulsos positivos

AMOSTRA 20 - 50 impulsos negativos

AMOSTRA 21 - 50 impulsos negativos

O nível de polarização de cada amostra foi observado no circuito mostrado na fig. B.8 do anexo B, com registro das correntes positiva e negativa, temperaturas ambiente e da amostra e nível de descargas parciais. As observações foram feitas com variação dos seguintes parâmetros: tensão e temperatura. As tensões usadas foram de 1,0 mcov e 1,16 mcov.

O procedimento experimental foi o seguinte: observação do nível de polarização, com tensão de 1,0 mcov, na temperatura imediatamente após o estressamento da amostra no gerador de impulso HAEFELY, com registro do nível de descargas parciais, corrente e temperatura; observação do nível de polarização da amostra, após o resfriamento até a temperatura ambiente, com tensão de 1,0 mcov, e registro do nível de descargas parciais, corrente e temperatura; observação do nível de polarização da amostra após aquecimento por efeito Joule, através do aumento da tensão para 1,16 mcov (durante 40 minutos), com o registro do nível de descargas parciais, corrente e temperatura; observação do nível de polarização da amostra na temperatura ambiente, com tensão de 1,0 mcov, e registro do nível de descargas parciais, corrente e temperatura.

Em algumas amostras, todo o procedimento descrito acima foi realizado 8 dias após a aplicação dos impulsos de corrente, com as mesmas observações e análises.

2.3. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO COM O TEMPO, COM A TENSÃO CONTINUADAMENTE APLICADA, E COM A TEMPERATURA

Duas amostras, previamente selecionadas, foram utilizadas para a verificação do efeito da polarização com o tempo, com a tensão continuamente aplicada, e com a temperatura. As amostras foram submetidas à impulsos de corrente com forma de onda 8 / 20 us e amplitudes da ordem de 15 KA e 11 KA no gerador HAEFELY, com tensão de carregamento dos capacitores de 26 KV e 34 KV, tempo de carregamento de 60 segundos e intervalo entre cada impulso de 120 segundos. Os dois resistores não lineares à base de ZnO foram estressados com 50 impulsos positivos e 50 impulsos negativos respectivamente, assim escolhidos, pois quanto maior o número de impulsos, mais evidente seria a polarização.

Imediatamente após a aplicação dos impulsos, as amostras foram colocadas no circuito de descargas parciais para a observação do efeito da polarização com o tempo e com a tensão continuamente aplicada. A observação e o registro dos valores foi feito através de osciloscópio na sequência descrita a seguir.

AMOSTRA 22 - 50 impulsos negativos

AMOSTRA 23 - 50 impulsos positivos

Ao osciloscópio foi conectada uma câmara fotográfica para registro das formas de onda da corrente.

A verificação do efeito da tensão continuamente aplicada no resistor não linear à base de óxido de zinco, foi feita na amostra 22, com a aplicação da tensão de 1,0 mcov durante 16 horas, utilizando-se o circuito mostrado na figura B.8, anexo B.

O efeito da temperatura sob a polarização foi realizado utilizando-se o circuito mostrado na figura B.8 do anexo B, com o aquecimento da amostra 23 por efeito Joule, com tensão de 1,16 mcov, durante 40 minutos, quando a temperatura do resistor não linear era equivalente a obtida na retirada do circuito de aplicação de impulsos de corrente. Outro procedimento comparativo foi a elevação da temperatura da amostra na estufa. Paralelamente, estudou-se o efeito da temperatura da amostra e a tensão continuamente aplicada.

2.4. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO SOBRE A TENSÃO RESIDUAL NOS RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ZnO

O procedimento experimental para a verificação do comportamento do resistor não linear à base de ZnO quando submetido à um impulso de corrente contrária a sua polarização foi o seguinte: a aplicação de dez impulsos em uma amostra reserva, com uma polaridade, para garantir a calibração e aferição do circuito gerador e de medição; a aplicação, na mesma polaridade, de um impulso na amostra principal, e as medições da corrente de impulso, tensão residual e temperatura da amostra; a aplicação na amostra principal de 50 impulsos de polaridade oposta, com o objetivo de se polarizar a amostra, sendo feitas as medições de corrente, tensão residual e temperatura no primeiro e quinquagésimo impulso; novamente o gerador e o circuito de medição foram calibrados como inicialmente; com a amostra principal polarizada, foi aplicado um único impulso de mesma intensidade e polaridade do inicial, com o objetivo de comparar os valores da tensão residual antes e após a polarização.

O circuito do gerador de impulsos HAEFELY, utilizado neste experimento é mostrado no circuito da fig. C.3 do anexo C. Para o monitoramento da tensão residual foi usado um osciloscópio, cujo sinal era obtido através de um divisor misto. A câmara fotográfica foi conectada ao osciloscópio e realizados os oscilogramas das amostras 24 e 25. Para confirmação dos valores obtidos, outras oito amostras foram submetidas a mesma sequência experimental, quatro de cada polaridade, sendo observados resultados semelhantes.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, disserta-se sobre os resultados obtidos através dos procedimentos experimentais cujas metodologias foram descritas no capítulo Materiais e Métodos, sendo os circuitos dos arranjos experimentais mostrados nos anexos A, B e C. Como já descrito no capítulo anterior, o procedimento experimental foi realizado em quatro etapas distintas. Apresenta-se a seguir, os resultados obtidos em cada etapa.

1. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO COM O TEMPO

O estudo proposto para este tema é discutir o efeito da polarização nos resistores não lineares à base de óxido de zinco no decorrer do tempo. A influência real do tempo na despolarização da amostra, e a dependência da polarização com a quantidade e a polaridade dos impulsos aplicados é a questão analisada. Os resistores não lineares à base de ZnO submetidos à 30 e 50 impulsos de corrente com forma de onda 8 / 20 us foram realmente polarizados. A polarização com o tempo e sem a aplicação da tensão é reduzida gradualmente, como mostra os gráficos das figuras 27, 28, 29, 30 e 31. Os gráficos mostram a relação entre as correntes de polarização e a corrente no mcoV contra o tempo em dias após a aplicação dos impulsos. A redução do efeito da polarização é mais acentuada nos oito primeiros dias. A tensão de ensaio foi sempre de 1,0 mcoV.

As amostras de óxido de zinco mantiveram, sempre, os níveis de descargas parciais abaixo de 1 pC. O fenômeno da polarização não ficou bem caracterizado para os resistores não lineares à base de ZnO estressados com 10 impulsos de corrente, tanto os com polaridade positiva quanto os de polaridade negativa, por isso os dados não foram expostos em gráficos.

Os dados obtidos são expostos nas tabelas abaixo, onde a corrente do mcoV (I_{mcoV}) foi obtida na montagem de medição de capacitância e tangente de perdas, onde I , é a corrente após a polarização das amostras.

TABELA 4. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 1) no decorrer do tempo

DIAS	I_{+mcov} (mA)	I_{+} (mA)	I_{+} / I_{+mcov}
0	1,0	1,50	1,50
3	1,0	1,30	1,30
8	1,0	1,20	1,20
30	1,0	1,10	1,10

TABELA 5. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 2) no decorrer do tempo

DIAS	I_{-mcov} (mA)	I_{-} (mA)	I_{-} / I_{-mcov}
0	1,0	1,50	1,50
3	1,0	1,40	1,40
8	1,0	1,20	1,20
30	1,0	1,10	1,10

TABELA 6. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 3) no decorrer do tempo

DIAS	i_{+mcoV} (mA)	i_{+} (mA)	i_{+} / i_{+mcoV}
0	1,0	1,30	1,30
3	1,0	1,10	1,10
8	1,0	1,00	1,00
30	1,0	1,00	1,00

TABELA 7. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 4) no decorrer do tempo

DIAS	i_{-mcoV} (mA)	i_{-} (mA)	i_{-} / i_{-mcoV}
0	1,0	0,90	0,90
3	1,0	0,90	0,90
8	1,0	0,85	0,85
30	1,0	0,80	0,80

TABELA 8. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 5) no decorrer do tempo

DIAS	i_{-mcoV} (mA)	i_{-} (mA)	i_{-} / i_{-mcoV}
0	1,0	1,30	1,30
3	1,0	0,95	0,95
8	1,0	0,90	0,90
30	1,0	0,80	0,80

Os gráficos obtidos através destes resultados são mostrados nas figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

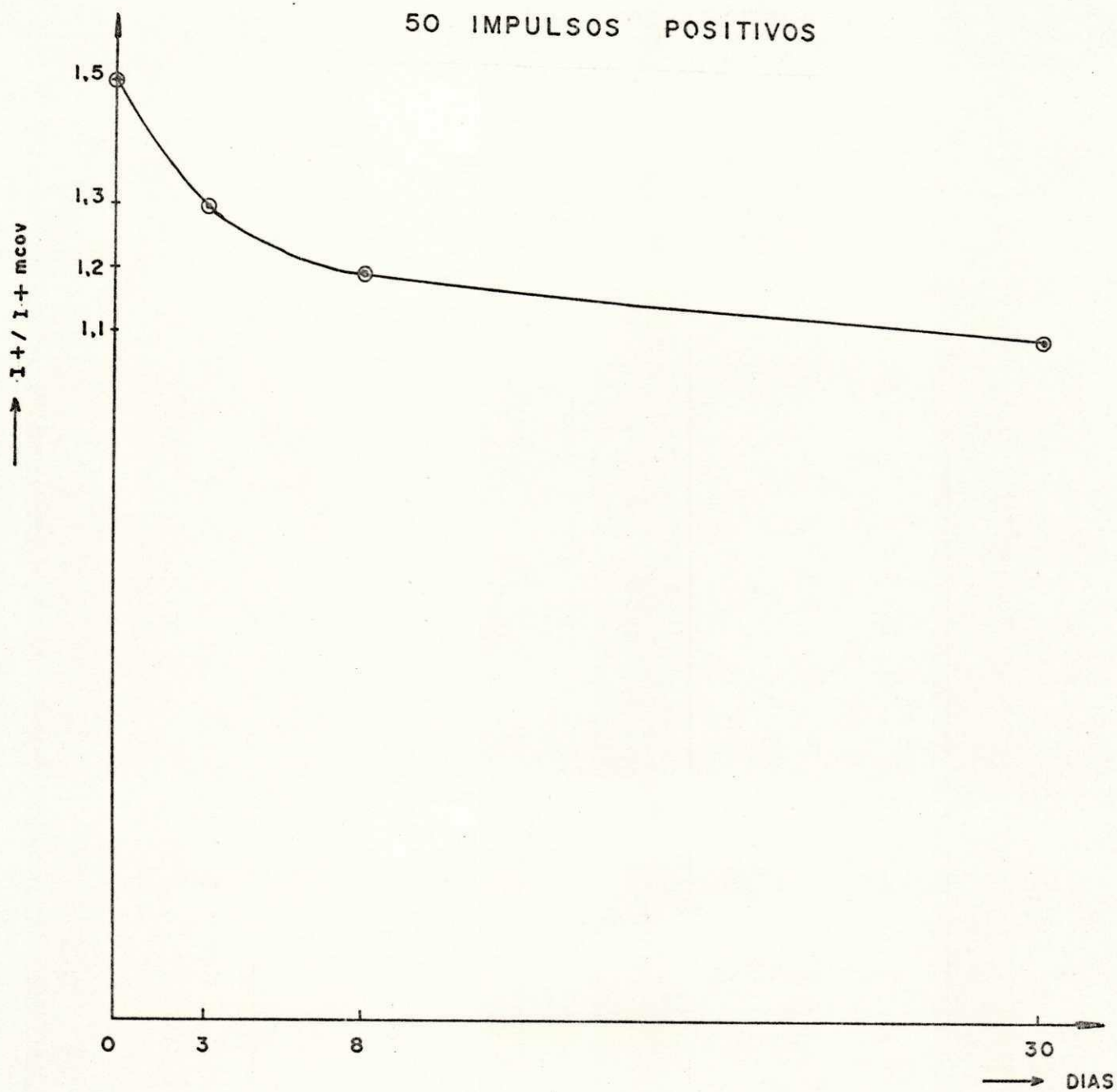


fig. 27 - Comportamento da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 1)

50 IMPULSOS NEGATIVOS

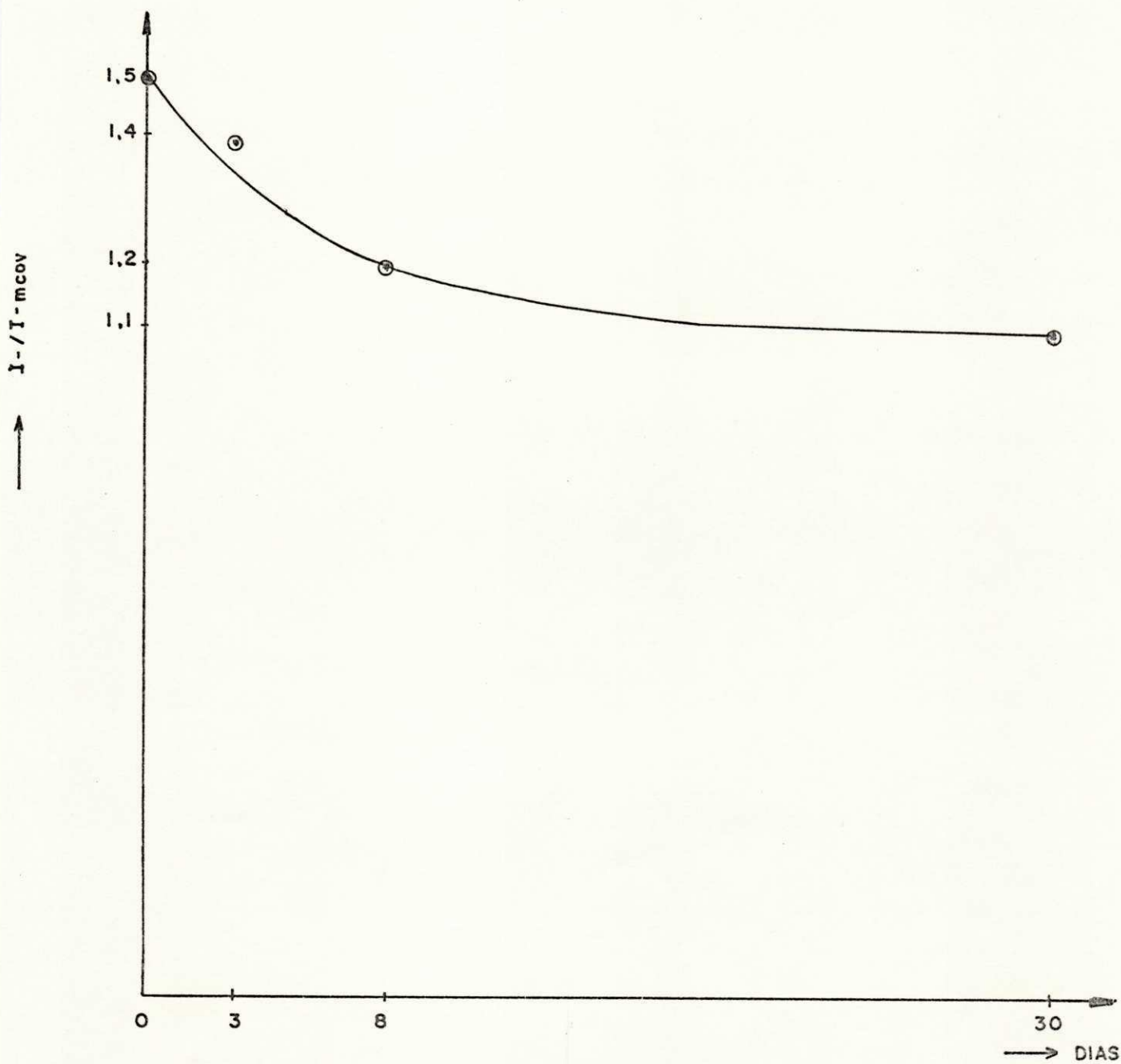


fig. 28 - Comportamento da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 2)

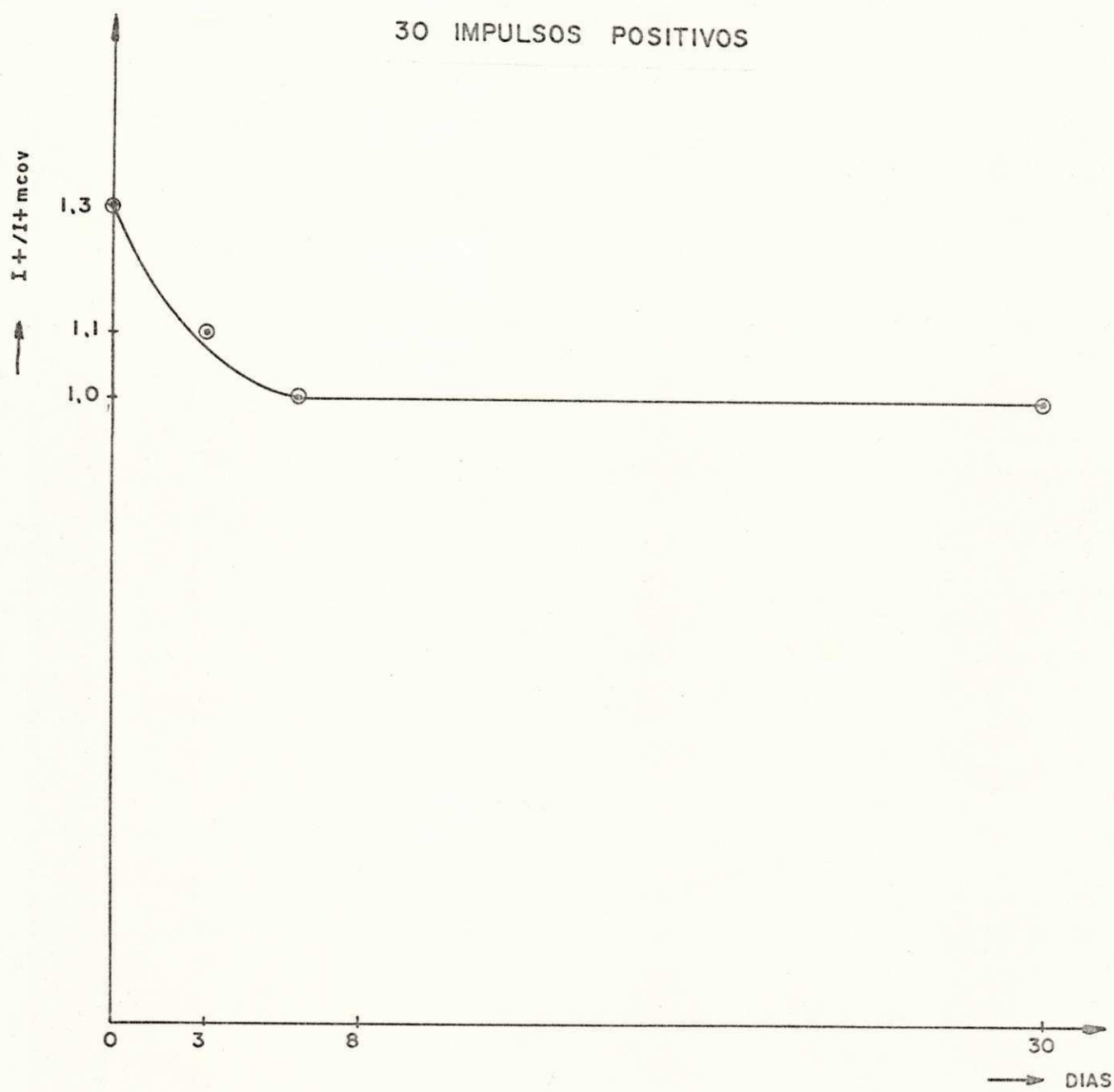


fig. 29 - Comportamento da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 3)

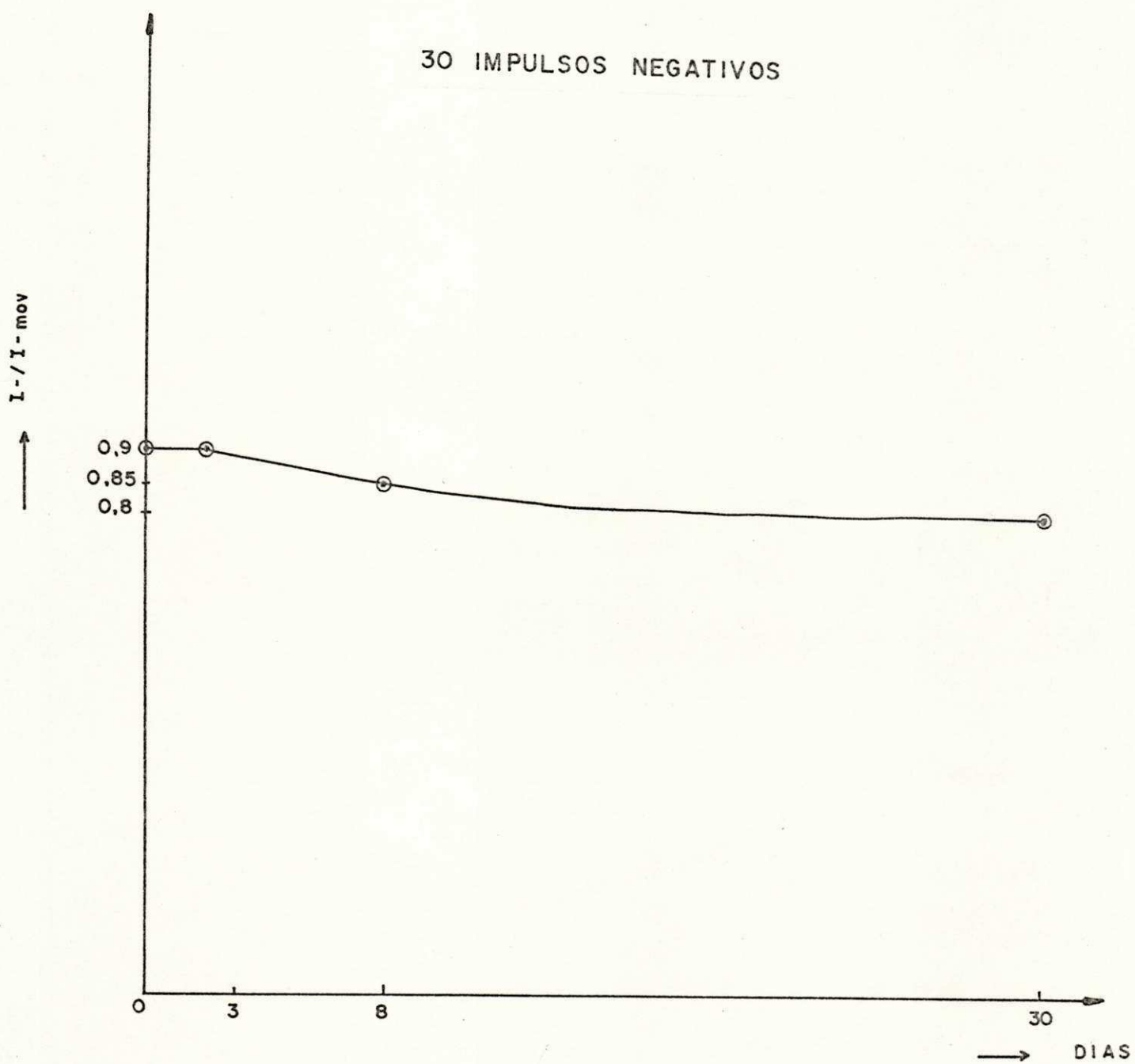


fig. 30 - Comportamento da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 4)

30 IMPULSOS NEGATIVOS

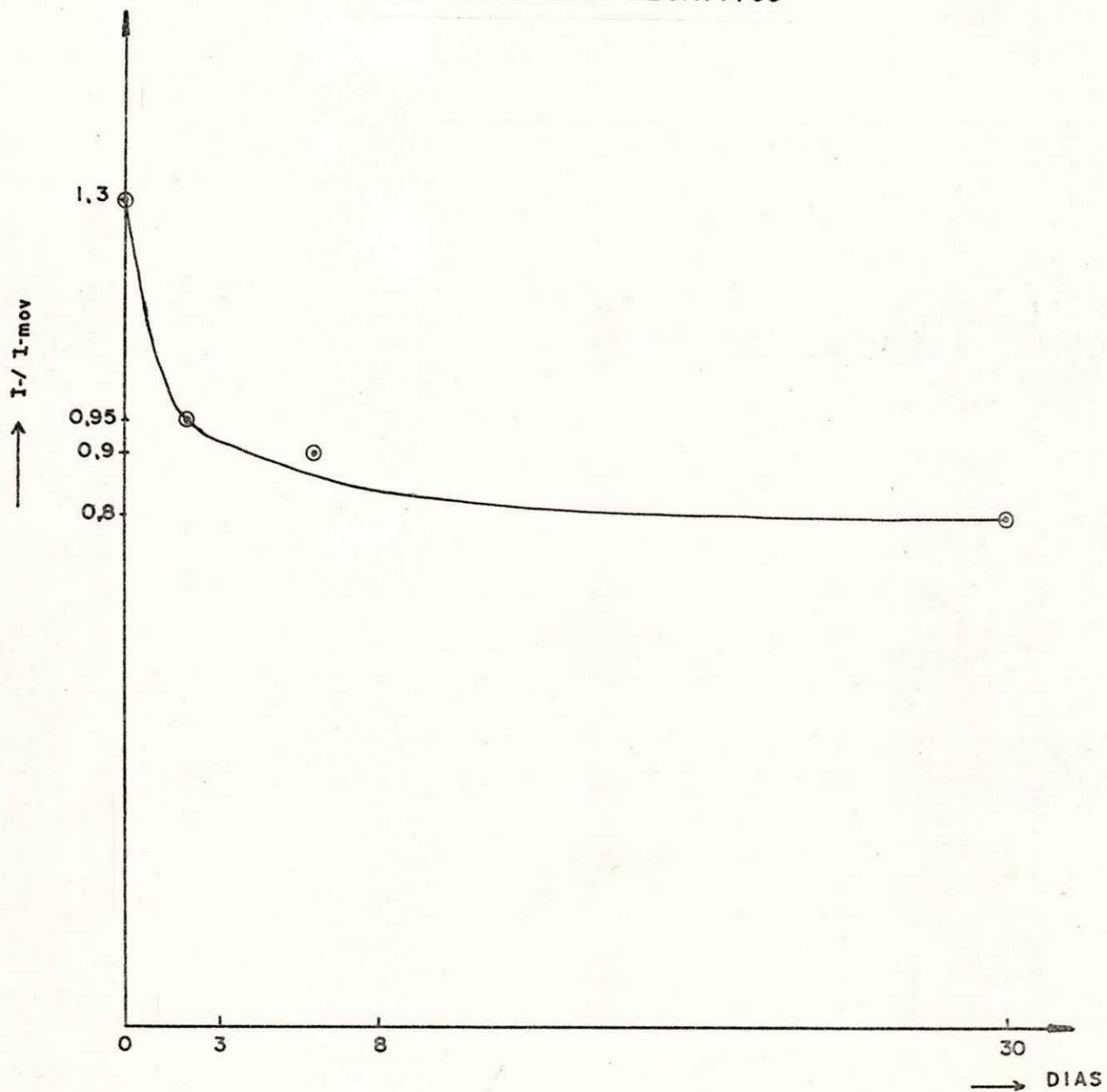


fig. 31 - Comportamento da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 5)

2. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA POLARIZAÇÃO / DESPOLARIZAÇÃO

A suspeita de que a temperatura do resistor não linear à base de ZnO teria influência sobre o efeito da polarização, despertou o interesse por uma análise mais profunda deste fato.

Inicialmente, após a aplicação dos impulsos, cada resistor não linear à base de ZnO foi levado para observação dos níveis de descargas parciais e da polarização através do monitoramento da corrente positiva e negativa, com tensão de 1,0 mcoV, e do registro dos valores, inclusive da variação de temperatura.

A amostra, então, foi retirada da montagem e posta para resfriar naturalmente. Quando a amostra atingia o valor de temperatura ambiente era recolocada no circuito. Aplicava-se a tensão de 1,0 mcoV com a observação dos níveis de descargas parciais e do efeito da polarização após a diminuição da temperatura, pois havia a desconfiança de que parte do elevado nível da polarização era em virtude do aumento de temperatura da amostra. Através do monitoramento da corrente em osciloscópio, observou-se que existia uma influência da temperatura, já que após o resfriamento da amostra, houve uma leve redução no efeito da polarização.

Como necessitava-se de maiores subsídios para tal afirmação, elevou-se o nível de tensão para 1,16 mcoV, aquecendo o resistor não linear à base de óxido de zinco por efeito Joule, até que a temperatura fosse igual àquela alcançada imediatamente após a aplicação dos impulsos no gerador. Com a tensão em 1,16 mcoV foi monitorada a corrente e o nível de descargas parciais. Observou-se que o efeito da polarização é bem mais acentuado quando o nível de tensão a que está submetida a amostra é mais elevado. O aquecimento da amostra ao valor de temperatura igual ao alcançado imediatamente após o esforço foi acompanhado através de um termômetro digital, ficando a amostra submetida durante cerca de 40 minutos à este nível de tensão para se obter o valor de temperatura necessário.

Quando a amostra já estava aquecida, o nível de tensão foi reduzido até 1,0 mcoV, permanecendo neste valor. O monitoramento da corrente mostrou que o nível de polarização encontrava-se quase que no mesmo patamar que fora observado inicialmente, isto é, imediatamente após a aplicação dos impulsos. A influência da temperatura no efeito da polarização mostrou-se bem mais definido, ou seja, quanto mais aquecida está a amostra, mais nitidamente é percebida a polarização.

O efeito da polarização não ficou bem caracterizado nas amostras estressadas com 10 impulsos de corrente, nas polaridades positiva e negativa.

Com a análise dos resultados constatou-se que a influência da temperatura na polarização / despolarização, após o período de 8 dias, não era a mesma observada imediatamente após o estressamento do resistor não linear à base de ZnO. Na análise após 8 dias do estressamento, o grau de influência da temperatura era bem menor que o observado imediatamente após a aplicação dos impulsos, o que pode ser justificado pelo fato das amostras terem ficado em repouso durante 8 dias e de já terem sido submetidas continuamente, por um período de tempo significativo, à tensão de 1,0 mcoV.

O nível de descargas parciais durante todo o experimento, manteve-se sempre abaixo de 1,0 pC. Mostra-se abaixo, as tabelas com os resultados obtidos para cada resistor não linear à base de ZnO.

TABELA 9. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 9) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 25,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL IT DP's	T °C	Obs.
	1,0 (após esforço)	0,90	0,85	< 1pC	40,50	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	25,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	3,00	1,40	< 1pC	25,60	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,90	0,85	< 1pC	40,50	O bloco apresenta polarização

TABELA 10. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 10) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 26,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	0,90	1,00	< 1pC	36,30	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to	0,85	0,80	< 1pC	26,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	2,30	4,00	< 1pC	27,00	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,90	1,00	< 1pC	36,30	O bloco apresenta polarização

TABELA 11. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 11) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 26,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
0	1,0 (após esforço)	0,90	0,80	< 1pC	37,60	Elevado nível de polarização
	1,0 (após resfriamen to)	0,80	0,80	< 1pC	26,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	2,60	1,20	< 1pC	37,60	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,90	0,80	< 1pC	37,60	O bloco apresenta polarização
8	1,0 (após resfriamen to)	0,80	0,80	< 1pC	23,00	O bloco ainda apresenta polarização
	elevando a tensão para 1,16	2,80	1,20	< 1pC	23,40	Polarização bem mais acentuada
	1,0	0,80	0,80	< 1pC	37,60	Quase não há influência da temperatura na polarização. Polarização só p/obs. visual

TABELA 12. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 12) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 25,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
0	1,0 (após esforço)	1,00	1,00	< 1pC	35,30	Elevado nível de polarização
	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	25,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	1,40	2,80	< 1pC	28,30	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,85	0,85	< 1pC	35,30	O bloco apresenta polarização
8	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	23,00	O bloco ainda apresenta polarização
	elevando a tensão para 1,16	1,60	3,40	< 1pC	25,30	Polarização bem mais acentuada
	1,0	0,80	0,85	< 1pC	35,30	Quase não há influência da temperatura na polarização Polarização só p/obs. visual

TABELA 14. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 14) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 24,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	0,80	0,80	< 1pC	37,00	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to)	0,80	0,80	< 1pC	23,60	Polarização um pouco menor, a corrente continua assimétrica
	elevando a tensão para 1,16	1,60	3,20	< 1pC	25,60	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,80	0,80	< 1pC	37,00	O bloco apresenta polarização

TABELA 15. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 15) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 25,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
0	1,0 (após esforço)	1,50	1,00	< 1pC	38,00	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to)	0,80	0,80	< 1pC	25,00	Polarização um pouco menor
0	elevando a tensão para 1,16	4,00	2,00	< 1pC	27,80	Polarização bem mais elevada
0	1,0	1,00	0,90	< 1pC	38,00	O bloco apresenta polarização

TABELA 16. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 16) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 27,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	0,90	1,40	< 1pC	38,90	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to	0,70	0,80	< 1pC	27,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	2,40	4,80	< 1pC	38,90	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,75	0,80	< 1pC	38,90	O bloco apresenta polarização

TABELA 17. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 17) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 23,4° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
0	1,0 (após esforço)	1,30	0,90	< 1pC	35,40	Elevado nível de polarização
	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	23,40	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	3,60	1,80	< 1pC	30,00	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,80	0,80	< 1pC	35,40	O bloco apresenta polarização
8	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	24,70	O bloco ainda apresenta polarização
	elevando a tensão para 1,16	4,40	2,40	< 1pC	25,20	Polarização bem mais acentuada
	1,0	0,80	0,80	< 1pC	35,40	Quase não há influência da temperatura na polarização Polarização só p/obs. visual

TABELA 18. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 18) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 25,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
0	1,0 (após esforço)	0,90	1,00	< 1pC	38,00	Elevado nível de polarização
	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	24,90	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	1,40	3,00	< 1pC	38,00	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,80	0,90	< 1pC	23,50	O bloco apresenta polarização
8	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	23,50	O bloco ainda apresenta polarização
	elevando a tensão para 1,16	1,00	2,00	< 1pC	23,70	Polarização bem mais acentuada
	1,0	0,80	0,80	< 1pC	38,00	Quase não há influência da temperatura na polarização Polarização só p/obs. visual

TABELA 19. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 19) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 23,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	0,90	0,90	< 1pC	30,30	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to)	0,80	0,80	< 1pC	23,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	3,50	1,80	< 1pC	23,30	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,90	0,90	< 1pC	30,30	O bloco apresenta polarização

TABELA 20. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 20) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 24,5° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	1,00	1,30	< 1pC	38,40	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to	0,90	0,90	< 1pC	24,50	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	1,60	3,60	< 1pC	25,20	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,90	0,90	< 1pC	38,40	O bloco apresenta polarização

TABELA 21. Análise da polarização do resistor não linear à base de ZnO (AMOSTRA 21) com o aumento da temperatura por efeito Joule e no decorrer do tempo

Temperatura ambiente 23,0° C

DIAS	MCOV Nível de Tensão	I ₊ (mA)	I ₋ (mA)	NÍVEL DP's	T °C	OBS.
	1,0 (após esforço)	0,80	0,90	< 1pC	32,30	Elevado nível de polarização
0	1,0 (após resfriamen to	0,80	0,80	< 1pC	23,00	Polarização um pouco menor
	elevando a tensão para 1,16	1,50	3,00	< 1pC	25,00	Polarização bem mais elevada
	1,0	0,80	0,90	< 1pC	32,30	O bloco apresenta polarização

3. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO COM O TEMPO, COM A TENSÃO CONTINUADAMENTE APLICADA, E COM A TEMPERATURA

Com a constatação de que o efeito da polarização nos resistores não lineares à base de óxido de zinco diminui com a tensão continuamente aplicada, surgiu a necessidade de uma análise mais profunda deste fenômeno. Para tanto, procedimentos experimentais foram realizados objetivando a verificação do efeito da polarização com o tempo, com a tensão continuamente aplicada, e com a temperatura.

A amostra 22 foi submetida a 50 impulsos de corrente negativa. A forma de onda da amostra, obtida através do circuito B.8 do anexo B, imediatamente após a aplicação dos impulsos é mostrada no oscilograma da figura 32, onde constata-se nitidamente o alto grau de polarização da amostra. Após 16 horas de aplicação continuamente da tensão de 1,0 mcov, foi feito o oscilograma mostrado na figura 33, onde pode-se observar que a onda já não é assimétrica como no oscilograma anterior e que não há mais indícios de polarização do resistor não linear à base de ZnO.

Com este fato, existia então, a necessidade de se registrar o efeito da temperatura sobre a polarização das amostras.

No oscilograma da figura 34 observa-se a amostra 23 fortemente polarizada, imediatamente após a aplicação de 50 impulsos positivos no gerador de corrente HAEFELY. Decorrida uma hora do estressamento, e estando a amostra submetida neste período à tensão de 1,0 mcov, registrou-se, através do oscilograma mostrado na figura 35, o nível de polarização da amostra, no qual se consegue observar uma sensível redução desse efeito. O oscilograma da figura 36, mostra a situação da amostra 23 após 16 horas da tensão de 1,0 mcov continuamente aplicada. Nesse oscilograma o nível de zero do osciloscópio estava 2mm abaixo. Comparando-se os oscilogramas das figuras 35 e 36, observa-se que o nível de polarização da amostra diminuiu com o tempo de tensão continuamente aplicada. Após 24 horas do estressamento, estando a amostra neste período submetida a tensão de 1,0 mcov, o oscilograma da figura 37 registrou o nível de despolarização da amostra. Considerando-se que o oscilograma da figura 36 apresenta um deslocamento na referência do zero, conclui-se que após 24 horas a amostra encontrava-se mais despolarizada.

Para a constatação do efeito da temperatura na polarização do resistor não linear à base de óxido de zinco, a amostra foi aquecida em estufa até atingir a mesma temperatura de saída do gerador de impulso de corrente. O oscilograma da figura 38 mostra que após o aquecimento, a amostra não chega a atingir o mesmo grau de polarização de imediatamente após a aplicação dos impulsos, portanto, realmente a temperatura influi no nível de polarização da amostra, porém não isoladamente.

Todo esse procedimento, despertou a curiosidade de saber se havia alguma diferença entre o aquecimento em estufa ou por efeito Joule do resistor não linear à base de óxido de zinco.

O resistor não linear à base de óxido de zinco, então foi aquecido por efeito Joule, com o aumento do nível de tensão para 1,16 mcov. Comparando-se o oscilograma da figura 39 que registra este efeito, com o oscilograma da figura 38 onde a amostra foi aquecida em estufa, observa-se que o nível da polarização da amostra aquecida via estufa apresenta-se bem maior.

Por outro lado, com base em observações feitas neste experimento e em montagens anteriores, pode-se afirmar que a aplicação da tensão, isto é, com a circulação de corrente em um resistor não linear à base de ZnO polarizado, o grau de polarização tende a reduzir-se.

Quando do resfriamento da amostra 23 ao nível da temperatura ambiente, foi registrado o grau de polarização através do oscilograma da figura 40, onde observa-se que depois de 04 horas do aquecimento da amostra por efeito Joule, e de submetida à tensão de 1,0 mcov, praticamente não existe mais polarização. Pode-se concluir também que, a influência da temperatura na polarização é apenas momentânea.

AMOSTRA 22

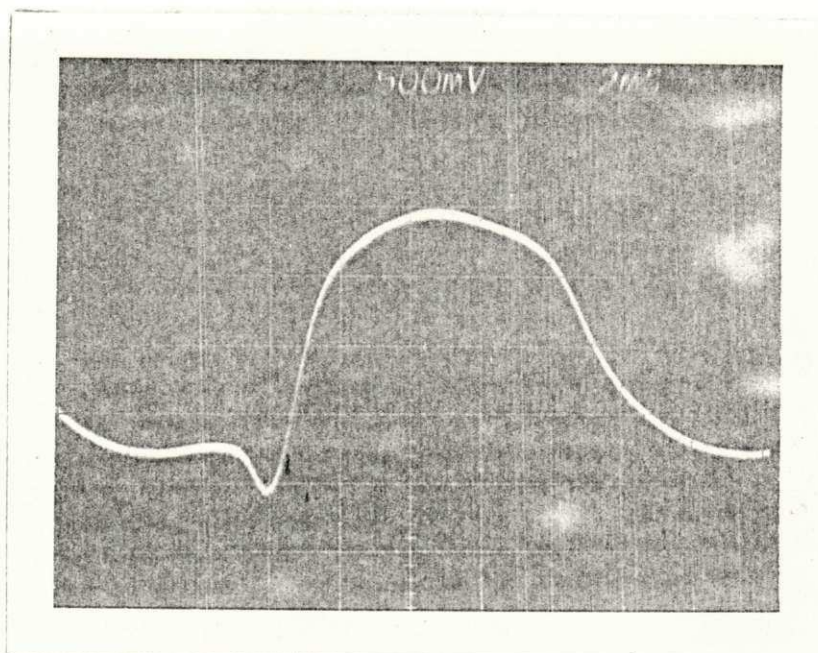


fig. 32 - Forma de onda da corrente do resistor não linear à base de ZnO imediatamente após a aplicação dos impulsos
 $T = 38,4^{\circ} \text{C}$

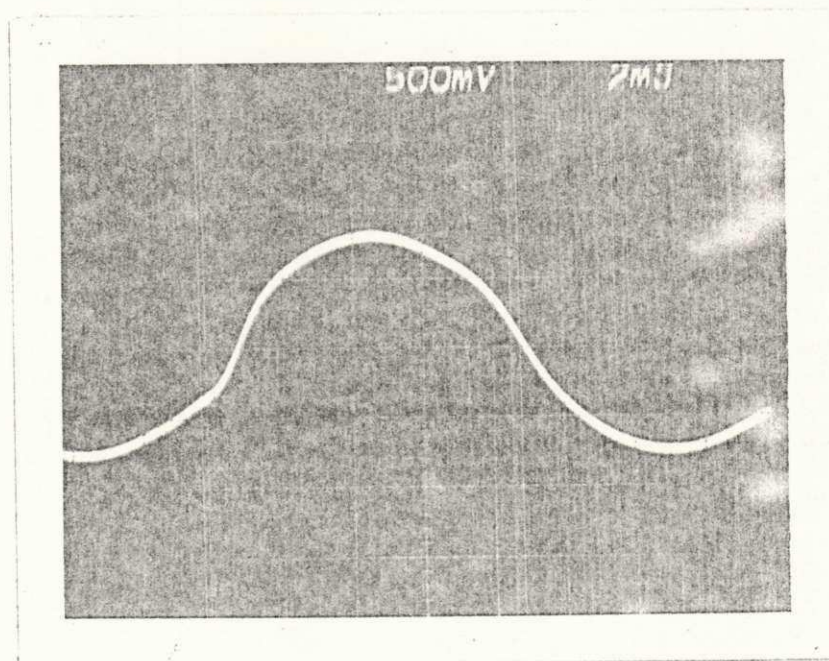


fig. 33 - Forma de onda da corrente no resistor não linear à base de ZnO após 16 horas de tensão continuamente aplicada
 $T = 27,3^{\circ} \text{C}$

AMOSTRA 23

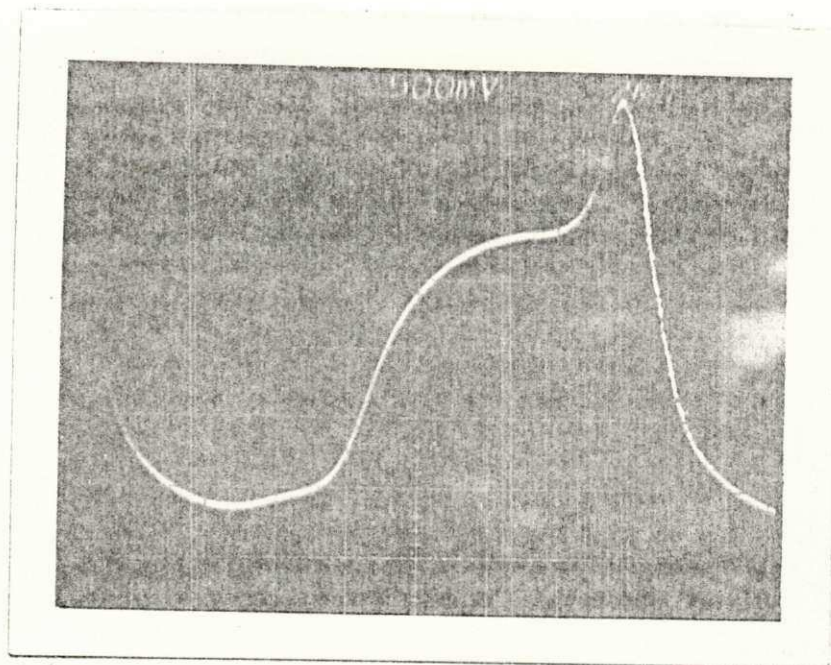


fig. 34 - Forma de onda da corrente do resistor não linear à base de ZnO imediatamente após a aplicação dos impulsos
 $T = 39,8^{\circ} \text{C}$

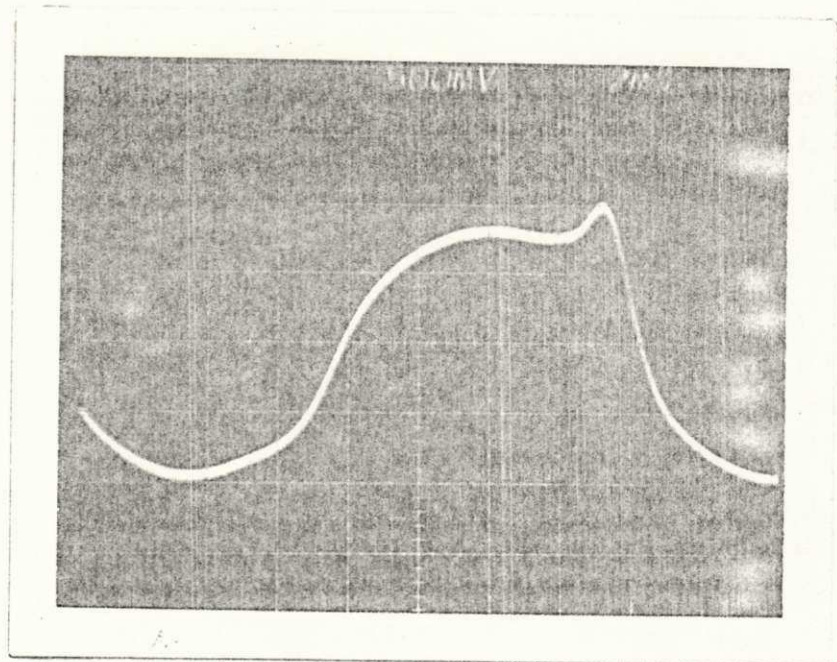


fig. 35 - Forma de onda da corrente no resistor não linear à base de ZnO após 01 hora de tensão continuamente aplicada
 $T = 29,0^{\circ} \text{C}$

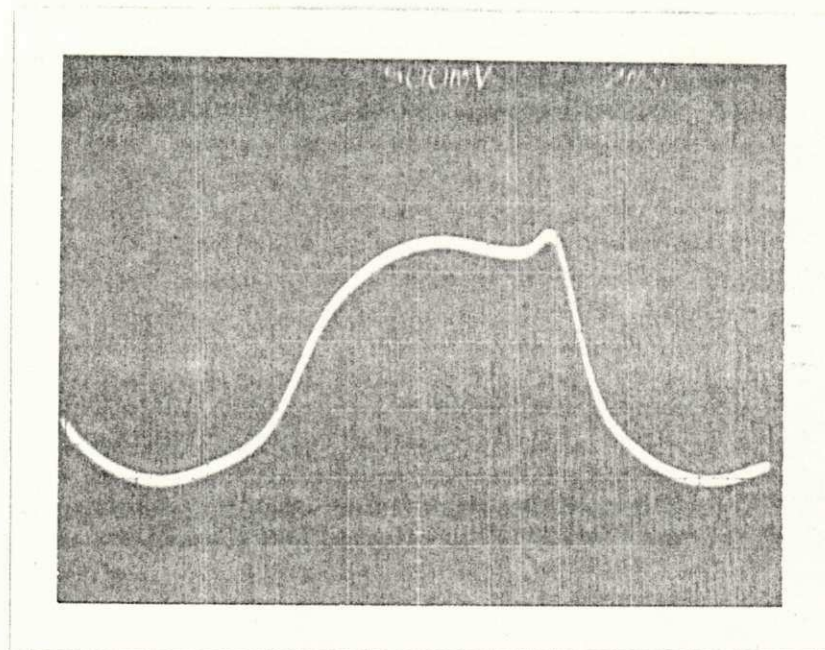


fig. 36 - Forma de onda da corrente no resistor não linear à base de ZnO após 16 horas de tensão continuamente aplicada
 $T = 27,9^{\circ} \text{C}$

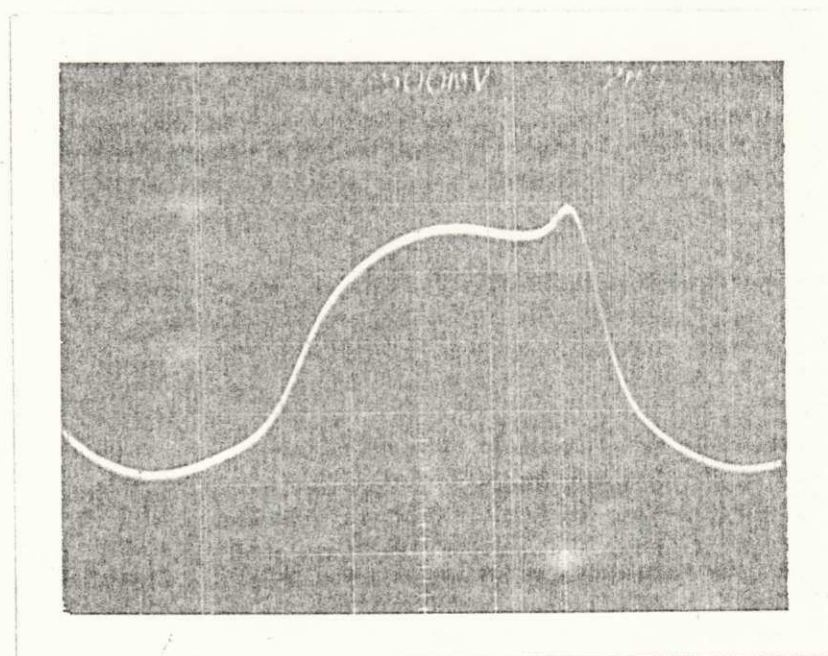


fig. 37 - Forma de onda da corrente no resistor não linear à base de ZnO após 24 horas de tensão continuamente aplicada
 $T = 30,0^{\circ} \text{C}$

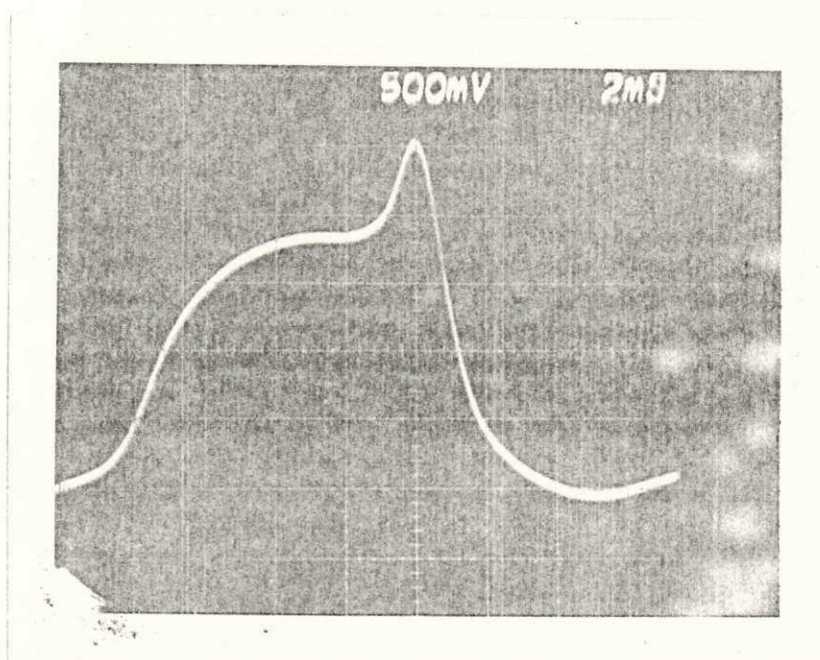


fig. 38 - Forma de onda da corrente do resistor não linear à base de ZnO imediatamente após o aquecimento em estufa até a temperatura equivalente à saída do gerador de impulso
 $T = 39,8^{\circ} \text{C}$

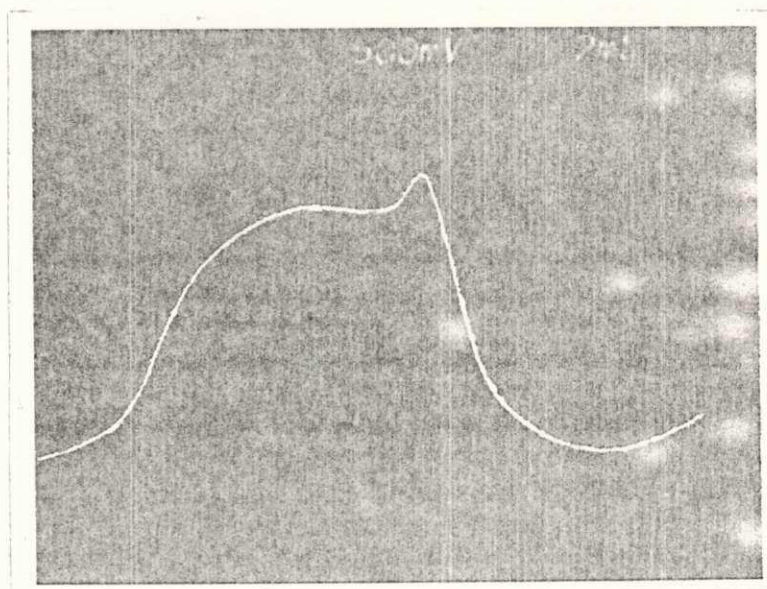


fig. 39 - Forma de onda da corrente do resistor não linear à base de ZnO imediatamente após o aquecimento pelo efeito Joule até a temperatura equivalente à saída do gerador de impulso
 $T = 39,8^{\circ} \text{C}$

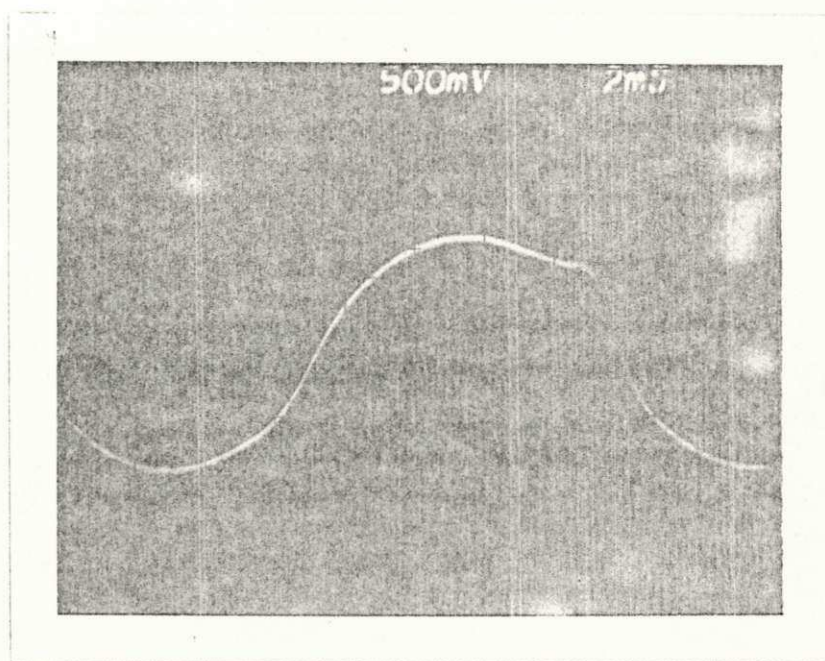


fig. 40 - Forma de onda da corrente do resistor não linear à base de ZnO quando do resfriamento a temperatura ambiente. Após 04 horas do aquecimento por efeito Joule, com tensão continuamente aplicada $T = 26,0^{\circ} \text{C}$

4. VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO SOBRE A TENSÃO RESIDUAL NOS RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ZnO

Como já citado no Capítulo II, a função de um pára-raios é evitar que uma sobretensão exceda os limites dos isolamentos dos equipamentos do sistema. O pára-raios deve atuar quando a tensão atinge o seu nível de proteção, sendo porém, o nível de isolamento do equipamento protegido superior ao nível de proteção do pára-raios. Se o nível de proteção do pára-raios for superior ou bem inferior ao nível de isolamento, haverá o comprometimento do isolamento do equipamento protegido, ou para o segundo caso, haverá uma sollicitação térmica excessiva do pára-raios.

O nível de proteção do pára-raios pode ser representado pela tensão residual da descarga. A eficiência da proteção é expressa por K_p , em valor percentual, e é dada pela expressão (22).

$$K_p = ((NBI - V_r) / NBI) \times 100 \quad (22)$$

Portanto, se a tensão residual do pára-raios cresce, sua eficiência de proteção diminui, pois o nível de isolamento do equipamento protegido, representado pelo Nível Básico de Impulso (NBI), permanece constante.

Após a sequência de ensaios descritos nos itens 2.1, 2.2. e 2.3, do Capítulo III, verificou-se que a polarização dos resistores não lineares à base de óxido de zinco diminui com o tempo e com a tensão continuamente aplicada. Outra questão observada foi que existe a influência do nível de tensão aplicada ao resistor não linear com o nível de polarização do mesmo, além do que, quanto maior a quantidade de impulsos aplicados aos resistores não lineares à base de ZnO, maior é a sua polarização. Um outro ponto, relevante, analisado foi que existe uma influência da temperatura na polarização do resistor não linear à base de ZnO, sendo uma influência momentânea.

A partir destes fatos comprovados experimentalmente, e sabendo-se que a tensão instalada nos terminais do pára-raios, durante a passagem da corrente de descarga (V_r = tensão residual), representa um dos valores do nível de proteção, surgiu o questionamento de como se comportaria a tensão residual de um resistor não linear à base de ZnO submetido a um impulso de corrente contrário a sua polarização. Essa questão fez surgir a necessidade de um procedimento experimental que oferecesse subsídios para a sua análise.

AMOSTRA 24 - Polarizada Positivamente

A amostra 24 foi inserida no circuito do gerador, sendo aplicado um impulso de corrente negativa, com forma de onda 8,75 / 31,5 us, amplitude de 11,38 KA, tensão de carregamento dos capacitores de 26 KV, tempo de carregamento de 60 segundos, apresentando uma tensão residual de 5,11 KV, como mostra o oscilograma da figura 41.

A polaridade foi então invertida, sendo aplicados 50 impulsos de corrente positiva, com tensão de carregamento dos capacitores de 34 KV, tempo de carregamento de 60 segundos e intervalo entre os impulsos de 120 segundos. O primeiro impulso positivo é mostrado no oscilograma da figura 42 com forma de onda 9,3 / 32,4 us, amplitude de 14,68 KV e tensão residual de 5,89 KV. A temperatura da amostra, medida após o primeiro impulso foi de 37,8 °C.

O oscilograma da figura 43 mostra o 50º impulso de corrente positiva, com forma de onda 9,15 / 32,6 us, amplitude de 15,31 KA e tensão residual de 6,56 KV. A temperatura da amostra, medida após o 50º impulso foi de 54,8 °C. A amostra, portanto estava polarizada positivamente.

A polaridade do impulso foi invertida, aplicou-se, então, um impulso negativo na amostra 24, com forma de onda 8,35 / 33,95 us, tensão de carregamento dos capacitores de 26 KV, tempo de carregamento de 60 segundos, amplitude de 11,44 KA e tensão residual de 5,87 KV, mostrado no oscilograma da figura 44. A temperatura da amostra, medida após o impulso negativo foi de 36,9 °C.

O oscilograma da figura 44 mostra que a tensão residual no resistor não linear à base de óxido de zinco, polarizado positivamente, provocada por um impulso negativo foi maior 14,9 % que a tensão residual no resistor não linear à base de ZnO não polarizado, mostrado no oscilograma da figura 41. Este fato indica um aumento no nível de proteção do resistor, o que pela equação (22) e pela figura 8 (mostrada no item 3., capítulo II), mostra que a eficiência da proteção do resistor não linear à base de ZnO diminuiu. Portanto, um pára-raios, formado por resistores não lineares à base de óxido de zinco em combinação série ou série-paralelo polarizado, submetido à uma descarga de polaridade oposta, poderá comprometer o isolamento do equipamento protegido.

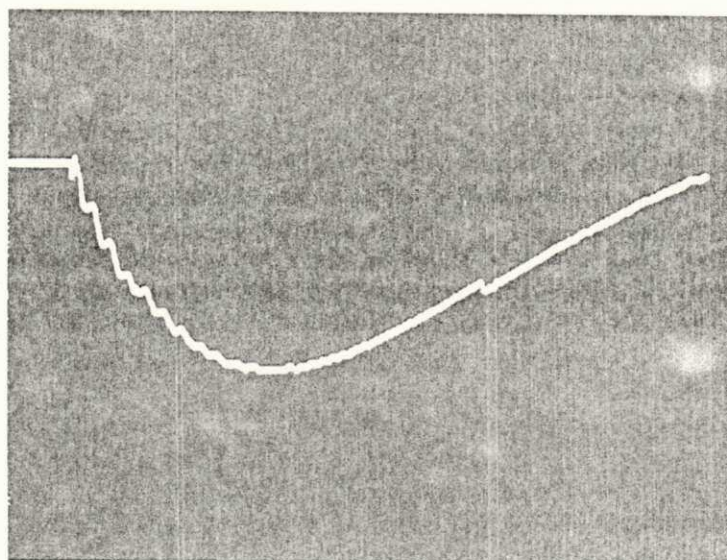


fig. 41 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente negativa
 $V_r = 5,11 \text{ KV}$, $I = 11,38 \text{ KA}$
 $8,75 / 31,5 \text{ us}$

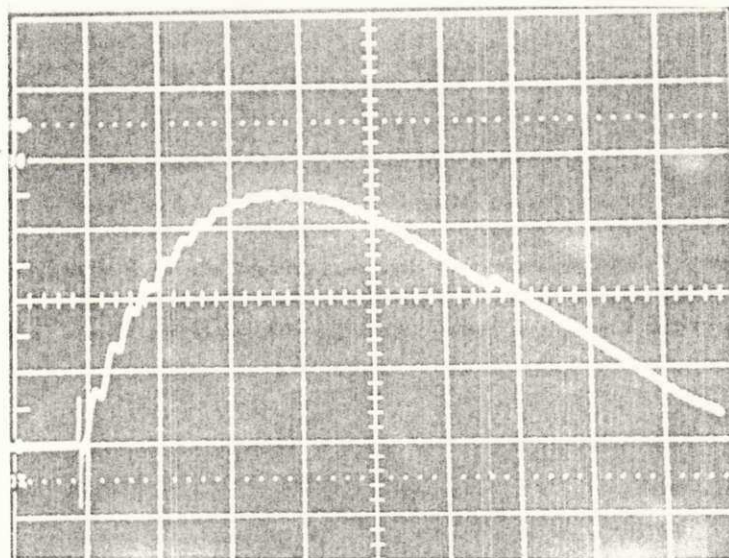


fig. 42 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente positiva de uma série de 50 impulsos
 $V_r = 5,89 \text{ KV}$, $I = 14,68 \text{ KA}$
 $9,30 / 32,4 \text{ us}$

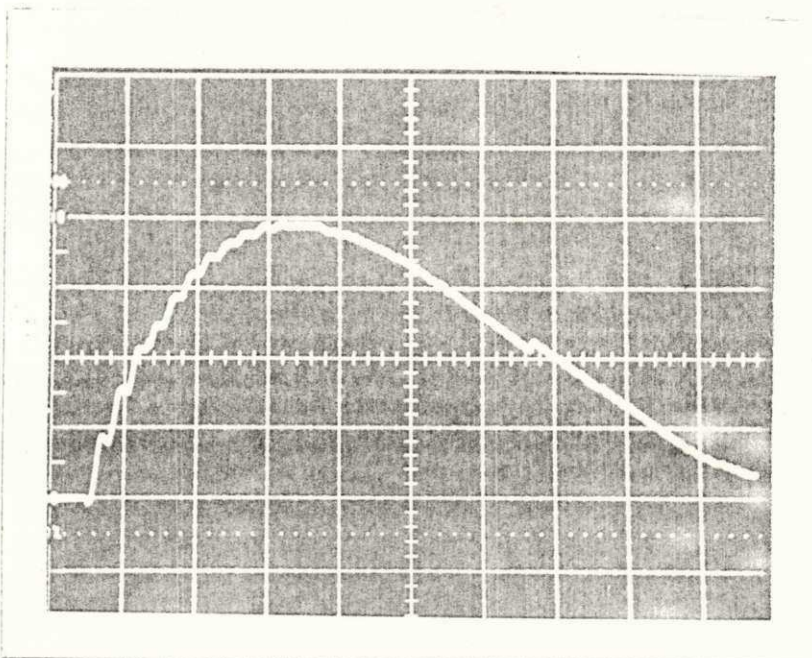


fig. 43 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido ao último impulso de corrente positiva de uma série de 50 impulsos

$V_r = 6,56 \text{ KV}$, $I = 15,31 \text{ KA}$
 $9,15 / 32,6 \text{ us}$

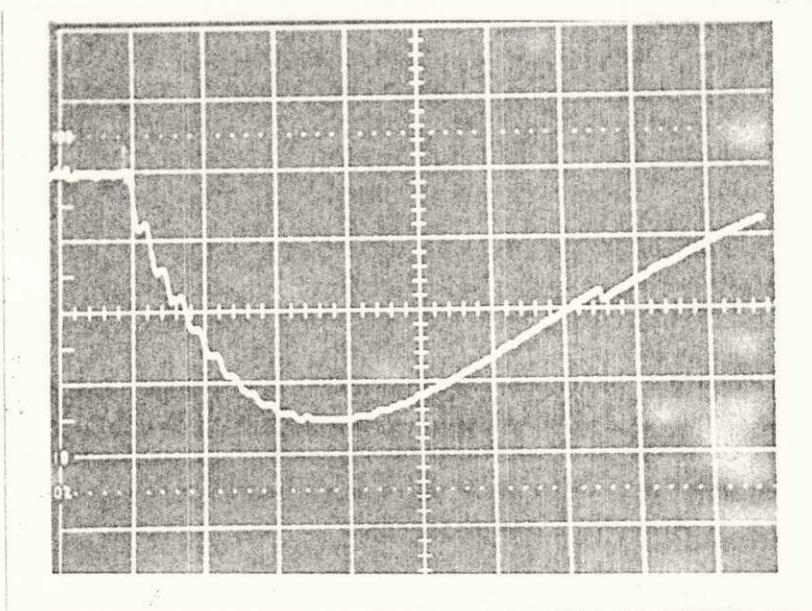


fig. 44 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente negativa, após ser polarizado

$V_r = 5,87 \text{ KV}$, $I = 11,44 \text{ KA}$
 $8,35 / 33,9 \text{ us}$

AMOSTRA 25 - Polarizada Negativamente

A amostra 25 foi inserida no circuito do gerador e submetido à um impulso de corrente positiva, com forma de onda 8,75 / 29,1 us, amplitude de 15 KA, tensão de carregamento dos capacitores de 34 KV, tempo de carregamento de 60 segundos, apresentando uma tensão residual de 4,68 KV, como mostra o oscilograma da figura 45.

A polaridade foi invertida, aplicando-se 50 impulsos de corrente negativa, com tensão de carregamento dos capacitores de 26 KV, tempo de carregamento de 60 segundos e intervalo entre os impulsos de 120 segundos. O primeiro impulso negativo é mostrado no oscilograma da figura 46, com forma de onda 8,5 / 30,1 us, amplitude de 11,27 KV e tensão residual de 4,8 KV. A temperatura da amostra, medida após o primeiro impulso foi de 29,8 °C.

O oscilograma da figura 47 mostra o 50º impulso de corrente negativa, com forma de onda 9,35 / 30,7 us, amplitude de 11,30 KA e tensão residual de 4,96 KV. A temperatura da amostra, medida após o 50º impulso foi de 44,3 °C.

A amostra 25, polarizada negativamente, foi submetida à um impulso de corrente positiva, com forma de onda 8,95 / 29,7 us, tensão de carregamento dos capacitores de 34 KV, tempo de carregamento de 60 segundos, amplitude de 11,85 KA e tensão residual de 5,23 KV, mostrado no oscilograma da figura 48. A temperatura da amostra, medida após o impulso positivo foi de 40,6 °C.

O oscilograma da figura 48 mostra que a tensão residual no resistor não linear à base de óxido de zinco, polarizado negativamente, provocada por um impulso positivo, foi maior 11,8 % que a tensão residual na amostra não polarizada, mostrada no oscilograma da figura 45. Este fato indica um aumento no nível de proteção da amostra, e que a eficiência de proteção do resistor não linear à base de ZnO diminuiu. Portanto, a mesma análise feita para as amostras polarizadas positivamente, representadas pela amostra 24, pode ser feita para as amostras polarizadas negativamente, isto é, que um pára-raios nesta situação, poderá, quando de uma sobretensão de polaridade oposta à qual está polarizado, comprometer o isolamento do equipamento protegido.

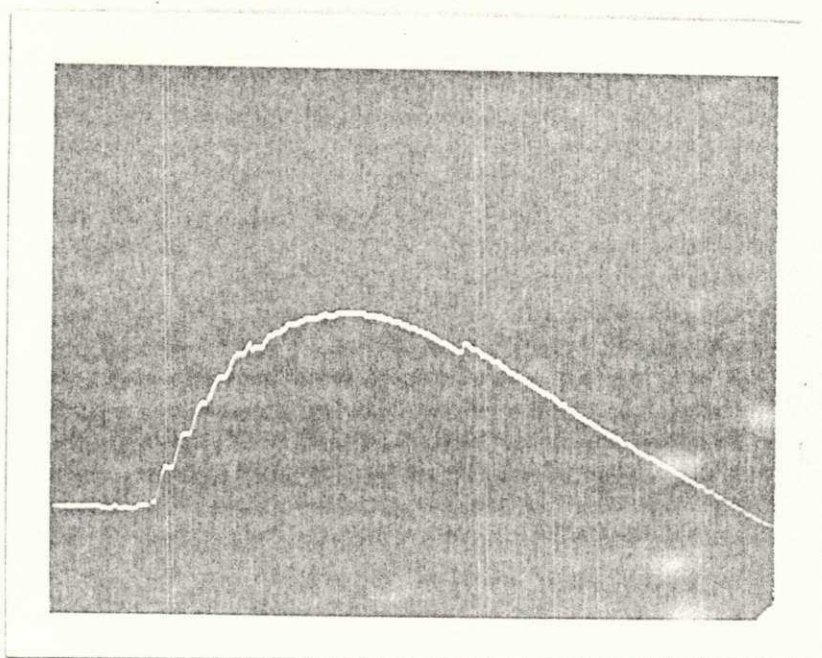


fig. 45 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente positiva
 $V_r = 4,88 \text{ KV}$, $I = 15 \text{ KA}$
 $8,75 / 29,1 \text{ us}$

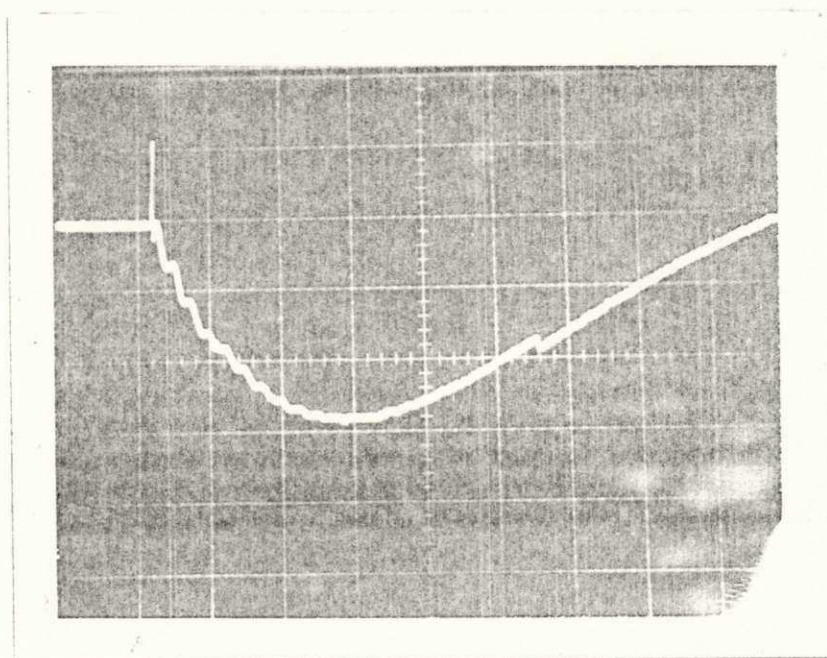


fig. 46 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente negativa de uma série de 50 impulsos
 $V_r = 4,80 \text{ KV}$, $I = 11,27 \text{ KA}$
 $8,50 / 30,1 \text{ us}$

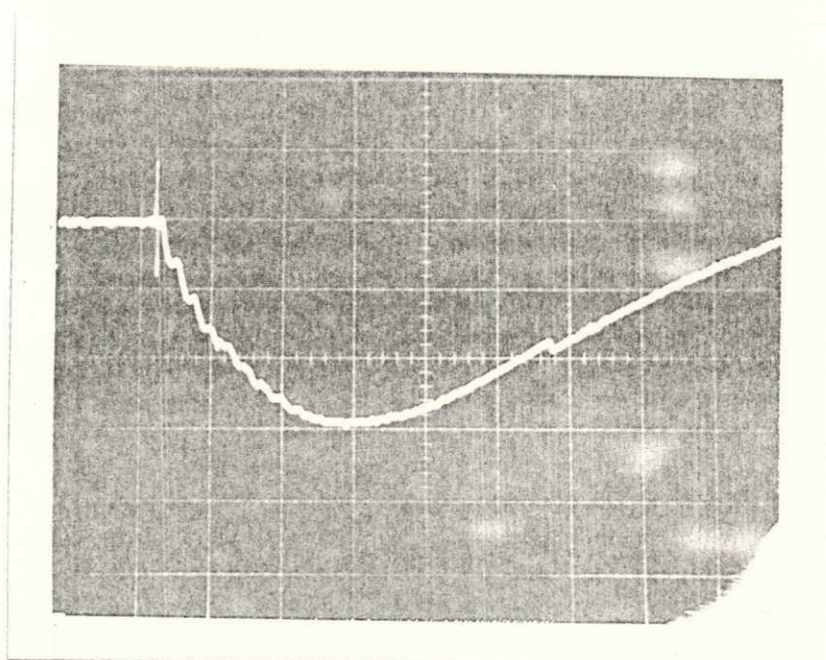


fig. 47 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido ao último impulso de corrente negativa de uma série de 50 impulsos
 $V_r = 4,96 \text{ KV}$, $I = 11,30 \text{ KA}$
 $9,35 / 33,7 \text{ us}$

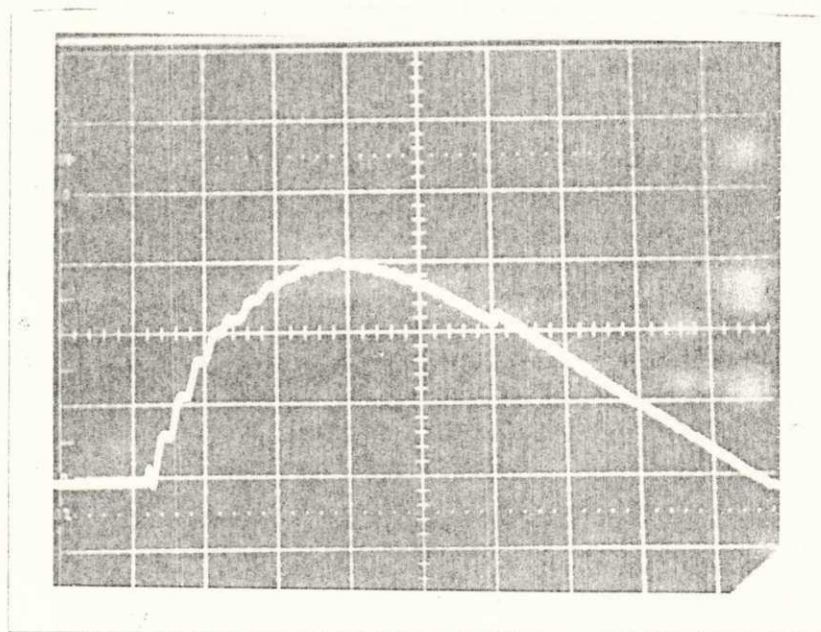


fig. 48 - Forma de onda da tensão residual do resistor não linear à base de ZnO submetido à um impulso de corrente positiva, após ser polarizado
 $V_r = 5,23 \text{ KV}$, $I = 11,85 \text{ KA}$
 $8,95 / 29,7 \text{ us}$

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Este trabalho mostra o efeito da polarização elétrica dos resistores não lineares à base de óxido de zinco utilizados nos pára-raios tipo estação.

A polarização foi observada com respeito ao número de impulsos aplicados, polaridade e intensidade dos impulsos, tempo, temperatura e a tensão continuamente aplicada.

- Os resistores não lineares à base de ZnO quando submetidos à impulsos de corrente sucessivos de mesma polaridade apresentam o efeito da polarização elétrica. O nível de polarização é proporcional ao número de impulsos aplicados e a intensidade da descarga.

- A polarização elétrica apresentada pelos resistores não lineares à base de ZnO é reduzida gradualmente com o tempo da aplicação, como pode ser visto pelos gráficos das figuras 27, 28, 29, 30 e 31 no item 1. do Capítulo IV. A redução do efeito da polarização depende intrinsecamente do número de impulsos aplicados. Para os resistores não lineares à base de ZnO estressados com 50 impulsos, a polarização residual persiste até o oitavo dia da aplicação dos impulsos, após este período a polarização torna-se insignificante. Para os resistores não lineares à base de ZnO estressados com 30 impulsos, a polarização residual permanece por um período de no máximo 3 dias. Nos resistores não lineares à base de ZnO estressados com 10 impulsos, não foi possível constatar a polarização residual.

- A elevação da temperatura do resistor não linear à base de ZnO intensifica o efeito da polarização. Este fenômeno foi observado tanto através do aquecimento por efeito Joule (circulação de corrente), como pelo aquecimento em estufa. O fenômeno pode ser justificado se com a aplicação de impulsos de corrente tenha havido captura de elétrons (traps) na região de depleção. Neste caso coexiste dois mecanismos de fornecimento de energia, a temperatura e o campo elétrico. Com o aquecimento do resistor não linear à base de óxido de zinco, a permutação (liberação / captura) de elétrons na região de depleção acontece em maior intensidade na região de alto campo elétrico (maior energia).

- A tensão continuamente aplicada e a aplicação de impulsos de corrente de polaridade contrária, faz reduzir drasticamente o efeito da polarização nos resistores não lineares à base de óxido de zinco. Devido a instabilidade dos elétrons capturados na região de depleção, a ação da tensão continuamente aplicada ou dos impulsos de polaridade oposta, permite o retorno a condução estável na região de depleção.

- Como o nível de proteção do pára-raios é representado pela sua tensão residual de descarga, estudou-se o efeito da polarização elétrica residual, quando da aplicação de um impulso contrário à polaridade apresentada pelo resistor não linear à base de ZnO. Nos experimentos realizados, com polaridade positiva e negativa, observou-se que a tensão residual dos resistores não lineares à base de ZnO polarizados apresentava-se maior, podendo atingir até 15% para a polaridade positiva e 12% para a polaridade negativa. Conclui-se que a eficiência da coordenação de isolamento fica comprometida quando os resistores não lineares à base de ZnO estão polarizados, pois o nível de proteção imposto ao pára-raios é superior ao estipulado no seu valor nominal.

CAPÍTULO VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados e observações desta investigação, várias questões importantes não foram respondidas e seguem algumas sugestões, objetivando o esclarecimento e o conhecimento das características dos resistores não lineares à base de óxido de zinco, como também do pára-raios de ZnO.

- Utilização de resistores não lineares à base de óxido de zinco de diversas composições e temperaturas de sinterização, isto é, de processamentos diferentes, na análise da polarização elétrica residual.

- Realização de análises microestruturais para a determinação do envelhecimento, mesmo localizado (deterioração), dos resistores não lineares à base de ZnO.

- Determinação dos parâmetros térmicos dos pára raios de ZnO para garantir a estabilidade dos mesmos.

CAPITULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - VERDOLIM, Rogério Tavares. CPAR - Curso sobre Pára-Raios de Distribuição e Estação à SIC e ZnO. CEPEL - 425 / 84 - Rio de Janeiro, ELETROBRÁS, 1986.
- 02 - VASCONCELOS, João Antônio de. Comportamento das Perdas em Pára-Raios de ZnO na Região de Baixa Corrente, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1985.
- 03 - D'ALUZ, Ary e Outros. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. Rio de Janeiro, FURNAS, Universidade Federal Fluminense, 1987.
- 04 - NATTRASS, David A. Partial Discharge Measurement and Interpretation, IEEE Electrical Insulation Magazine, May / June 1988 - Vol. 4, No 3.
- 05 - PEREIRA, Marco Polo e Outros. Pára-Raios de óxido de Zinco, Painel realizado no Auditório da ELETROBRÁS no dia 27.11.86 sob patrocínio do IEEE - Seção RJ e do CT 33-06 / CIGRÉ.
- 06 - Commission Electrotechnique Internationale (CEI), 71-1, 1976.
- 07 - SILVA, Olímpio Luiz da e Outros. Encontro Regional sobre Equipamentos e Padronização de Arranjos de Subestações e Aterramento em Subestação de Distribuição, Realização: Comitê Brasileiro de Eletricidade. ABNT, Forum Nacional de Normalização.
- 08 - MORAES, Humberto Maribondo de. Verificação de Degradação de Blocos Cerâmicos à Base de Óxido de Zinco Através da Medição de Descargas Parciais, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1987.
- 09 - LEIME, A. Elias e AKAMATSU, J. Itiro. Equipamentos Elétricos e Materiais - Aplicação de Pára-Raios de Óxido de Zinco. ASEA Elétrica LTDA., Brasília -DF, 1983.

- 10 - MOURA, Domingos. Técnicas de Alta Tensão - Curso Introdutório, Edição Técnica - Revista de Engenharia da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1980.
- 11 - Seminário para Engenheiros da CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Pára-Raios de Alta Tensão, Recife, Março 1989.
- 12 - SWEETANA, Andrew. The Significance of Maximum Continuous Operating Voltage (MCOV) on Metal Oxide Arrester Application and Selection, IEEE, New Orleans, April 2-7, 1989.
- 13 - BATISTA, Gildo Nunes. Pára-Raios em Sistema de Potência, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Publicações Técnicas da CHESF, Número 003.
- 14 - LEVINSON, L. M. and PHILIPP, H. R. AC Properties of Metal - Oxide Varistor. Journal of Applied Physics, Vol. 47, No 3, March 1978.
- 15 - NÓBREGA, Maria Cecília de Souza. Relações entre Microestrutura e Propriedades em Varistor de ZnO. Exame de Qualificação, COPPE / UFRJ, 1986.
- 16 - Catálogo HAEFELY, Impulse Current Generator, 1981.
- 17 - EDA, Kasuo. Zinc Oxide Varistors, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 5., No 6, November / December 1989.
- 18 - EPRI - Gapless Surge Arresters for Power Systems Applications, Electric Power Research Institute, December 1980.
- 19 - ELLI, Erico. Scaricatori ad Ossido di Zinco - Tesi di Laurea, Università Degli Studi di Milano, 1981.
- 20 - LEVINSON, L. M. and PHILIPP, H. R. Zinc Oxide Varistors - A Review Ceramic Bulletin, Vol. 65, No 4, 1986.

- 21 - ABNT, Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão - Medição de Descargas Parciais, Projeto 3: 42.1 - 005, Janeiro 1980.
- 22 - NOWACKI, K. Sobretensões e Coordenação de Isolamento, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, Apostila de Curso.
- 23 - NOWACKI, K. Técnicas de Ensaio de Alta Tensão I, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, Apostila de Curso.
- 24 - VERDOLIM, Rogério Tavares e Outros. Estabilidade Térmica e Envelhecimento do Pára-Raios ZnO em Sistemas de Corrente Alternada, CEPEL.
- 25 - CAVALLIUS, N. Hyltén. Medições para Caracterizar Descargas Parciais, Picocoulomb, Microvolt e Outros, CEPEL - Relatório Técnico Nº 278 / 81.
- 26 - Curso de Sobretensões e Coordenação de Isolamento em Sistema de Alta Tensão. Convênio ELETROBRÁS / UERJ, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba.
- 27 - N. P. BOGORÓDISTSKI, V. V. PAGINKOV y B. M. TARÉIEV. Materiales Electrotecnicos, Moscou, Editorial MIR MOSCÚ, 1979.
- 28 - EPRI - Fundamental Research on Metal Oxide Varistor Technology. Electric Power Research Institute, Agosto de 1990.

ANEXO A

CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DE TANGENTE DE PERDAS E CAPACITÂNCIA

A teoria de dielétricos está bem desenvolvida apenas para sistemas lineares e não pode ser aplicada para o tratamento da região de ruptura em resistores não lineares à base de óxido de zinco. Se, entretanto, restringir-se o seu uso em tensões menores que a tensão de ruptura, uma aproximação ôhmica pode ser considerada. Tendo-se em mente essas limitações, pode-se analisar a resposta de frequência e o mecanismo de perda dielétrica nos resistores não lineares à base de ZnO usando a teoria de resposta linear [20].

O dielétrico pode ser representando, como mostra a fig. A.1, através de um circuito elétrico em série ou em paralelo de um capacitor ideal e de um "resistor ôhmico", sendo a "indutância" inerente a geometria do dielétrico e considerada apenas para modelagens em alta frequência [08].

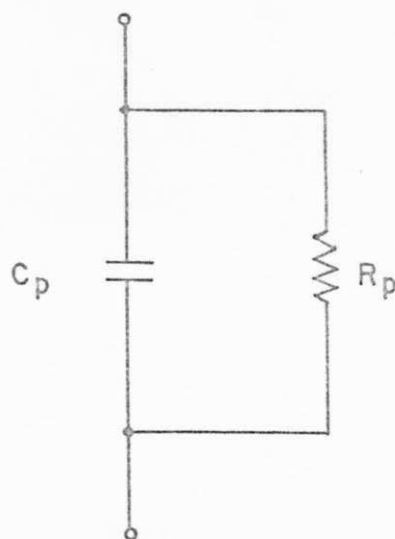


fig. A.1a - Circuito elétrico equivalente do modelo paralelo [08]



fig. A.1b - Circuito elétrico equivalente do modelo série [08]

As figs. A.2a e A.2b mostram os diagramas vetoriais para os circuitos elétricos equivalentes paralelo e série respectivamente.

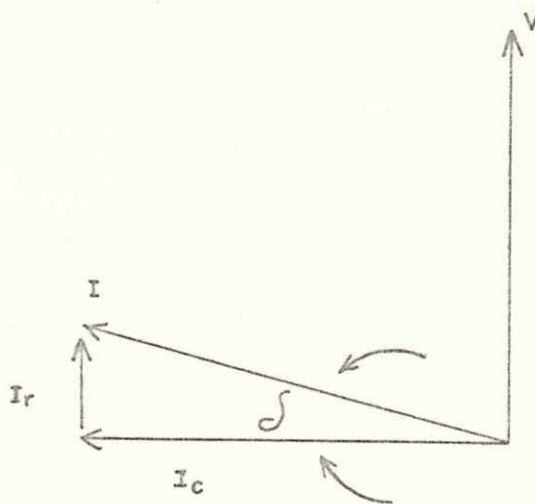


fig. A.2a - Diagrama fasorial do circuito paralelo mostrado na fig. A.1a [08]

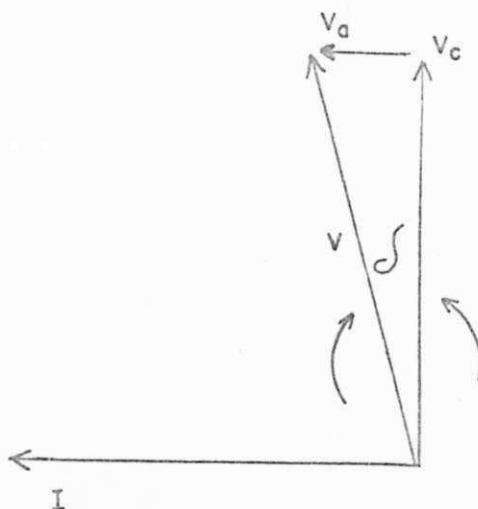


fig. A.2b - Diagrama fasorial do circuito série mostrado na fig. A.1b [08]

Onde:

I_c, V_c - corrente e tensão capacitivas

I_r, V_a - corrente e tensão ativas

I - corrente total que flui no dielético

V - tensão aplicada ao dielético

δ - ângulo de perdas

Neste trabalho, para medição de tangente e capacitância utilizou-se a ponte Schering, cujo circuito é representado na fig. A.3.

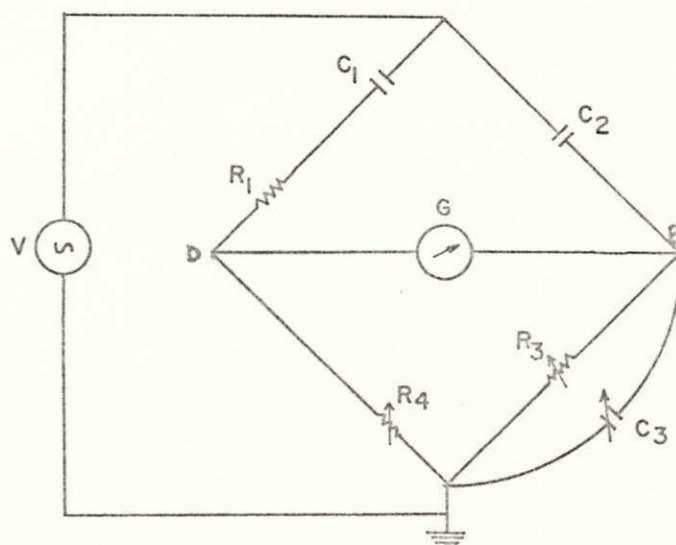


fig. A.3 - Circuito elétrico da Ponte Schering
[08]

Onde:

- R_1 e C_1 - representam a amostra
- C_2 - capacitor padrão, sem perdas
- R_4 , R_3 e C_3 - elementos variáveis do circuito
- G - galvanômetro

O princípio básico de funcionamento da Ponte Schering consiste na não existência de diferença de potencial entre os pontos D e B, ou seja:

$$V_D - V_B = 0$$

$$V_D = V - I_D \times Z_1, \text{ onde } Z_1 = R_1 + 1 / j\omega C_1$$

$$V_B = V - I_B \times Z_2, \text{ onde } Z_2 = 1 / j\omega C_2$$

Então:

$$V - I_D \times Z_1 - V + I_B \times Z_2 = 0 \implies I_D \times Z_1 = I_B \times Z_2$$

$$I_D = V / (Z_1 + Z_4), \text{ onde } Z_4 = R_4$$

$$I_B = V / (Z_2 + Z_3), \text{ onde } Z_3 = R_3 / (1 + j\omega C_3 R_3)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} (V / (Z_1 + Z_4)) \times Z_1 &= (V / (Z_2 + Z_3)) \times Z_2 = \\ &= Z_1 \times (Z_2 + Z_3) = Z_2 \times (Z_1 + Z_4) \end{aligned}$$

Logo:

$$Z_1 \times Z_3 = Z_2 \times Z_4 \quad (A.1)$$

A equação A.1 representa a condição de equilíbrio da ponte, ou seja, deflexão zero no galvanômetro.

Quando a corrente que flui através da amostra é alta, o circuito da ponte Schering sofre alterações, evitando-se, assim, que a corrente exceda a classe da resistência R_4 . A figura A.5 mostra o circuito de medição de tangente de perdas e capacitância com a ponte Schering modificada para correntes maiores que 10 mA.

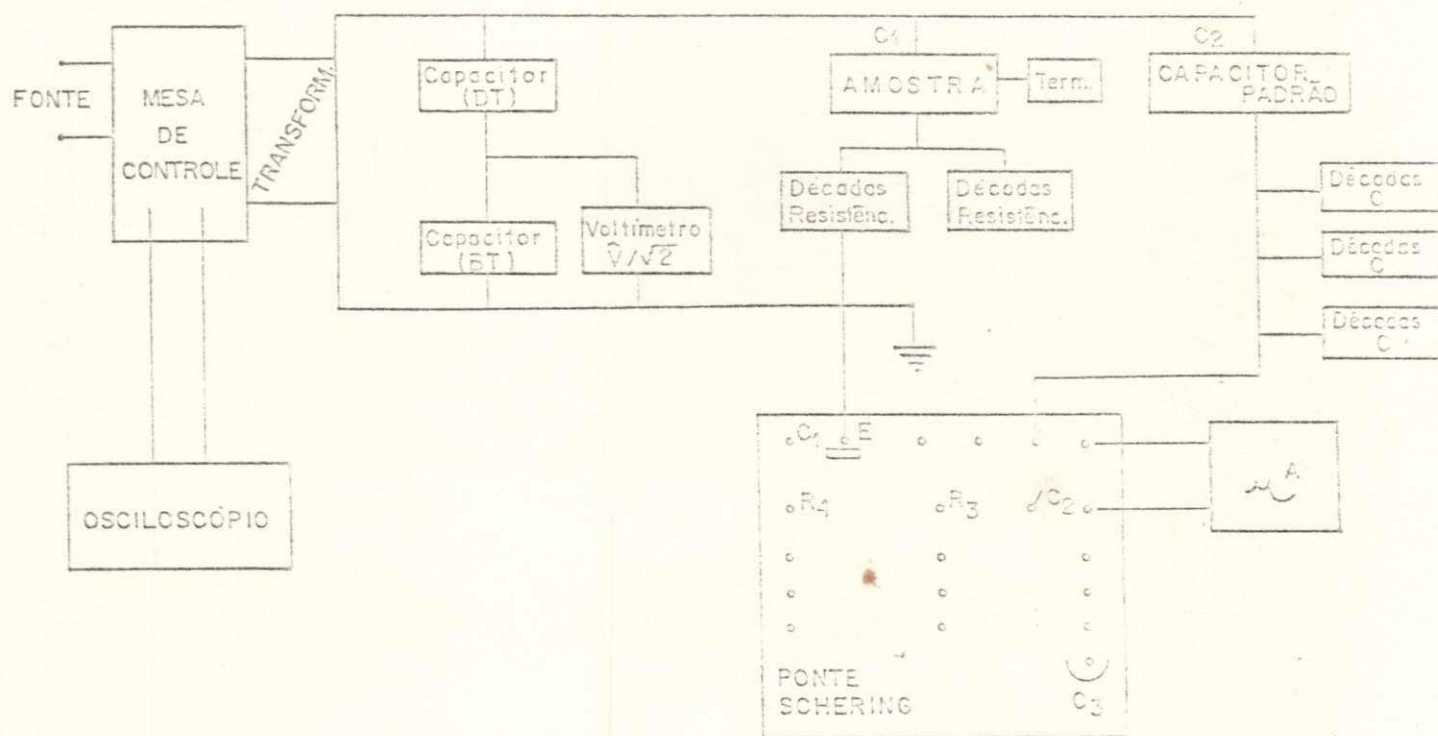


fig. A.6 - Diagrama esquemático do circuito utilizado para medição da tangente de perdas e capacitância

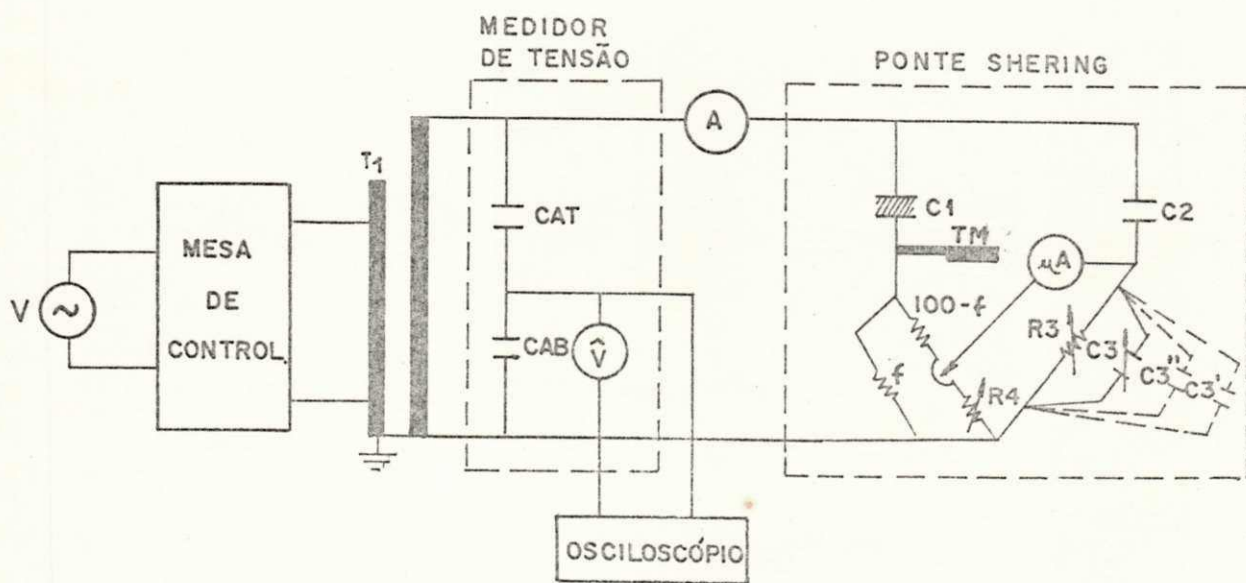


fig. A.5 - Circuito elétrico para medição de tg de perdas e capacitância, com Ponte Schering modificada para correntes maiores que 10 mA

Onde:

Ponte Schering	- portátil, tipo 4550 marca Tinsley
T ₁	- transformador, 5KVA, 220 V / 100 kV
Medidor de Tensão	- conjunto Messwandler/Baugmbh Baunberg, compondo-se de:
CAT	- capacitor de alta tensão, 100 pF
CBT	- capacitor de baixa tensão
V	- voltímetro de pico / $\sqrt{2}$, com medição direta para 100 pF
A	- milliamperímetro, marca HB
Osciloscópio	- digital, 100 MHz com memória, modelo 684
C ₁	- amostra
C ₂	- capacitor padrão, 97,5 pF, marca FERRANTI
f	- caixa de décadas de resistências com valor fixado em 30 ohms
SW	- fio deslizante
R ₄	- décadas de resistências da ponte, variável
R ₃	- décadas de resistências da ponte, fixada em 285 ohms
C ₃	- capacitor variável de 0 a 0,1 uF
C ₃ '	- capacitores variáveis de 0 a 10 uF
C ₃ "	- capacitor de 1 uF
uA	- microamperímetro, marca FLUKE, modelo 8060A
100 - f	- décadas de resistências, valor fixado em 70 ohms
TM	- termômetro e sonda - marca BRATERMO digital

ANEXO B

CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS E VERIFICAÇÃO DE POLARIZAÇÃO

O principal interesse relacionado às descargas parciais em dielétricos sólidos e líquidos, é o seu possível efeito destrutivo no material isolante. Elas podem ocorrer em cavidades, bolhas de gás ou entre camadas de isolação com características dielétricas diferentes. Umidade e impurezas, dentro da isolação ou sobre ela, bem como a poluição nas superfícies isolantes podem causar descargas parciais que ocasionam a degradação das qualidades dielétricas do material.

As descargas parciais geram pulsos de corrente decorrentes das trocas de energia, ou transferência de carga, dentro do dielétrico. As descargas parciais podem ser detectadas através da carga transferida ou pulsos de corrente, usando-se circuitos de medição adequados.

As descargas parciais são decorrentes do fenômeno de ionização de uma determinada região que leva a ruptura de parte da mesma. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da forma do eletrodo, das características do dielétrico ou dielétricos envolvidos e da tensão aplicada [08, 21, 25].

Devido a não uniformidade do campo elétrico e das características do dielétrico, pode ocorrer que pequenas regiões do isolamento, sejam submetidas a sollicitação superiores a suportabilidade máxima, chamada de rigidez dielétrica, ionizando essas regiões, e se essa ionização for suficientemente grande, haverá um colapso do dielétrico nessa região, que é denominado de descarga parcial [21, 08].

As referências [08, 21, 25] relatam o fenômeno das descargas parciais em um dielétrico. A fig. B.1 ilustra um dielétrico, com uma impureza em seu interior e o processo de descargas parciais desencadeado pela aplicação de uma diferença de potencial entre seus terminais.

Onde:

- C_1 - capacitância da região onde ocorrerão as descargas
- C_2 - capacitância da parte perfeita do dielétrico em série com C_1

- C_3 - capacitância da parte perfeita do dielétrico em paralelo com C_2 e C_1
- V_3 - tensão aplicada ao dielétrico
- V_1 - tensão na impureza da capacitância C_1
- U - tensão disruptiva em C_1
- V - tensão de extinção da descarga em C_1
- i - pulsos de corrente, gerados pelas descargas parciais

Da figura B.1, quando a tensão V_1 atinge a tensão disruptiva $U+$, ocorre uma descarga na cavidade. Logo após a tensão reduz-se até $V+$, então a descarga é extinta. Esta queda de tensão ocorre em um período muito curto, geralmente inferior a 100 ns, o qual é muito menor que o período da onda senoidal à 60 Hz (16 ms). Após a descarga ter sido extinta, a tensão sobre C_1 aumenta novamente, sendo agora uma superposição de dois campos elétricos em oposição; o campo principal a 60 Hz e aquele criado pelas cargas superficiais deixadas nas paredes da cavidade, após a última descarga. Quando a tensão sobre a cavidade atinge $U+$ ocorre uma nova descarga. Isto acontece várias vezes até que a tensão V_3 decresça e a tensão V_1 caia várias vezes para $U-$, quando ocorrerão novas descargas. Assim serão formados grupos de descargas. Pode-se, também, observar na figura B.1 que as descargas parciais causam pulsos de corrente nos terminais da amostra, os quais se concentram nas regiões onde a variação da tensão no tempo é máxima.

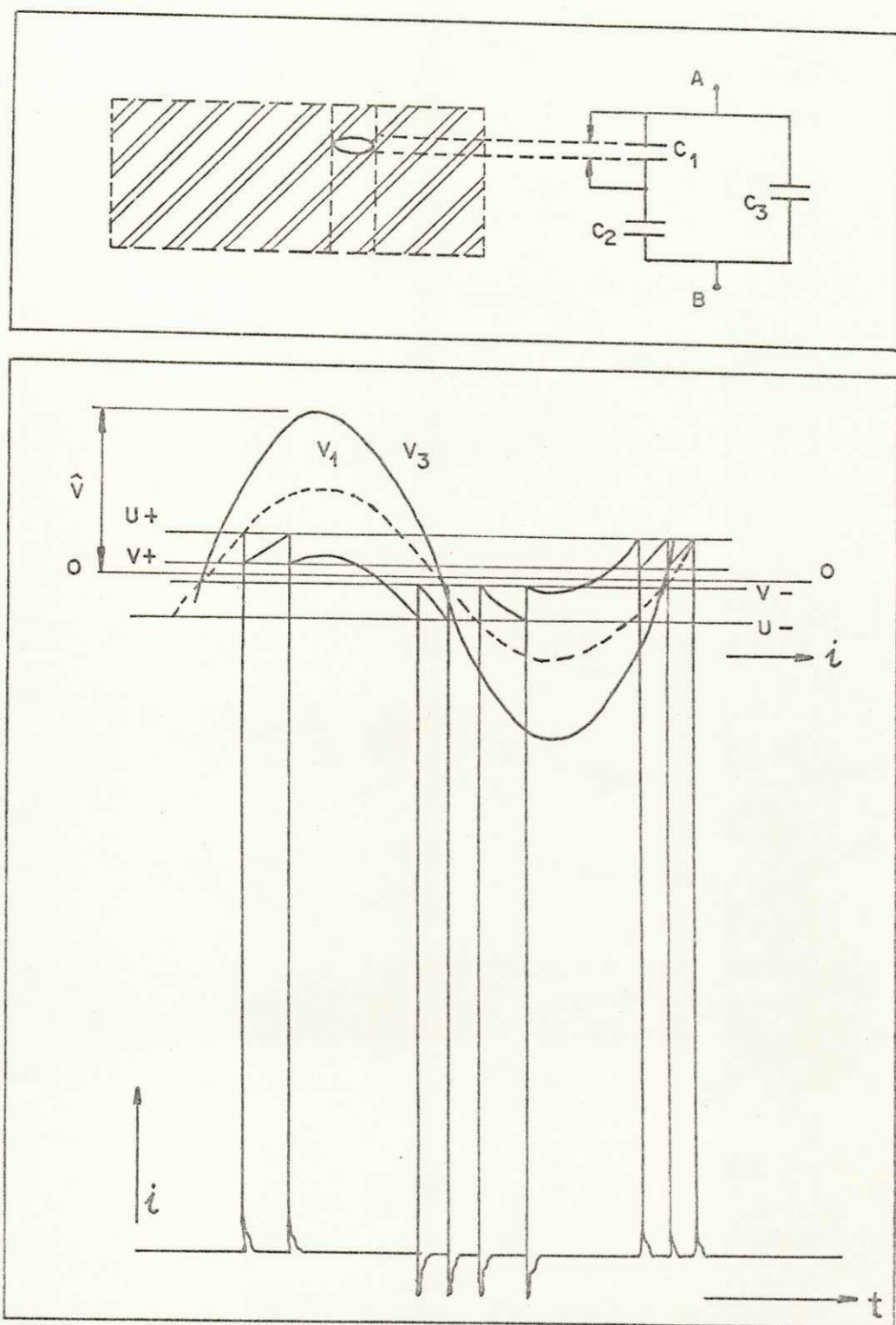


fig. B.1 - Processo de Descargas Parciais em um dielétrico com impureza [08, 25]

As descargas parciais podem ser avaliadas por diferentes grandezas, tais como, carga aparente, taxa de repetição e potência da descarga.

A queda de tensão ΔU_1 na cavidade, causada pela corrente de descarga i_1 , libera uma carga Δq_1 , onde:

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 \times C_1 \quad (B.1)$$

A corrente local i_1 não pode ser medida, mas a descarga em C_1 provoca uma rápida transferência de carga para os capacitores C_2 e C_3 do circuito equivalente. A queda de tensão resultante pode ser computada nos terminais A/B do objeto de ensaio. A magnitude de ΔU pode ser determinada pela comparação da carga armazenada antes e após a descarga.

$$\Delta U = ((C_2 / (C_2 + C_3)) \times \Delta U_1 \Rightarrow$$

$$\Delta U = (C_2 / (C_2 + C_3) \times C_1) \times \Delta q_1 \quad (B.2)$$

As estimativas empíricas para C_2 e C_3 , avaliam que os valores de ΔU são dados na variação de mV a V, enquanto que a magnitude de ΔU_1 é da ordem de KV.

A queda de tensão ΔU não pode ser relacionada para a quantidade ΔU_1 e Δq_1 na localização da falha porque as capacitâncias C_1 e C_2 são normalmente desconhecidas.

A magnitude da corrente da descarga parcial medida depende da razão das capacitâncias C_k / C_t , onde C_k é a capacitância de acoplamento e C_t é a capacitância equivalente da amostra, pois a carga é removida do capacitor C_k para compensar a queda de tensão ΔU , nos terminais da amostra. No caso ideal ($C_k \gg C_t$), e a carga q transportada por $i(t)$ é enorme, logo, de acordo com a figura B.1, tem-se:

$$q = \int i(t) dt = (C_3 + ((C_1 \times C_2) / (C_1 + C_2))) \times \Delta U \quad (B.3)$$

considerando-se $C_1 \gg C_2$ e com as equações B.1 e B.2, tem-se:

$$q = (C_3 + ((C_1 \times C_2) / (C_1 + C_3))) \times \Delta U \Rightarrow$$

$$q = (C_3 + C_2) \times \Delta U$$

da equação B.2:

$$\Delta U = (C_2 / (C_2 + C_3)) \times \Delta U_1 \Rightarrow$$

$$q = ((C_3 + C_2) \times (C_2 / (C_2 + C_3))) \times \Delta U_1$$

$$q = C_2 \times \Delta U_1 \quad (B.4)$$

da equação B.1, tem-se $\Delta q_1 = \Delta U_1 \times C_1$

então, $q = (C_2 / C_1) \times \Delta q_1 \quad (B.5)$

A carga q é denominada de " carga aparente ", ou seja, carga que, se injetada instantaneamente entre os terminais do objeto sob ensaio, causaria uma variação momentânea da tensão entre seus terminais de um valor igual ao da própria descarga parcial [21]. A carga aparente do pulso de descarga parcial está associada a Δq_1 apenas pela razão de capacitância C_2 / C_1 .

Na prática a condição $C_k \gg C_t$ não é geralmente satisfeita; com um capacitor de acoplamento grande, a fonte de alimentação será sobrecarregada e por isso não se torna economicamente viável. Contudo, um capacitor que seja apenas um pouco maior do que a capacitância C_t do objeto de ensaio, provoca uma redução na sensibilidade porque a corrente compensada $i(t)$ torna-se menor.

A partir da consideração de carga transferida no processo entre os capacitores C_t e C_k , obtém-se a seguinte relação:

$$q = C_t \times \Delta U = (C_t + C_k) \times \Delta U' \quad (B.6)$$

onde $\Delta U'$ representa a queda de tensão residual após a carga transferida. A carga que circula pelo capacitor de acoplamento, assim, pode ser medida e conseqüentemente pode ser referenciada com a carga medida q_m .

$$q_m = C_k \times \Delta U' \quad (B.7)$$

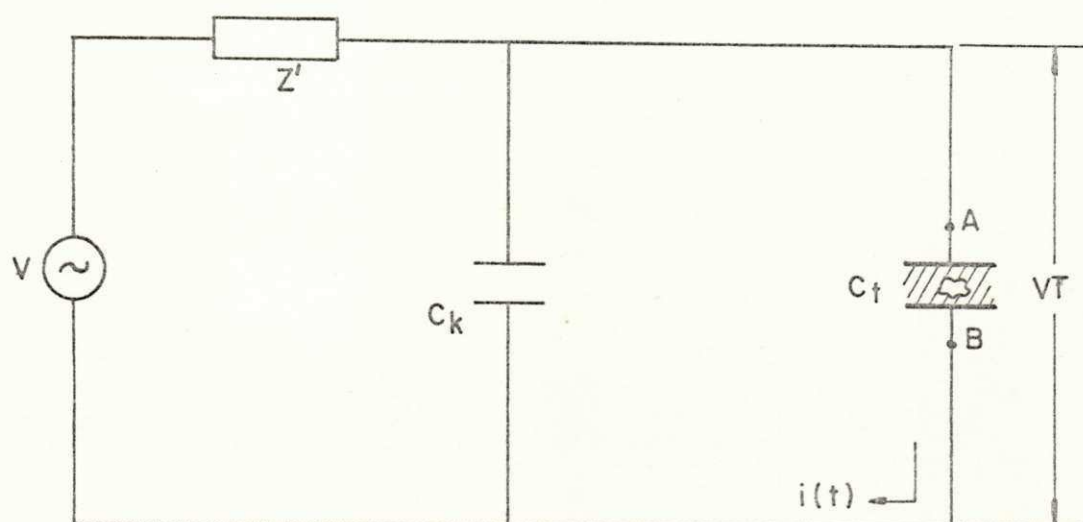


fig. B.2 - Circuito simplificado de medição
[08, 21]

Onde:

C_k - capacitância de acoplamento

C_t - capacitância da amostra

Z' - impedância do circuito

V_T - tensão na amostra

Na medição da carga aparente (q), três circuitos básicos podem ser utilizados, conforme mostram as figuras B.3, B.4 e B.5.

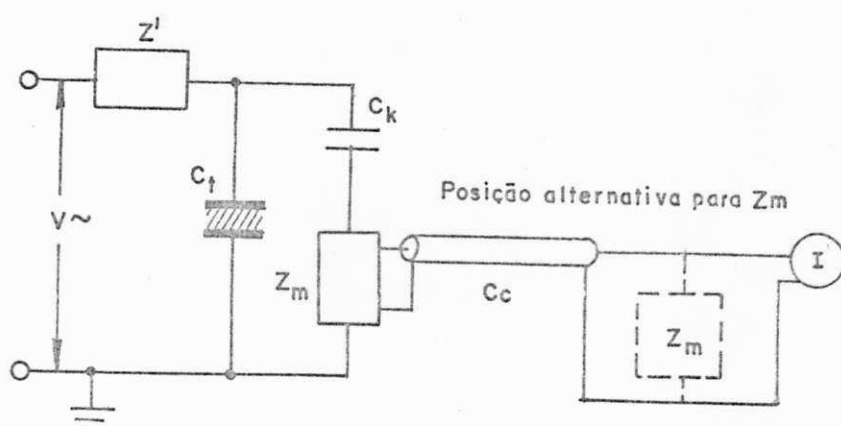


fig. B.3 - Impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento [21]

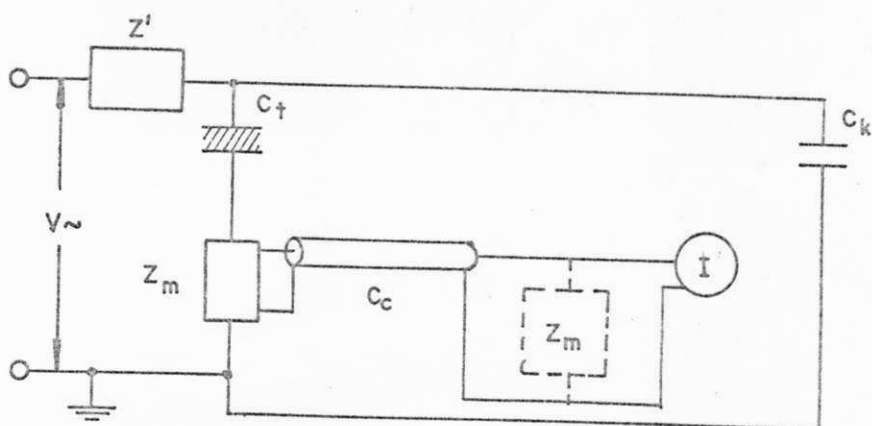


fig. B.4 - Impedância de medição em série com a amostra [21]

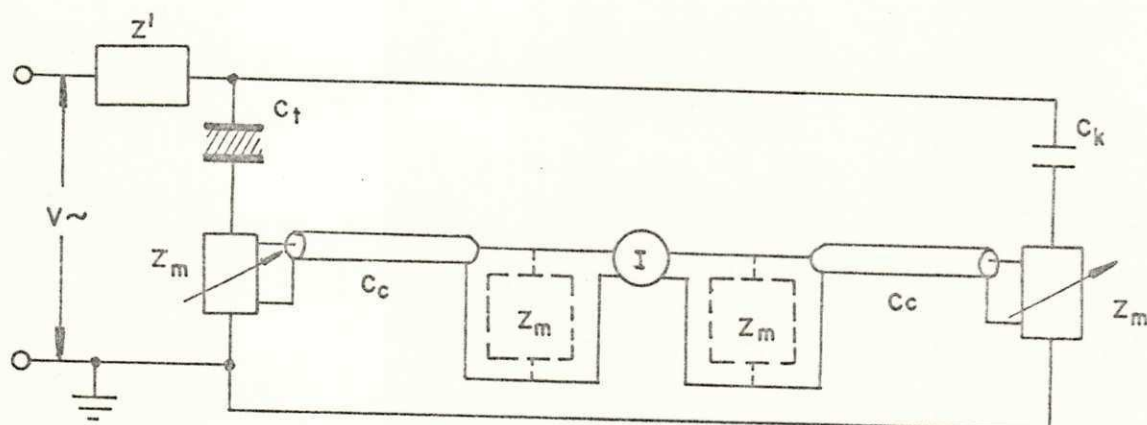


fig. B.5 - Circuito balanceado [21]

Onde:

C_k - capacitância de acoplamento

C_t - capacitância da amostra

V - tensão

C_c - cabo coaxial

I - instrumento de medição

Z_m - impedância de medição

O circuito da fig. B.5 apresenta como principal vantagem a eliminação do ruído externo, entretanto, exige que o capacitor de acoplamento C_k , isento de descargas parciais na tensão de ensaio, tenha valor próximo de C_t . Ressalta-se que, para uma falha em C_t , o circuito de medição ficará sob alta tensão.

O circuito da fig. B.4 apresenta a vantagem de detectar todo pulso de descarga vindo da amostra sob ensaio, entretanto, caso ocorra uma falha de C_t , o circuito de medição ficará submetido à alta tensão.

O circuito da fig. B.3, tem como principal problema a medição indireta dos pulsos de descarga proveniente de C_t , a sua precisão depende da relação C_k / C_t , conforme demonstra-se a seguir. Contudo a sua principal vantagem é que não se tem alta tensão sobre o circuito de medição quando ocorre uma ruptura em C_t .

O circuito de ensaio, usado neste trabalho, é representado na figura B.8, portanto, tem-se que a carga aparente:

$$q = (C_k + C_t) \times \Delta U' \quad (B.8)$$

Da suposição de que o elemento Z_m é passivo no processo de transferência de carga, vem:

$$q_m = C_k \times \Delta U' \quad (B.9)$$

Assim a relação entre a carga medida (q_m) e a carga aparente (q), é:

$$q_m / q \quad \text{com a relação } C_k / (C_t + C_k)$$

$$q_m = C_k \times \Delta U' \quad (B.10)$$

$$q = (C_t + C_k) \times \Delta U'$$

$$q_m / q = C_k / (C_t + C_k) \quad (B.11)$$

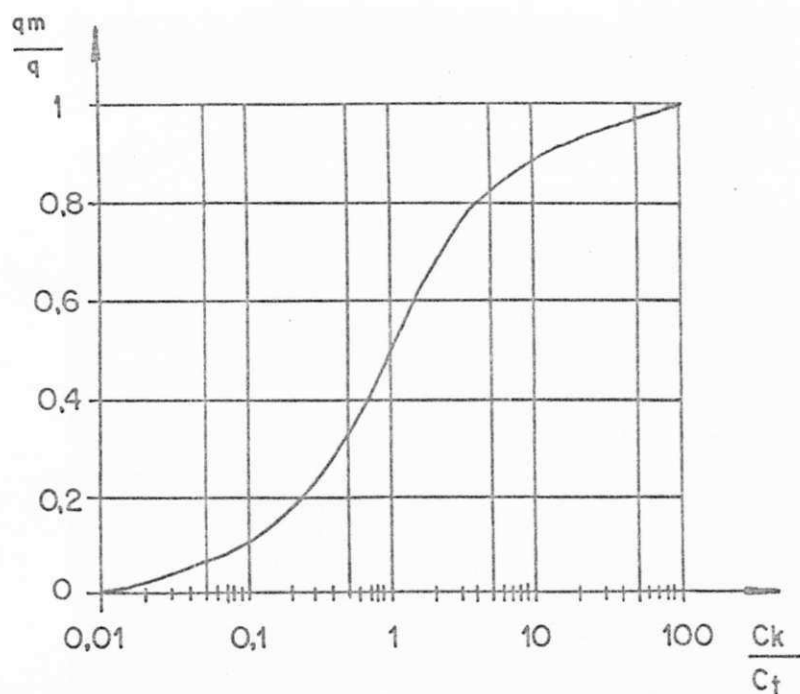


fig. B.6a - Influência da relação (C_k / C_t) sobre a relação q_m / q [21]

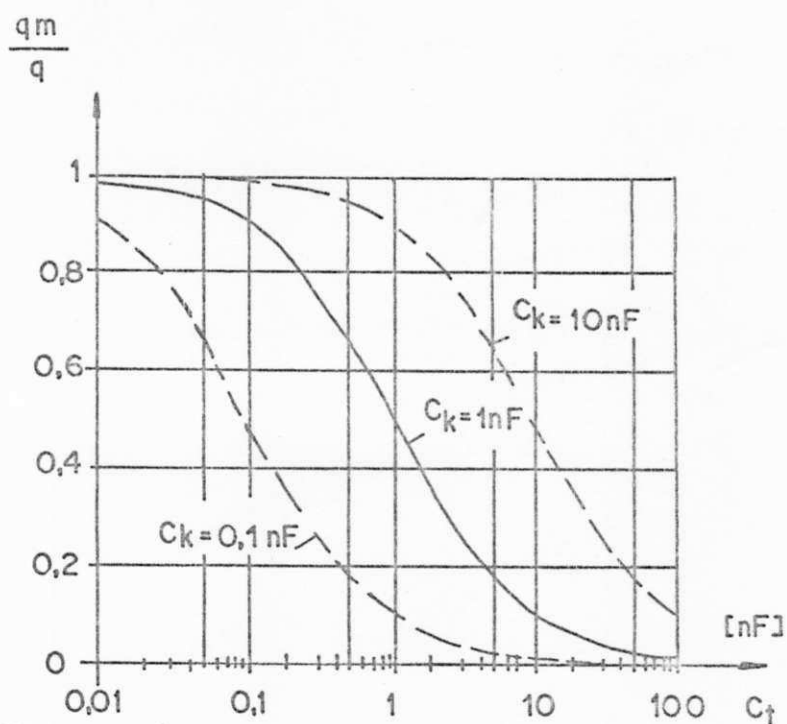


fig. B.6b - Influência do capacitor de acoplamento (C_k) sobre a relação q_m / q [21]

1. CALIBRAÇÃO

Segundo a norma da ABNT, referência [21], a calibração do circuito pra medição de descargas parciais pode se feita de duas maneiras: calibração direta e calibração indireta.

1.1. CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE CARGA APARENTE, q (INDIRETA)

A calibração de um instrumento de medição de carga aparente q de descargas parciais individuais é executada injetando-se curtos pulsos de corrente, de carga conveniente e conhecida q_0 , no impedor Z_m . Esta calibração determina o fator de escala do instrumento. Tais pulsos podem ser obtidos por meio de um gerador de degrau de tensão de amplitude U_0 , em série com uma capacitância baixa conhecida C_0 . Nestas condições, o pulso de calibração é equivalente à descarga de amplitude,

$$q_0 = U_0 \times C_0 \quad (B. 12)$$

1.2. CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO NO CIRCUITO DE ENSAIO COMPLETO (DIRETA)

A calibração do instrumento no circuito de ensaio completo é feita para determinar-se o fator de escala, K_e , nas condições de ensaio reais com o objeto sob ensaio inserido no circuito. Este fator é afetado pelas características do circuito; geralmente a sensibilidade aumenta com o valor do capacitor de acoplamento C_k . A calibração deve ser repetida para cada novo objeto sob ensaio, excluindo-se os casos em que os ensaios são efetuados sobre uma série de objetos similares, com valores de capacitância entre $\pm 10\%$ do valor médio.

Esta calibração precisa ser feita somente para um ou alguns valores da grandeza medida.

A calibração pode ser utilizada para verificar a mínima intensidade de descargas parciais que pode ser medida. Esta intensidade mínima é afetada pelo nível de perturbações e pelas características do circuito. A calibração do instrumento para medição de q no circuito completo de ensaio deve ser feita injetando-se curtos pulsos de corrente nos terminais do objeto sob ensaio como mostrado nas figuras B.7a. e B.7b., é importante notar que poderão ser introduzidos erros se os pulsos de calibração forem aplicados entre os terminais de alta tensão e terra.

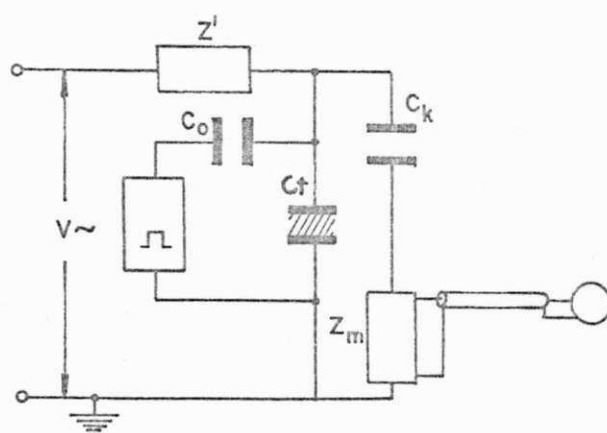


fig. B.7a - Calibração do circuito com impedor de medição ligado em série com o capacitor de acoplamento [21]

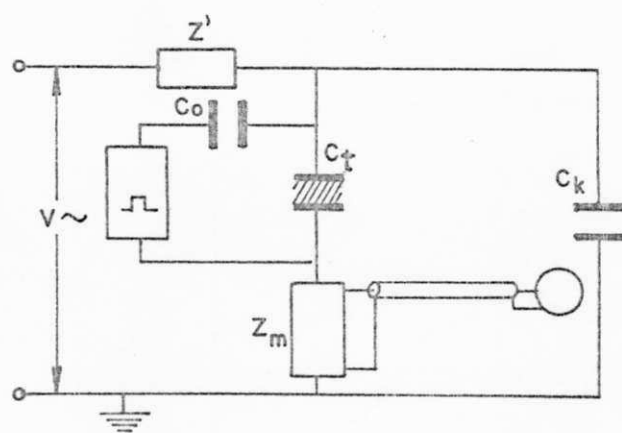


fig. B.7b - Calibração do circuito com impedor de medição ligado em série com o objeto sob ensaio [21]

Onde:

- Z' - impedância do circuito
- V - tensão
- C_t - capacitância da amostra
- Z_m - impedância de medição
- C_k - capacitor de acoplamento
- C_o - capacitor de calibração

Os pulsos de calibração são obtidos de forma descrita no item 1. e devem satisfazer os mesmos requisitos. Em complementação a estes requisitos, o valor de C_0 não deve ser superior a $0,1 \times (C_t + C_k)$. O pulso de calibração pode, então, ser considerado equivalente a uma intensidade de descargas parciais.

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

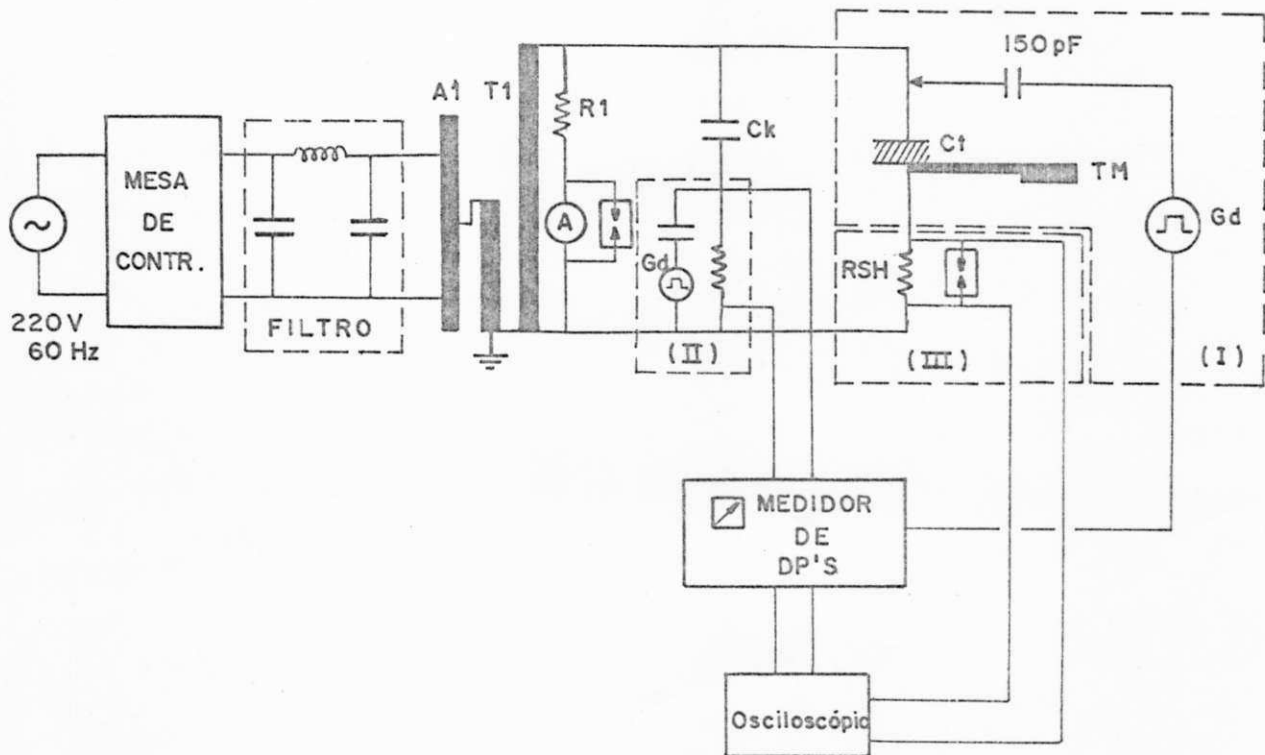


fig. B.8 - Circuito para medição de Descargas Parciais e verificação de polarização

Onde:

- Filtro - filtro passa baixa, frequência de corte 10 KHz
(começa a cortar em 2 KHz, cortando totalmente em 10 KHz)
- A₁ - autotransformador, 9 KVA, 220/0 - 240 V
- T₁ - transformador, 5 KVA, 220 V - 100 KV
- R₁ - 280 M ohms
- A - microamperímetro analógico
- MDP'S - medidor de Descargas Parciais - marca BIDDLE
(Balanced Partial Discharge (corona) Detector)
- Gt - amostra
- Gk - capacitância de acoplamento 6400 pF, para 66 KV
- TM - termômetro e sonda - marca BRATERMO DIGITAL
- OSCIL. - osciloscópio TEKTRONIX 7613, plug in's 7A18 e 7B50
- CIRC I - circuito de calibração direta
- CIRC II - circuito de calibração indireta
- CIRC III - circuito para medição e verificação da corrente de polarização
- RSH - resistor Schunt de 1024 ohms para medição da corrente da amostra

O amplificador do medidor de descargas parciais é de banda passante com $f_2 - f_1 = 16 - 180$ KHz, com uma perda de sensibilidade nos limites da faixa de -3db.

ANEXO C

CIRCUITO PARA GERAÇÃO / MEDIÇÃO DE IMPULSOS DE CORRENTE E VERIFICAÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL

1. CIRCUITO RLC SÉRIE

O circuito RLC é caracterizado por dois parâmetros: a constante de amortecimento BETA (β_0) e a frequência de ressonância angular (ω_0). São três os tipos de ondas distintas que podem ser obtidas de acordo com a relação entre β_0 e ω_0 :

1.1. CASO SUBAMORTECIDO, $\beta_0 < \omega_0$

$$\beta_0 = R/2L \quad \text{e} \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

A forma de onda da corrente é:

$$i(t) = V/WL \times \exp(-R/2L \times t) \sin \omega t$$

$$\text{onde } \omega = \sqrt{(1/LC) - (R^2 \times L^2/C)} \quad (\text{C.1})$$

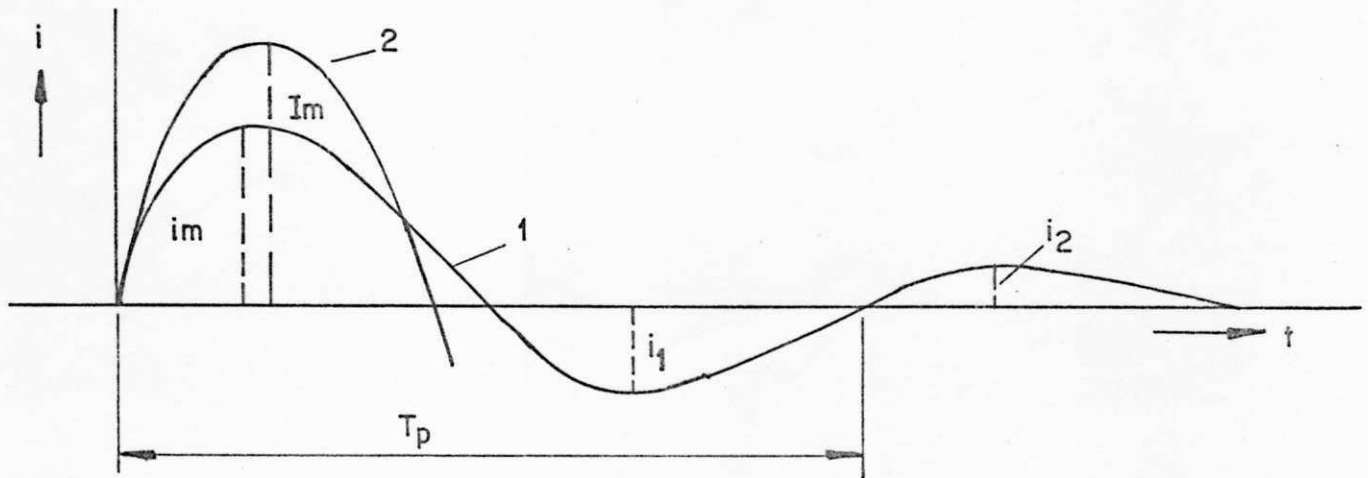


fig. C.1 - CURVA 1. Onda senoidal da corrente de equilíbrio amortecida

CURVA 2. $R=0$, onda senoidal não amortecida [16]

1.2. CASO AMORTECIMENTO CRÍTICO, $\beta_0 = \omega_0$

$$\text{Sendo } \beta_0 = \omega_0 \quad R/2L = 1/\sqrt{LC}$$

quando este fato ocorre, obtem-se um limite aperiódico, que é delimitado pelo valor da resistência, ou seja:

$$R_{ap} = 2 \times \sqrt{L/C} \quad (C.2)$$

1.3. CASO SUPERAMORTECIDO, $\beta_0 > \omega_0$

$$\beta_0 > \omega_0 \Rightarrow R/2L > 1/\sqrt{LC}$$

A forma de onda da corrente é:

$$i(t) = I_0 \times (\exp(-t/T_1) - \exp(-t/T_2)) \quad (C.3)$$

$$\text{onde: } I_0 = V / \sqrt{R^2 - 4L/C}$$

$$T_1 = 2L / R - \sqrt{R^2 - 4L/C}$$

$$T_2 = 2L / R + \sqrt{R^2 - 4L/C}$$

2. DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO CIRCUITO DE IMPULSO

De acordo com a referência [16], o grau de amortecimento " X " do circuito relacionará a variação da resistência total da instalação e o valor da resistência no limite aperiódico. Portanto:

$$X = R / R_{ap} \quad (C.4)$$

De acordo com a " Commission Electrotechnique Internationale " (CEI), existe uma região de " trabalho " de " X " com $T_s / T_r = 4/10$ ou $8/20$ us e com uma tolerância de 10 % .

A região é $0,46 < X < 0,70$, onde o limite inferior ($X = 0,46$) é devido a máxima oscilação i_1 (20% da corrente máxima), enquanto o limite superior ($X = 0,70$) restringi-se a situação da variação máxima ($\pm 10\%$) descritas por T_r e T_s .

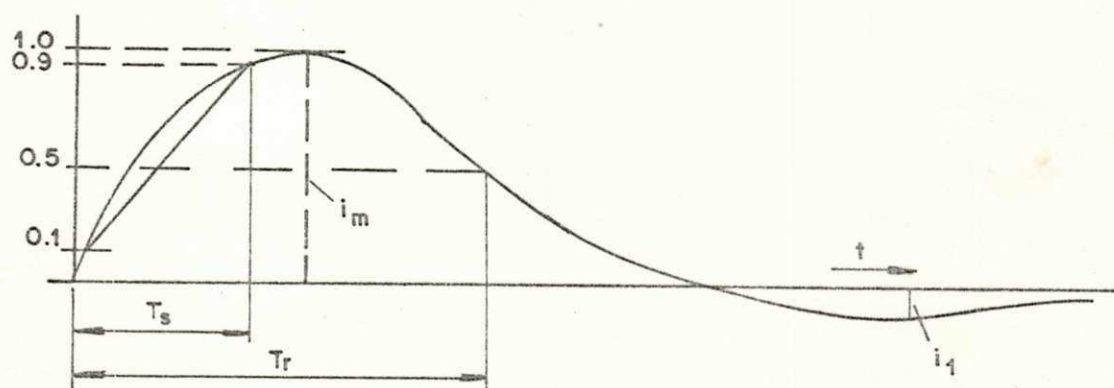


fig. C.2 - Definição do impulso exponencial de corrente

onde: T_r - tempo de cauda

T_s - tempo de frente

i_m - valor de pico da corrente

i_1 - máxima oscilação da corrente

O grau de utilização do circuito (N) é definido pela relação i_m / I_m , assim tem-se:

$$N = i_m / I_m \quad (C.5)$$

Como a constante de tempo do circuito é $T_k = \sqrt{LC}$ e a impedância característica é $Z_k = \sqrt{L/C}$, a amplitude da corrente pode ser expressa por:

$$i_m = V \times N / Z_k \text{ ou } i_m = (V \times N \times C) / T_k \quad (C.6)$$

O tempo de frente (T_s) e o tempo de cauda (T_r) são colocados em função de duas variáveis, $(g \text{ e } h)$, como mostra-se a seguir.

$$T_s = T_k / h \quad (C.7)$$

$$T_r = g \times T_s \quad (C.8)$$

Os parâmetros h , g , i_1 / i_m e N são colocados de forma gráfica em função do grau de amortecimento "X" (Vê figs. C.4 e C.5).

3. CÁLCULO DOS ELEMENTOS DO CIRCUITO DE GERAÇÃO DE IMPULSO

Para a forma de onda usada neste trabalho, $8 / 20 \text{ us}$ com amplitude de 15 KA e uma tensão de carregamento $V = 26 \text{ KV}$, os parâmetros do circuito são:

Os valores de X , N e i_1 / i_m são escolhidos no gráfico da figura C.4.

$X = 0,60$ $N = 0,50$ $i_1 / i_m = 0,10$, encontra-se os valores de g e h :

$$g = 2,95 \quad e \quad h = 1,153$$

Através das equações C.7 e C.8 tem-se:

$$Tr/Ts = g = 2,95, \text{ como } Tr/Ts = 20/8 = 2,5 = gn$$

A percentagem de erro é calculada por:

$$p\% = (g - gn) / (g + gn)$$

$$p\% = (2,95 - 2,50) / (2,95 + 2,50) = 8,25\%$$

Corrigindo-se os tempos:

$$Ts = 8 \times (1 - 8,25/100) = 7,34 \text{ us}$$

$$Tr = 20 \times (1 + 8,25/100) = 21,65 \text{ us}$$

$$Tr/Ts = 21,65 / 7,34 = 2,95$$

$$Tk = h \times Ts = 1,153 \times 7,34 = 8,463 \text{ us}$$

Pela equação C.6:

$$C = (im \times Tk) / (V \times N) = (15 \times 8,463) / (26 \times 0,50)$$

$$C = 9,8 \text{ uF}$$

Tem-se ainda que:

$$L = Tk^2 / C = (8,463)^2 / 9,8 = 7,3 \text{ uH}$$

Com estes valores:

$$im = (V \times N) / \sqrt{L/C} = (26 \times 0,5) / \sqrt{7,3/9,8} = 15 \text{ KA}$$

$$\text{Sendo Rap} = 2 \times \sqrt{L/C} = 2 \times \sqrt{7,3/9,8} = 1,73 \text{ Ohms}$$

De acordo com a equação C.5:

$$X = R / R_{ap} \Rightarrow R = X \times R_{ap} = 0,6 \times 1,73 = 1,04 \text{ Ohms}$$

Portanto:

R - resistência total da instalação = 1,04 Ohms

L - indutância total da instalação = 7,30 uH

C - capacitância = 9,80 uF

Para a medição da corrente de impulso usou-se um resistor Shunt de 5,5 m Ohms.

Neste mesmo circuito de geração e medição de impulsos de corrente, colocou-se um divisor misto para a verificação da tensão residual nos blocos de ZnO. A tensão residual é definida como sendo a tensão entre os terminais de um pára-raios durante a passagem da corrente de descarga. Para os pára-raios de ZnO o ensaio de tensão residual determinará o nível de proteção para todos os tipos de impulsos de corrente uma vez que não existem tensões disruptivas de impulso de tensão.

O circuito de montagem experimental é mostrado na figura C.3.

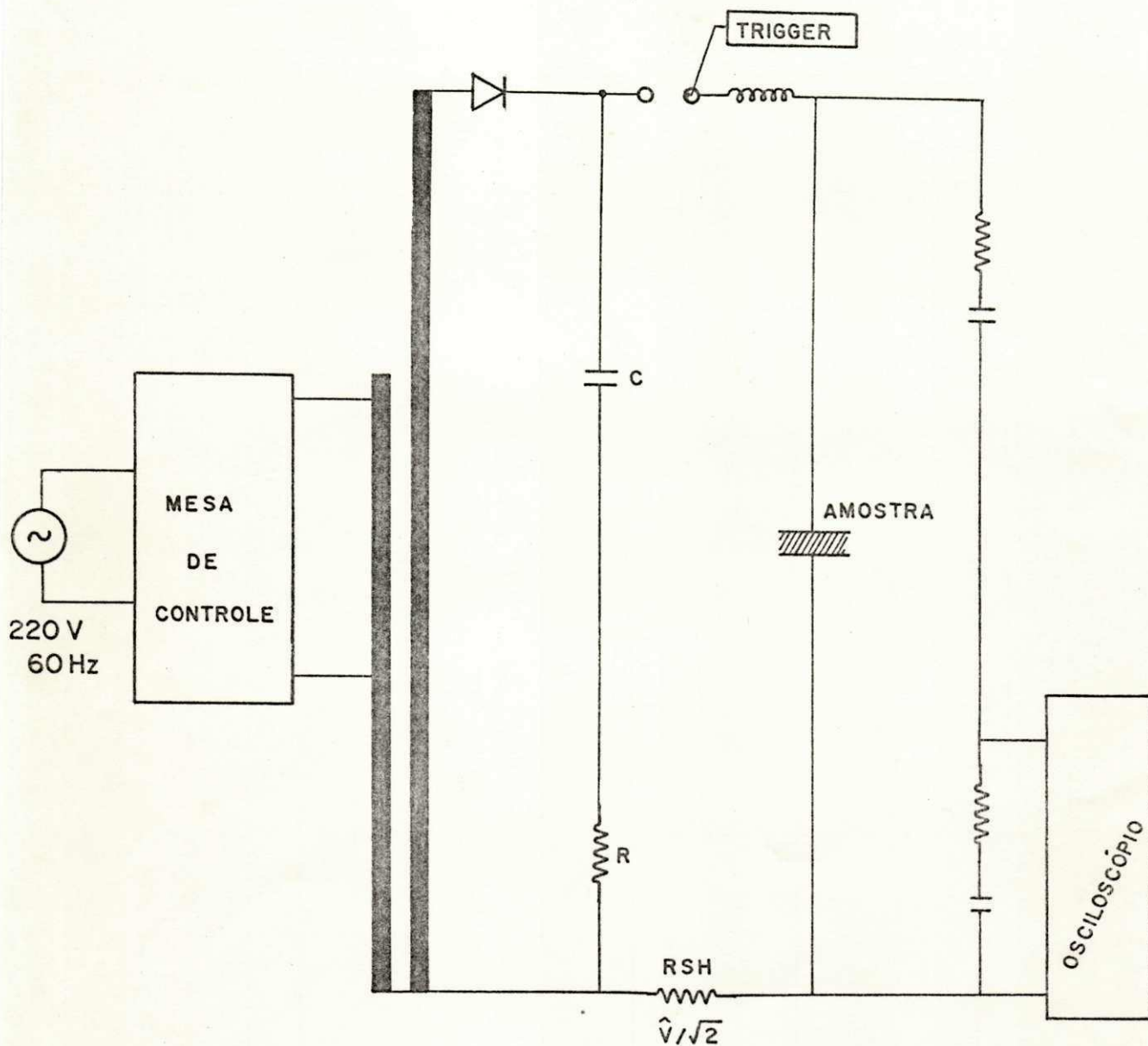


fig. C.3 - Circuito para geração / medição de corrente de impulso e verificação da tensão residual

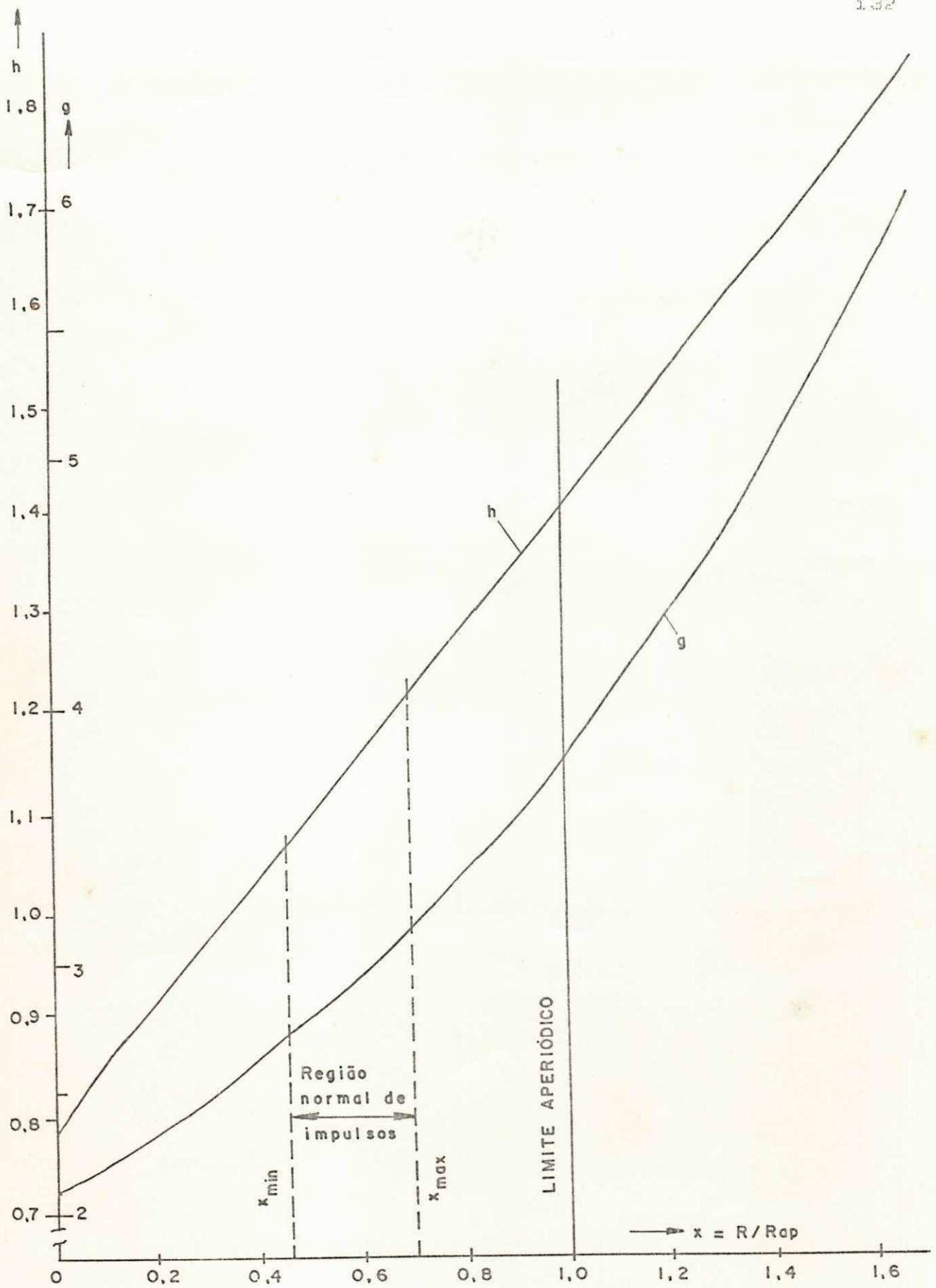


fig. C.4 - Valores auxiliares " g " e " h " em função do grau de amortecimento " X " [16]

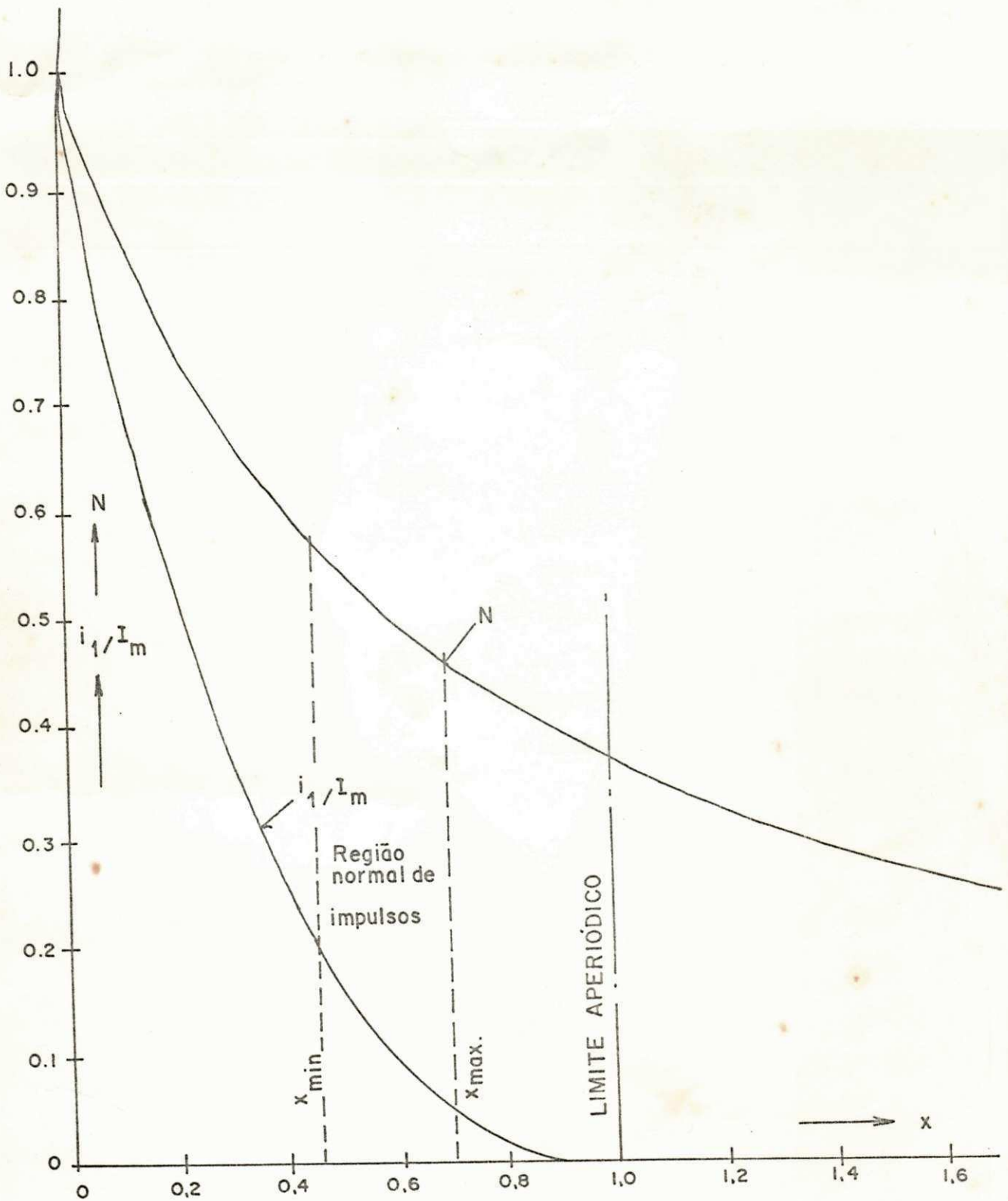


fig. C.5 - Grau de utilização " N " e a relação i_1 / i_m em função do grau de amortecimento " X " [16]