

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

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS VARISTORES
DE ZNO NA REGIÃO DE BAIXAS TENSÕES APLICADAS

JORGE LUIZ DE FRANCO

CAMPINA GRANDE - Pb
JUNHO - 1993

JORGE LUIZ DE FRANCO

ESTUDOS DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS VARISTORES
DE ZNO NA REGIÃO DE BAIXAS TENSÕES APLICADAS

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DE ENERGIA

S.R. NAIDU
Orientador

CAMPINA GRANDE - Pb
JUNHO - 1993.



F825e

Franco, Jorge Luiz de.

Estudos das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas / Jorge Luiz de Franco. - Campina Grande, 1993.
203 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.

"Orientação : Prof. Dr. Sreeramulu Raghuram Naidu".
Referências.

1. Processamento de Energia. 2. Varistor de ZnO - Propriedades Elétricas e Dielétricas. 3. Tensões Elétricas. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Naidu, Sreeramulu Raghuram. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.311(043)

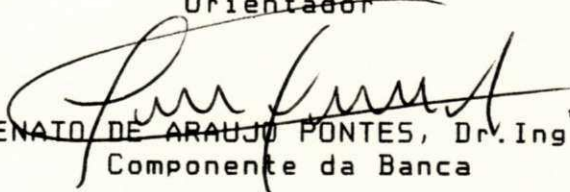
ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELETRICAS DOS VARISTORES DE ZNO
NA REGIÃO DE BAIXAS TENSES

JORGE LUIZ DE FRANCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15.06.1993



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB
Orientador



LUIZ RENATO DE ARAUJO PONTES, Dr. Ing., UFPB
Componente da Banca



EDSON GUEDES DA COSTA, Mestre, UFPB
Componente da Banca



EGON ANTONIO TORRES BERG, Dr., LORENZETTI-PR
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
JUNHO - 1993

Aos meus pais HÉlio e Lenyr

UFCCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma colaboraram no sentido de permitir o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, em especial ao meu orientador Dr. S.R. Naidu pelo apoio técnico, orientação e incentivo a mim dedicados, ao amigo e Eng^o Claudio Magnanini da Line Material do Brasil S.A. pelas inúmeras sugestões técnicas prestadas durante o desenvolvimento do trabalho. Ao CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica pelo apoio técnico e administrativo indispensável para a realização deste trabalho, em especial aos pesquisadores Agenor Osório de Freitas Múndin, Orsino Borges de Oliveira Filho e Fernando Antônio Chagas e aos técnicos de Laboratório José Carlos da Rocha, Jonir Rangel, João Batista Limas, José Antônio Pinto Rodrigues, George O. P. Sinivirta, Ozéas Moreno Lima, Marta M. de C. Olivieri e Mauro Santos Esposito. Ao Eng^o Reginaldo Freire de Santana da Chesf e aos professores Paulo de Tarso Loureiro Garcia de Medeiros e Edson Guedes da Costa da UFPb, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho. A Mirian de Oliveira Barbosa e Lucimar Gerhardt, secretárias do CEPEL, pela ajuda na datilografia e impressão do trabalho. A Angela de Lourdes Ribeiro Matias, secretária da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPb, pelo apoio administrativo e, finalmente a Ana Lúcia da Rocha Conforte, que compartilhou comigo das alegrias e dificuldades encontradas, durante os dois primeiros anos de execução deste trabalho.

ABREVIATURAS UTILIZADAS AO LONGO DO TRABALHO NÃO
EXPLICITADAS NO TEXTO

- CA - Símbolo utilizado para representar sistemas de tensão alternada
- CC - Símbolo utilizado para representar sistemas de tensão contínua
- AC - Símbolo utilizado para representar sistemas de tensão alternada, em inglês
- DC - Símbolo utilizado para representar sistemas de tensão contínua, em inglês
- HVDC - Sistema de transmissão em Alta Tensão para corrente contínua
- HVAC - Sistema de transmissão em Alta Tensão para corrente alternada
- I_{rDC} - corrente resistiva para tensão contínua
- I_{rAC} - componente resistiva da corrente para tensão alternada
- I_{cAC} - componente capacitiva da corrente para tensão alternada
- I_{tAC} - corrente que circula pelo varistor em tensão alternada

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características de alguns óxidos utilizados na produção de varistores de ZnO

Tabela 2.2 - Efeito da temperatura de sinterização sobre o tamanho médio dos grãos e a capacitância para varistores de ZnO com uma mesma composição

Tabela 2.3 - Influência dos elementos utilizados como aditivos na formação dos varistores

Tabela 2.4 - Fases cerâmicas identificadas em sistemas multicomponentes

Tabela 3.1 - Progresso na pesquisa sobre o mecanismo de condução de corrente através dos varistores de ZnO

Tabela 6.1 - Valores obtidos para $N_s(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura ambiente

Tabela 6.2 - Valores obtidos para $N_s(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura de 60°C

Tabela 6.3 - Valores obtidos para $N_s(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura de 100°C

TABELA A2.1 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.2 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.3 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.4 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.5 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.6 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TABELA A2.7 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TABELA A2.8 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TABELA A2.9 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TABELA A2.10- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura ambiente, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

TABELA A2.11- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura de 60°C, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

TABELA A2.12- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura de 100°C, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fabricação dos varistores de ZnO
- Figura 2.2 - Representação esquemática de um processo simplificado de produção de varistores
- Figura 2.3 - Efeito da temperatura de sinterização sobre o coeficiente de não-linearidade α
- Figura 2.4 - Efeito da temperatura de sinterização sobre as propriedades dos varistores
- Figura 2.5 - Efeito do tempo de sinterização sobre as propriedades dos varistores
- Figura 2.6 - Efeito da concentração do Bi₂O₃ ao ZnO sobre o coeficiente de não-linearidade
- Figura 2.7 - Efeito da adição do Co₂O₃ e do MnO₂ sobre o sistema ZnO-Bi₂O₃ contendo 1 mol% de Bi₂O₃
- Figura 2.8 - Efeito do Sb₂O₃ ao sistema Bi₂O₃-Co₂O₃-MnO₂ numa relação 2:2:1 sobre o coeficiente de não-linearidade e a tensão de referência
- Figura 2.9 - Efeito da quantidade total de aditivos sobre o coeficiente de não-linearidade α
- Figura 2.10 - Efeito da concentração de cada aditivo sobre a tensão de referência
- Figura 2.11 - Efeito da concentração de cada aditivo sobre a corrente CC na tensão contínua de operação
- Figura 2.12 - Efeito da concentração de cada aditivo sobre a constante dielétrica
- Figura 2.13 - Efeito da concentração de cada aditivo sobre a energia (J/cm³)

- Figura 2.14 - Efeito da concentração de Nitrato de Alumínio sobre as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores
- Figura 2.15 - Efeito da concentração de vários aditivos sobre as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores
- Figura 2.16 - Representação esquemática da microestrutura proposta por Matsuoka para os varistores de ZnO
- Figura 2.17 - Variação das fases cerâmicas com relação a quantidade de aditivos no sistema $(100-X)\text{ZnO}+X/6(\text{Bi}_2\text{O}_3+2\text{Sb}_2\text{O}_3+\text{Co}_2\text{O}_3+\text{MnO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (% molar)
 $T_s = 1350^\circ\text{C}$
- Figura 2.18 - Efeito da temperatura de sinterização sobre as fases cristalinas formadas no sistema $(100-X)\text{ZnO}+X/6(\text{Bi}_2\text{O}_3+2\text{Sb}_2\text{O}_3+\text{Co}_2\text{O}_3+\text{MnO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3)$ (% molar), para X menor ou igual a 30.
- Figura 2.19 - Representação esquemática das microestruturas dos varistores
(a) - sistema ZnO-Bi₂O₃
(b) - sistema ZnO-Pr₆O₁₁
- Figura 2.20 - Localização da fase rica em Bi₂O₃
(a) - formando uma camada intergranular contínua
(b) - apresentando uma espessura variável
- Figura 2.21 - Esquema representativo do modelo idealizado para representar a microestrutura dos varistores formados a partir do Bi₂O₃
- Figura 3.1 - Característica "tensão x corrente" para os varistores de ZnO
- Figura 3.2 - Característica "tensão x corrente" para os varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas
- Figura 3.3 - Efeito da temperatura sobre a corrente CC e as componentes resistiva e capacitiva CA

- Figura 3.4 - a) Característica $V \times I$ dos varistores de ZnO
b) Perdas nos varistores de ZnO sob aplicação de diferentes solicitações de tensão
- Figura 3.5 - Efeito da tensão e da frequência sobre (a) a corrente total
(b) e a potência
- Figura 3.6 - Efeito da frequência sobre (a) a corrente total
(b) e a potência, para diferentes níveis de tensão aplicada
- Figura 3.7 - Determinação das constantes K e a em função da amplitude da corrente, para um dado varistor
- Figura 3.8 - Variação da tensão residual com o tempo de frente da corrente de impulso
- Figura 3.9 - Efeito da temperatura sobre a tensão residual dos varistores para a região de altas correntes
- Figura 3.10 - Efeito da frequência sobre a constante dielétrica e a tangente de perdas
- Figura 3.11 - Efeito da frequência e da temperatura sobre resistividade paralela
- Figura 4.1 - Circuito equivalente para o modelo proposto por Levinson & Philipp
- Figura 4.2 - Circuito equivalente para um varistor de ZnO proposto por Levinson & Philipp a partir dos estudos de efeito da temperatura na resposta a frequência dos varistores
- Figura 4.3 - Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Matsuura & Yamaoki
- Figura 4.4 - Circuito elétrico para os varistores de ZnO proposto por Emtage et alii

- Figura 4.5 - Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Knetch & Burger
- Figura 4.6 - Circuito elétrico equivalente para a microestrutura dos varistores de ZnO proposto por Einzinger
- Figura 4.7 - Circuito equivalente proposto por Eda
- Figura 4.8 - Desmembramento do circuito equivalente proposto por Eda
- Figura 4.9 - Circuito equivalente para os varistores de ZnO
- Figura 4.10 - a) Variação das constantes dielétricas série e paralela com a frequência
b) e variação das resistividades série e paralela com a frequência
- Figura 4.11 - Circuito elétrico equivalente proposto por Liang Yu-Jin et alii para descrever o comportamento elétrico dos varistores de ZnO
- Figura 4.12 - a) Variação da potência em função da tensão aplicada
b) e variação da potência em função da temperatura para tensões com diferentes formas de onda
- Figura 4.13 - Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Zheng
- Figura 4.14 - Circuito equivalente para o varistor de ZnO proposto por Horiuchi et alii
- Figura 4.15 - Circuito equivalente proposto por Haddad et alii
- Figura 4.16 - Variação das resistências $R(V)$, $R_s(f,V)$ e $R_p(f,V)$ com a tensão aplicada
- Figura 5.1 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição das correntes e potência em varistores de ZnO, sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 5.2 - Efeito da temperatura sobre a corrente total e a sua componente resistiva sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)

- Figura 5.3 - Efeito da temperatura sobre a potência dos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)
- Figura 5.4 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição da capacitância e da tangente de perdas nos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 5.5 - Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a capacitância sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)
- Figura 5.6 - Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a tangente de perdas dos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)
- Figura 5.7 - Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura ambiente
- Figura 5.8 - Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura de 60°C
- Figura 5.9 - Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura de 100°C
- Figura 5.10 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição da corrente em varistores de ZnO, sob aplicação de tensão contínua
- Figura 5.11 - Efeito da temperatura sobre a corrente sob aplicação de tensão contínua (valores médios)
- Figura 5.12 - Efeito da temperatura sobre a potência dos varistores sob aplicação de tensão contínua (valores médios)
- Figura 5.13 - Variação da corrente com a temperatura sob aplicação de tensão contínua polaridade (+)
- Figura 5.14 - Variação da corrente com a temperatura sob aplicação de tensão contínua polaridade (-)

- Figura 5.15 - Variação da corrente total com a temperatura sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 5.16 - Variação da componente resistiva da corrente total com a temperatura sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 5.17 - Verificação da influência do modelo térmico na medição da capacitância para temperaturas de 60 e 100°C
- Figura 5.18 - Efeito da frequência e da temperatura sobre a capacitância dos varistores de ZnO (valores médios)
- Figura 5.19 - Efeito da frequência e da temperatura sobre a resistência dos varistores de ZnO (valores médios)
- Figura 5.20 - Efeito da frequência e da temperatura sobre a tangente de perdas dos varistores de ZnO (valores médios)
- Figura 5.21 - Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura ambiente
- Figura 5.22 - Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura ambiente
- Figura 5.23 - Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 60°C
- Figura 5.24 - Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 60°C
- Figura 5.25 - Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 100°C
- Figura 5.26 - Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 100°C

- Figura 6.1 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a resistência CC, polaridade positiva
- Figura 6.2 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a resistência CC, polaridade negativa
- Figura 6.3 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura da barreira de potencial do varistor de ZnO, polaridade positiva
- Figura 6.4 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura da barreira de potencial do varistor de ZnO, polaridade negativa
- Figura 6.5 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura das barreiras de potencial
- Figura 6.6 - Efeito do campo elétrico CC aplicado sobre a constante R_0 , polaridade positiva
- Figura 6.7 - Efeito do campo elétrico CC aplicado sobre a constante R_0 , polaridade negativa
- Figura 6.8 - Efeito do campo elétrico sobre a altura da barreira de potencial para solicitações de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 6.9 - Efeito do campo elétrico sobre a constante R_0 para solicitações de tensão alternada de frequência industrial
- Figura 6.10 - Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura ambiente.
- Figura 6.11 - Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura de 60°C
- Figura 6.12 - Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura de 100°C

Figura 6.13 - Efeito da temperatura sobre a componente resistiva da corrente CA e corrente CC polaridade positiva

Figura 6.14 - Efeito da tensão aplicada sobre as potências CA e CC, polaridade positiva, para diferentes temperaturas (valores médios)

Figura 6.15 - Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a potência dissipada pelos varistores de ZnO.

Figura 6.16 - Efeito da tensão por grão sobre o inverso do quadrado da capacitância por área por contorno de grão ($V_g \times 1/CA^2$)

Figura 6.17 - Comparação dos valores obtidos para a capacitância em função da tensão aplicada utilizando-se a ponte Schering e a equação (6.14)

Figura 6.18 - Dependência da densidade de portadores de carga com a tensão aplicada por grão.

Figura 6.19 - Dependência da densidade de estados superficiais com a tensão aplicada por grão

Figura A1 - Obtenção da componente resistiva da corrente para 2,40 kV_{ef}

Figura A2 - Obtenção da componente resistiva da corrente para 2,98 kV_{ef}

Resumo

Neste trabalho estudou-se as propriedades elétricas e dielétricas de um determinado tipo de varistor de ZnO para diferentes solicitações de tensão alternada e contínua. Para tal, as características elétricas CA e CC e dielétricas a frequência industrial, foram determinadas.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se a existência de uma dependência da altura e da largura das barreiras de potencial com o campo elétrico aplicado.

Deste estudo, constatou-se que o aumento verificado para a corrente resistiva CC ou para a componente resistiva da corrente CA com o aumento do campo elétrico, está associado à redução da altura das barreiras de potencial.

Desta forma, o conhecimento destas dependências nos permite determinar as características elétricas e dielétricas do varistor em consideração para toda a região correspondente as baixas tensões aplicadas, permitindo o estudo de diversos fenômenos associados a este tipo de varistor, tais como a estabilidade térmica e a degradação. Os resultados obtidos dos experimentos apresentaram concordância com os resultados apresentados na literatura e com a teoria dos varistores de ZnO.

O estudo da dependência das densidades de portadores de carga e de estados superficiais, responsáveis pela variação da largura e da altura das barreiras de potencial, com o campo elétrico aplicado foi realizado baseado no modelo proposto por Hower & Gupta.

Abstract

This work studies the electric and dielectric properties of zinc oxide varistors for different alternate and continuous voltage stresses. To obtain these properties, the electric AC and DC and dielectric characteristics of the ZnO varistors were measured.

Based on the results obtained, it was seen that the height and width of the potential barriers depends on the applied electric field. This study has ascertained that the increase verified in the DC resistive leakage current or in the AC resistive component of leakage current with the increase of the electric field is associated with the decrease of the potential barriers height.

In this way, with the knowledge of these dependencies it is possible to determine the electric and dielectric characteristics of the varistor under consideration, for all the regions which corresponds to the low voltage applied, allowing the study of several phenomena associated with this kind of varistor, such as thermal stability and degradation. The results obtained from the experiments show good agreement with the ones presented in the literature and with ZnO varistor theory.

The study of the dependency of the donor carrier density and surface state density, which are responsible for the potential barriers width and height, was made based on the model proposed by Hower & Gupta.

ÍNDICE

	PÁGINA
1 <u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Procedimentos e objetivos	4
1.3 Apresentação do trabalho	5
2 <u>PROPRIEDADES BÁSICAS DOS VARISTORES DE ZnO</u>	7
2.1 Processo de fabricação dos varistores de ZnO	9
2.2 Efeito de variações na etapa de sinterização sobre as propriedades dos varistores de ZnO	19
2.3 Efeito da combinação e da concentração de aditivos sobre as propriedades dos varistores de ZnO	24
2.4 Microestrutura dos varistores de ZnO	40
3 <u>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E DIELÉTRICAS DOS VARISTORES DE ZnO</u>	51
3.1 Mecanismo de condução dos varistores	51
3.2 Característica "tensão x corrente" dos varistores	55
3.2.1 Região de baixas tensões aplicadas medida sob aplicação de tensões alternadas e contínuas	56
3.2.2 Região altamente não-linear de tensões intermediárias medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra	69

3.2.3	Região de "Upturn" da tensão medida por impulsos de corrente 8/20 ou 4/10	72
3.3	Propriedades dielétricas dos varistores de ZnO	75
3.4	Estabilidade térmica e degradação	81
4	<u>OS MODELOS PROPOSTOS</u>	86
4.1	Modelo proposto por Levinson e Philipp	86
4.2	Modelo proposto por Matsuura e Yamaoki	91
4.3	Modelo proposto por Emtage	92
4.4	Modelo proposto por Knetch e Burger	94
4.5	Modelo proposto por Einzinger	97
4.6	Modelo proposto por Eda	98
4.7	Modelo apresentado por Mc Graw-Edison Company	102
4.8	Modelo proposto por Liang Yu-Jin, Zhao Yu-Ji e Zheng Hong-Yan	106
4.9	Modelo proposto por Zheng	108
4.10	Modelo proposto por Horiuchi, Ichikawa, Mizukoshi, Kurita e Shirakawa	112
4.11	Modelo proposto por Haddad, Fuentes, German e Waters	114
5	<u>ESTUDO EXPERIMENTAL</u>	118
5.1	Corpos de prova	119
5.2	Estudo do comportamento da característica "tensão x corrente" e das propriedades dielétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas	119
5.2.1	Medição da corrente total, de suas componentes resistiva e capacitiva e da potência, sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial	121

5.2.2	Medição da capacitância e da tangente de perdas, sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial	125
5.2.3	Medição da corrente e potência dos varistores de ZnO sob aplicação de tensões contínuas, polaridades positiva e negativa	130
5.3	Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente nos varistores de ZnO	133
5.3.1	Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão contínua	134
5.3.2	Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão alternada de frequência industrial	136
5.4	Efeito da frequência e temperatura sobre a capacitância, condutância e tangente de perdas dos varistores de ZnO	139
6.	<u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	148
6.1	Análise das propriedades dos varistores de ZnO quando da aplicação de tensão contínua	148
6.2	Análise das propriedades dos varistores de ZnO quando da aplicação de tensão alternada	156
6.3	Determinação das densidades de portadores de carga N_d e de estados superficiais N_s a partir dos resultados experimentais	169
7.	<u>CONCLUSÕES</u>	176
ANEXO A	- Técnica utilizada para obtenção da componente resistiva da corrente em varistores de ZnO	179

ANEXO B - Valores das grandezas obtidos dos ensaios 184

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 196

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Elementos cerâmicos produzidos pela combinação do ZnO com vários outros óxidos aditivos, apresentando propriedades resistivas altamente não-lineares, são conhecidos como varistores de óxidos metálicos. A palavra varistor é derivada do termo "variable resistor"

Existem atualmente dois tipos de varistores sendo produzidos em escala industrial: os varistores de óxido de zinco (ZnO) e os varistores de Carbeto de Silício (SiC). Esses tipos de varistores apresentam características de não-linearidade essenciais para um bom desempenho dos pára-raios, os quais consistem, dentre os dispositivos utilizados para limitar a amplitude das sobretensões que ocorrem nos sistemas elétricos e reduzir os efeitos destas sobretensões sobre os equipamentos instalados, como os mais eficazes. Os pára-raios têm como princípio de funcionamento a limitação das sobretensões nos terminais dos equipamentos por ele protegidos em níveis tais que após a ocorrência das sobretensões o isolamento destes equipamentos não fiquem com suas características significativamente afetadas.

Em décadas anteriores, os pára-raios eram na sua totalidade do tipo Carbeto de Silício (SiC), constituídos basicamente pelos varistores de SiC em série com um conjunto de centelhadores. No entanto, devido a impossibilidade de se obter um aumento substancial nas suas propriedades não-lineares, a evolução tecnológica deste tipo de varistor praticamente atingiu o seu limite. Na chamada região de condução dos varistores de SiC, a corrente é proporcional a quinta potência da tensão aplicada. Desta forma, na região de operação dos pára-raios em regime permanente, a corrente que circularia pelos varistores, se estes estivessem com a

tensão diretamente aplicada seria muito elevada, da ordem de dezenas a centenas de Amperes. Este comportamento faz com que centelhadores tenham que ser instalados em série com estes varistores para "isolar" os varistores do sistema sob condições normais de operação. Quando da utilização destes equipamentos em sistemas de alta tensão, atenção especial é dada pelos fabricantes ao projeto e a montagem dos centelhadores, os quais são elementos fundamentais para a definição dos níveis de proteção e de operação dos pára-raios.

Esta tecnologia de varistores perdurou sem concorrência até o final da década de 60, quando um novo tipo de dispositivo utilizado para a proteção contra sobretensões foi desenvolvido pela Matsushita Electrical Co. Ltd (1). Este dispositivo, formado por varistores cerâmicos à base de óxido de zinco (ZnO) e pequenas quantidades de outros óxidos, apresentou um alto grau de não linearidade na sua característica "tensão x corrente", proporcionando baixos valores de corrente na região de operação, associado a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação. Esses varistores foram produzidos em escala comercial a partir de 1968, sendo inicialmente destinados a proteção de circuitos eletrônicos, caracterizados por baixos valores de tensão e de energia. A partir deste desenvolvimento, diversas empresas sob a licença da Matsushita, iniciaram estudos visando o desenvolvimento de varistores que pudessem ser utilizados em sistemas elétricos de potência.

Os primeiros pára-raios de ZnO desenvolvidos para sistemas de potência foram lançados no mercado no final da década de 70 (2,3). Estes eram formados apenas por um conjunto de varistores de ZnO em série. Na década de 80 diversas empresas desenvolveram e produziram pára-raios de ZnO para esta aplicação (4-11).

Desde então, este tipo de pára-raios têm sido largamente utilizado em diversos países (9,12,13), tanto em novos sistemas quanto na substituição dos pára-raios convencionais (para-raios de SiC). No Japão, por exemplo, desde 1983 todos os pára-raios convencionais foram substituídos pelos de óxido de zinco. As vantagens da utilização deste tipo de pára-raios, em relação aos pára-raios convencionais de SiC têm sido apresentadas em diversas publicações. Além das subestações convencionais para sistemas CA, estes pára-raios quando instalados em sistemas HVDC ou em subestações isoladas a gás (SF_6), têm trazido benefícios substanciais na proteção destes sistemas. A utilização de pára-raios sem centelhadores em estações conversoras HVDC tem proporcionado uma redução de aproximadamente 15% do total de tiristores que compõem as válvulas (14). Da mesma forma, este dispositivo quando utilizado para a proteção de bancos de capacitores série tem se tornado bastante eficaz.

Desde o desenvolvimento dos primeiros pára-raios para aplicação em sistemas de potência, diversas pesquisas têm sido realizadas pelos fabricantes no sentido de estudar o efeito de novos aditivos sobre as propriedades físicas e elétricas dos varistores (6,8,10,11,15-17), otimizar os processos de fabricação (8,9,18), bem como melhorar as propriedades dos óxidos utilizados. O objetivo é sempre o de procurar melhorar o desempenho dos varistores no que se refere às suas propriedades não-lineares, à capacidade de absorção de energia e à estabilidade e degradação devido a operação contínua nos sistemas, sob condições de regimes permanente e transitórios.

Os varistores à base de óxido de zinco são hoje em dia mundialmente utilizados, com um vasto campo de aplicação

que vai desde a proteção de circuitos eletrônicos até a aplicação em sistemas de extra alta tensão.

1.2 Procedimentos e objetivos

Os varistores à base de óxido de zinco, consistem em um material policristalino cerâmico denso, constituídos basicamente pelo elemento óxido de zinco com pequenas quantidades de outros óxidos adicionados a este, tais como os óxidos de Bismuto (Bi_2O_3), Antimônio (Sb_2O_3), Cobalto (Co_2O_3), Mangânes (MnO_2), Cromo (Cr_2O_3), Níquel (NiO), Alumínio (Al_2O_3), Silício (SiO_2), Gálio (Ga_2O_3), Lítio (Li_2O_3), Praseodinium (Pr_6O_{11}), entre outros.

A relação entre a tensão e a corrente para os varistores cerâmicos que compoem os pára-raios pode ser dada aproximadamente por:

$$V = K \cdot I^{1/a} \quad (1.1),$$

onde V é a tensão aplicada sobre os varistores, I é a corrente que circula pelos varistores, K é uma constante característica do varistor e a corresponde ao coeficiente de não-linearidade, definido por:

$$a = \frac{dI/I}{dV/V} = \frac{d(\log I)}{d(\log V)} = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log V_2 - \log V_1} \quad (1.2)$$

Devido a alta não-linearidade nas suas características "tensão x corrente", estes varistores podem ser diretamente instalados nos sistemas elétricos sem a necessidade de utilização dos centelhadores limitadores de corrente. Desta forma, os pára-raios de ZnO além de atuarem em condições transitórias, estarão continuamente submetidos

a tensão de operação do sistema. Portanto, para um desempenho aceitável deste equipamento, torna-se necessário estudar e entender as propriedades elétricas dos varistores na região de operação do sistema, a capacidade destes varistores dissiparem as energias associadas aos surtos bem como a estabilidade térmica e a degradação devido a aplicação permanente de tensão, conjugada com as possíveis solicitações dos sistemas. A possibilidade de previsão do tempo de vida para esses pára-raios, a partir do conhecimento prévio das suas propriedades e características principais também têm sido exaustivamente estudada.

Este trabalho propõe estudar as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores de óxido de zinco (ZnO), na região que vai desde baixas tensões aplicadas até a tensão de referência destes varistores.

1.3 Apresentação do trabalho

Inicialmente são apresentadas no capítulo 2 informações sobre as propriedades básicas que influenciam no desempenho dos varistores de ZnO, tais como o processo de fabricação, o efeito da temperatura de sinterização, efeito dos aditivos utilizados e de seu conteúdo e a formação da microestrutura. No capítulo 3, é apresentada uma breve revisão literária dos diversos mecanismos propostos para explicar a condução de corrente através dos varistores e um estudo sobre as suas propriedades elétricas, por meio da característica "tensão x corrente", e dielétricas. No capítulo 4, são descritos e comentados os diversos circuitos elétricos equivalentes propostos para representar as propriedades dos varistores. Os resultados experimentais dos ensaios realizados durante o desenvolvimento deste trabalho, encontram-se no capítulo 5, enquanto que a análise e discussão dos resultados obtidos, bem como uma avaliação destes resultados, comparados com

trabalhos prévios são apresentados no capítulo 6. No capítulo 7, são descritas as conclusões relativas ao trabalho apresentado. Por fim, são apresentados os anexos A e B. O anexo A, descreve as propriedades do circuito utilizado para a obtenção da componente resistiva da corrente, enquanto que no anexo B, são apresentadas diversas tabelas com os valores médios e desvio-padrão das grandezas medidas.

CAPÍTULO 2 - PROPRIEDADES BÁSICAS DOS VARISTORES DE ZnO

Os varistores de óxido de zinco, elementos principais na construção dos pára-raios de ZnO, consistem em um corpo de material policristalino cerâmico denso, e são constituídos basicamente pelo óxido de zinco (ZnO), com alto grau de pureza, que participa com 80 a 95% do peso total, e pequenas quantidades de outros óxidos adicionados ao ZnO. Esses componentes, quando adequadamente misturados fornecem, após um processo chamado de sinterização, uma microestrutura complexa composta por grãos condutores de ZnO com baixa resistividade específica, por partículas do tipo espinélio (para varistores formados a partir do Bi_2O_3) e por finas barreiras formadas entre os grãos. O elemento resultante é um varistor com alto grau de não-linearidade na sua característica "tensão x corrente".

A característica "tensão x corrente" dos varistores de ZnO pode ser dividida basicamente em três regiões:

- I - região de baixas tensões aplicadas caracterizada pelas baixas densidades de corrente;
- II - região de acentuada não-linearidade;
- III - região de correntes elevadas.

Para a região de baixas correntes, os varistores são altamente resistivos e dependentes da temperatura, com uma resistividade específica em torno de $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$. É nesta região que os pára-raios de óxido de zinco operam em condições de regime permanente.

Uma condução significativa de corrente não ocorre até que a tensão aplicada nos varistores atinja um valor crítico. Esta tensão, denominada de tensão de referência, corresponde a uma densidade de corrente especificada por cada fabricante, acima da qual os varistores passam a apresentar um comportamento altamente não-linear. Este nível de tensão marca o início da segunda região, de não-linearidade acentuada, onde uma pequena variação de tensão acarreta em uma grande variação de corrente (coeficiente de não-linearidade tipicamente entre 20 e 50). Nesta região os pára-raios de ZnO são efetivamente utilizados na proteção dos sistemas HVAC e HVDC contra os efeitos transitórios causados por surtos atmosféricos e de manobra.

A terceira região, das altas correntes, apresenta um comportamento aproximadamente linear, sendo função basicamente, do tamanho e quantidade de grãos existentes nos varistores de ZnO.

Existe disponível uma vasta literatura referente aos estudos de formação da microestrutura dos varistores de ZnO responsável pelas suas propriedades elétricas e dielétricas, aos efeitos da concentração dos vários aditivos utilizados e da temperatura de sinterização sobre o desempenho dos varistores. Da mesma forma, as técnicas de fabricação deste tipo de varistor têm sido exaustivamente estudadas visando a otimização do processo, com conseqüente melhoria do desempenho dos varistores a custos reduzidos.

A seguir, faz-se uma descrição destas propriedades, responsáveis pela formação e desempenho destes varistores.

2.1 Processo de fabricação dos varistores de ZnO

Os varistores de ZnO são produzidos em escala industrial pelo processo convencional de fabricação de cerâmicas.

O principal componente utilizado para a produção de varistores de ZnO é o óxido de zinco com alto grau de pureza. Em adição ao óxido de zinco (ZnO), pequenas quantidades de outros óxidos aditivos, tais como os óxidos de Bismuto, Cobalto, Cromo, Antimônio, Mangânes, Níquel, Alumínio, Silício, Gálio, Lítio, Praseodínio, entre outros, têm sido introduzidos nas composições dos varistores.

Varistores produzidos em escala industrial apresentam uma proporção de concentração total de aditivos na faixa de aproximadamente 10% da concentração total, sendo que a concentração de cada aditivo varia na faixa de centenas de ppm a % mol.

Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar o comportamento de cada agente no processo (1,6,10,11). Sabe-se atualmente que cada um desses óxidos tem uma propriedade importante dentro do processo de fabricação dos varistores de ZnO.

As características dos varistores dependem em muito do processo de fabricação. A pureza, concentração dos dopantes e a homogeneidade da mistura são de importância fundamental para a qualidade do produto final.

Um fluxograma do processo de produção de varistores de ZnO e uma representação esquemática simplificada de um processo de fabricação (19,20) são apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente.

Este processo de produção pode ser dividido basicamente em seis estágios, cada estágio apresentando uma ou mais etapas:

- Preparação da mistura do pó;
- Secagem da mistura;
- Prensagem dos blocos;
- Sinterização dos blocos;
- Aplicação da camada isolante sobre a superfície cilíndrica e metalização das superfícies planas (acabamento);
- Ensaio elétrico e classificação.

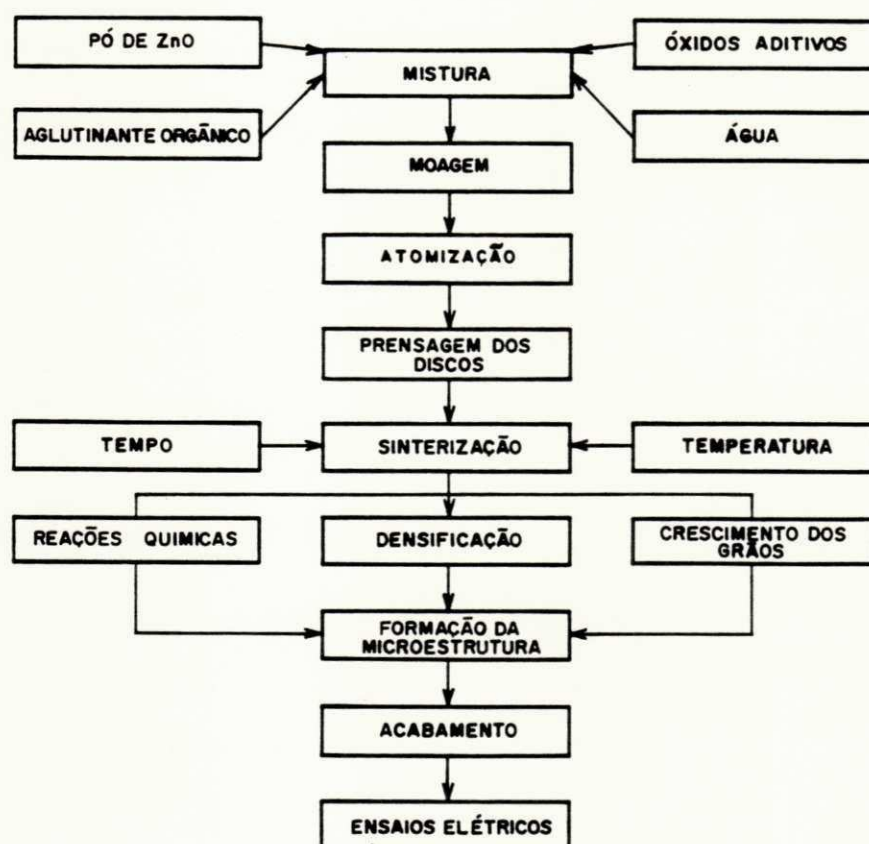
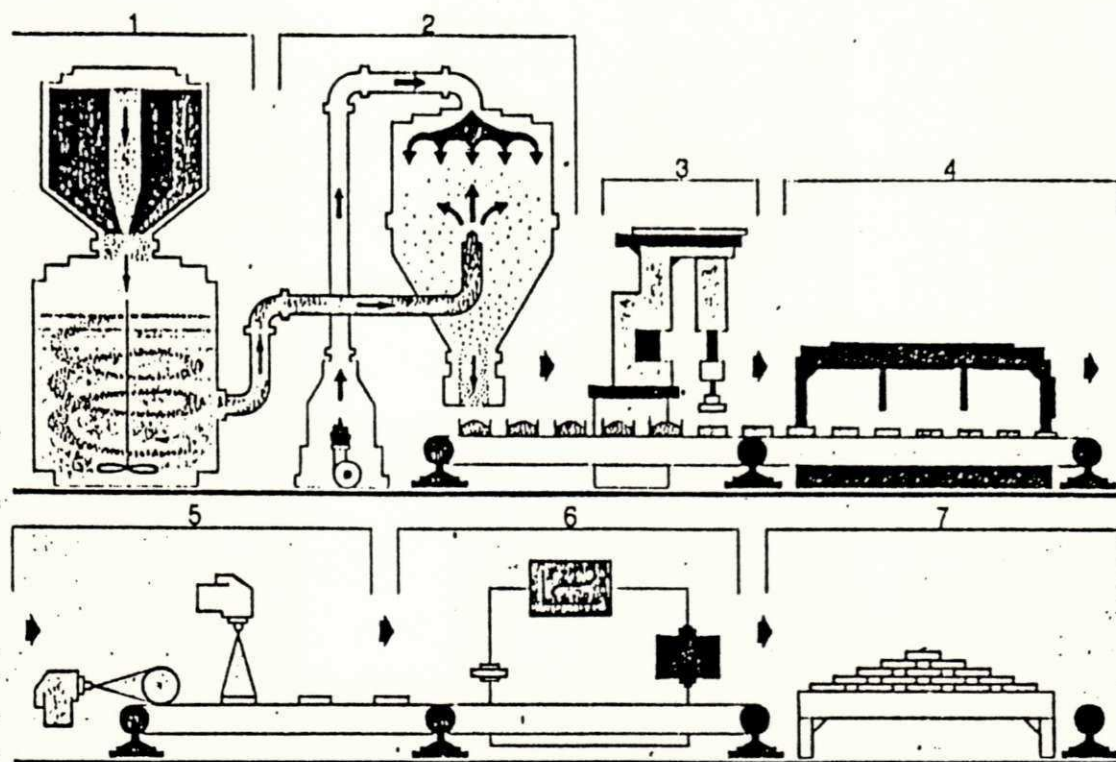


Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fabricação dos varistores de ZnO



- 1 - Produção da pasta homogênea por mistura úmida dos componentes óxidos
- 2 - Secagem da mistura e granulação
- 3 - Prensagem dos blocos
- 4 - Processo de sinterização dos blocos
- 5 - Aplicação da camada isolante sobre a superfície cilíndrica e metalização das superfícies planas (acabamento)
- 6 - Ensaio elétrico e classificação
- 7 - Varistores prontos para a montagem

Figura 2.2 - Representação esquemática de um processo simplificado de produção de varistores (20)

- Preparação da mistura do pó e secagem

Um dos pontos críticos do processo de fabricação dos varistores é a obtenção de uma mistura adequada de ingredientes, que consiste em um parâmetro importante para a obtenção de uma homogeneidade por todo o varistor. Os componentes utilizados na produção dos varistores devem ser cuidadosamente selecionados. A sua natureza química, pureza, reatividade química e repartição granulométrica devem ser medidas. Para a produção em escala industrial é exigido que os óxidos atendam às especificações de fabricação. A pureza dos óxidos utilizados é imprescindível para a produção de varistores de boa qualidade. A presença de pequenas quantidades de óxido de cobre, por exemplo, afeta o desempenho elétrico dos varistores. Para a produção em escala industrial utilizam-se normalmente partículas com graus de pureza iguais ou maiores a 99,9% .

Um dos processos para a produção do óxido de zinco utilizado na fabricação dos varistores consiste na obtenção destes a partir da oxidação do vapor de zinco metálico puro, e, por isso, o seu nível de impureza é baixo. O tamanho das partículas é importante para o processo de formação dos varistores. Entre outros aspectos, é importante que as partículas apresentem tamanhos pequenos e uniformes, pois isso possibilita uma melhor mistura e evita sedimentação excessiva de materiais durante as primeiras etapas do processo. Pequenas variações no tamanho inicial destas partículas melhora as propriedades não-lineares dos varistores. O tamanho do grão do produto sinterizado aumenta com a redução do tamanho inicial das partículas. O tamanho médio das partículas de óxido de zinco utilizadas é geralmente da ordem de 0,3 μm , enquanto que os demais óxidos metálicos utilizados como aditivos apresentam partículas com tamanho médio aproximadamente 10 vezes maiores. Devido a diferença verificada na densidade e no tamanho das partículas dos diversos aditivos e do ZnO, é

necessário que as partículas maiores sejam moídas antes de serem utilizadas.

A Tabela 2.1, apresenta as principais características de alguns componentes empregados na fabricação de varistores.

Tabela 2.1 - Características de alguns óxidos utilizados na produção de varistores de ZnO (6)

ÓXIDO DE	FÓRMULA	PESO MOLECULAR	DENSIDADE (g/cm ³)	PONTO DE FUSÃO (°C)	PUREZA (%)	TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS (µm)
Zinco	ZnO	81,37	5,61	1975	99,9	0,1 - 0,5
Bismuto	Bi ₂ O ₃	465,96	8,90	825	99,9	5 - 10
Cobalto	Co ₂ O ₃	165,86	5,18	895 (d)	99,9	1 - 5
Manganes	MnO ₂	86,94	5,03	535 (d)	99,9	5 - 10
Antimônio	Sb ₂ O ₃	291,50	5,20	656	99,9	1 - 5
Níquel	NiO	74,71	6,67	1984	99,9	1 - 5
Cromo	Cr ₂ O ₃	151,99	5,21	2286	99,9	1 - 5

(d) - decomposto

O procedimento utilizado nos estágios de mistura e secagem depende da quantidade total de matéria-prima (6). Durante esta etapa de mistura a homogeneidade e viscosidade da pasta devem ser cuidadosamente controladas. Para pequenas quantidades, menores do que 1 kg de material seco, a mistura normalmente é feita em uma quantidade de álcool

etílico aproximadamente igual a 50% do peso sólido do material. Para dispersar as aglomerações e obter uma distribuição uniforme dos dopantes e do óxido de zinco, o material é misturado por um período de aproximadamente 10 a 15 minutos, utilizando um misturador de alta velocidade, o que proporciona uma excelente mistura dos componentes. Após a mistura, o álcool é removido por um filtro de vácuo através da evaporação com agitação da mistura. Alguma quantidade de álcool restante é removida por secagem em forno a aproximadamente 110°C. Antes da prensagem, o material é pulverizado e misturado a seco com aproximadamente 5% de uma solução de água-aglutinante. A concentração de aglutinante, PVA (álcool polivinil), na solução aquosa deve ser de aproximadamente 5%, a fim de proporcionar uma rigidez suficiente no varistor de ZnO.

Para quantidades maiores, os dopantes e o óxido de zinco são misturados em uma quantidade de água desionizada igual a aproximadamente 60% do peso sólido do material. Nesse caso, o aglutinante (PVA) é adicionado durante a mistura. Depois que todos os materiais forem adicionados, a mistura é feita durante cerca de meia a uma hora num misturador com hélices. Após a mistura, a água é removida da substância pastosa resultante por um processo de atomização. Este processo consiste em injetar a mistura através de um bocal atomizador em uma câmara aquecida, dentro da qual circula ar forçado pré-aquecido em direção oposta, que proporciona uma rápida remoção da umidade presente nas partículas atomizadas. O composto homogêneo e de granulometria controlada obtido deste processo de secagem está agora em uma forma de pó adequada para prensagem imediata.

A umidade remanescente é crítica para a etapa de prensagem, sendo desejada uma faixa máxima compreendida na ordem de 0,1 a 0,5%.

- Prensagem dos blocos

A mistura resultante do processo anterior é então prensada em seções cilíndricas com dimensões que dependem, entre outras coisas, do nível de tensão e da faixa da corrente de descarga do varistor produzido. A densidade típica do elemento prensado é da ordem de $2,8 \text{ g/cm}^3$. No entanto, esta densidade depende muito da umidade presente na mistura do pó. Altos níveis de umidade, resultam em maior densidade, criando problemas na prensagem.

- Processo de sinterização dos blocos

O estágio de sinterização é a etapa do processo de fabricação dos varistores que provoca as maiores variações nas suas propriedades elétricas e dielétricas. A sinterização é uma fase do processo na qual o bloco prensado é transformado em um elemento de material cerâmico denso.

O processo de sinterização consiste no aquecimento do elemento em etapas, desde a temperatura ambiente até a temperatura de sinterização desejada, mantendo-se esta temperatura constante por um determinado período de tempo e resfriando-se em seguida. Um perfil das várias etapas de sinterização para a produção de varistores é apresentado na referência (6). Inicialmente a temperatura é aumentada em degraus bem definidos, na razão de aproximadamente 100°C por hora, até atingir a temperatura de 700°C . De 700°C a 900°C , esta razão é reduzida para aproximadamente 25°C por hora, de modo a evitar possíveis ocorrências de trincas no interior do elemento, devido à compressão que é crítica nesta faixa. Acima de 900°C a razão de aquecimento volta a ser de 100°C por hora, até que a temperatura de sinterização desejada, compreendida entre 1150 e 1350°C ,

seja alcançada. Atingida a temperatura de sinterização, esta é mantida constante no forno por um determinado período (na maioria das literaturas disponíveis este tempo esta compreendido entre 1 e 2 horas), quando então o mesmo é resfriado a uma razão de aproximadamente 50°C por hora, até que a temperatura ambiente seja atingida.

Durante a última fase da etapa de sinterização o componente cerâmico torna-se sólido e os aditivos reagem por dentro da estrutura, sendo esta etapa responsável pelo estabelecimento das propriedades dos varistores.

Com a sinterização, ocorre uma redução no volume do elemento de cerca de 50% (20% de redução na dimensão). Esta redução é resultado basicamente da densificação. A densidade das amostras sinterizadas é tipicamente da ordem de 5,4 a 5,5 g/cm³ e a perda de peso é normalmente da ordem de 1 a 3%.

A sinterização é um estágio crítico do qual depende a formação da microestrutura do varistor (19,21-24). Durante a sinterização, os pequenos grãos de ZnO crescem em tamanho e tornam-se circundados por uma fina camada formada pelos outros óxidos. Estes reagem com o ZnO e entre si, formando uma complexa estrutura química a qual produz a característica elétrica marcante deste material; a sua alta não-linearidade. No processo de sinterização, durante o aquecimento acima de 700°C, o óxido de Antimônio (Sb₂O₃), quando presente na mistura, reage com os óxidos de Zinco (ZnO) e Bismuto (Bi₂O₃) formando as fases cristalinas tipo pirocloro de Zn₇Sb₂O₁₂ e Zn₂Bi₃Sb₃O₁₄. O Zn₂Bi₃Sb₃O₁₄ forma a fase líquida e rica em Bi₂O₃ e as partículas do tipo espinélio (Zn₇Sb₂O₁₂). No processo de resfriamento a fase líquida rica em Bi₂O₃ transforma-se em uma camada intergranular rica em Bi₂O₃ fase β ou σ. Por outro lado, o

$Zn_7Sb_2O_{12}$ se precipita na fronteira dos grãos, contendo o seu crescimento (22).

Um aumento no tempo e na temperatura de sinterização acarreta em uma redução na tensão de referência por unidade de espessura e na tensão para a região de baixas correntes (18). Isto resulta do crescimento dos grãos de ZnO, da alteração de sua resistividade e do desaparecimento da camada intergranular rica em bismuto, causada pela evaporação do Bi_2O_3 .

O efeito da temperatura de sinterização e do tempo de permanência desta sobre as propriedades dos varistores de ZnO é apresentado resumidamente em 2.2 .

- Acabamento

No estágio de acabamento são aplicados os contatos elétricos sobre as superfícies circulares do varistor e a camada isolante na superfície cilíndrica lateral. A técnica geralmente utilizada para aplicação dos contatos sobre as amostras sinterizadas consiste em depositar a quente uma camada metálica pelo processo de jateamento. Antes da metalização, as amostras sinterizadas passam pela etapa de polimento, de forma a remover possíveis superfícies defeituosas, obtendo-se o paralelismo entre as faces e removendo-se a oxidação que pode ocorrer nas superfícies das amostras durante o estágio de sinterização.

A maioria dos varistores produzidos em escala industrial utiliza o alumínio sobre as superfícies circulares das extremidades para prover a metalização. Em casos especiais, pode ser usado prata em vez de alumínio. No entanto, a prata apresenta dois problemas práticos

fundamentais para a sua utilização em varistores: o primeiro é o seu custo em relação ao do alumínio e o segundo fato resulta da prata se oxidar com o tempo, podendo comprometer o funcionamento dos varistores. A referência (6) apresenta a possibilidade da utilização do zinco.

A etapa de metalização dos varistores tem a finalidade de produzir uma densidade de corrente uniforme por toda a superfície, sendo portanto fundamental para o bom desempenho dos varistores durante a ocorrência de surtos de corrente elevados.

A camada isolante aplicada na superfície cilíndrica lateral tem por objetivo evitar a ocorrência de descarga externa superficial ou "flashover", durante a passagem de surtos de corrente elevada.

- Ensaios elétricos e classificação

Quando produzido em escala industrial, após o processo de fabricação dos varistores de ZnO , as suas características básicas de proteção e de operação são obtidas através de ensaios elétricos, entre os quais pode-se citar os de tensão de referência e tensão residual a corrente de descarga nominal, a partir dos quais os diversos varistores produzidos são classificados dentro de faixas, de acordo com os critérios estabelecidos pelos fabricantes. Alguns fabricantes adotam, em adição aos ensaios acima descritos, os ensaios de verificação da corrente CC para a máxima tensão contínua de operação e o ensaio de corrente de impulso retangular (ou descarga de linhas de transmissão, dependendo do tipo de varistor) como ensaios para controle da produção.

2.2 Efeito de variações na etapa de sinterização sobre as propriedades dos varistores de ZnO

A sinterização é uma etapa fundamental do processo de fabricação de um varistor. Durante este processo, várias mudanças ocorrem na composição dos varistores, entre elas a densificação, crescimento dos grãos e mudanças de fase. Existe uma grande dependência destas propriedades com a temperatura de sinterização e com o tempo de permanência nesta temperatura. Durante estas etapas ocorrem diversas transformações nas fases químicas, resultando na criação de uma densa matriz policristalina formada por grãos de ZnO e outras fases de diferentes óxidos.

Matsuoka (1) verificou inicialmente o efeito da temperatura de sinterização sobre o sistema ZnO-Bi₂O₃, para uma concentração de Bi₂O₃ de 0,5 mol%. Deste estudo Matsuoka verificou que o Bi₂O₃ adicionado ao ZnO apresenta propriedades não-lineares quando sinterizados a uma temperatura compreendida entre 950° e 1250°C. No entanto, a partir de 1250°C, varistores com esta composição apresentavam uma propriedade linear, não sendo verificado na microestrutura o Bi₂O₃. Matsuoka atribuiu este fato a evaporação do Bi₂O₃ durante o processo de sinterização.

Posteriormente Matsuoka estudou o efeito da temperatura de sinterização nas propriedades não-lineares dos varistores de ZnO a partir de uma composição contendo 97 mol% de ZnO e 3 mol% de óxidos aditivos de Bi₂O₃ + Co₂O₃ + MnO₂ + Cr₂O₃ + Sb₂O₃, numa relação 1:1:1:1:2. Esta composição apresentou em seus estudos o maior coeficiente de não-linearidade. O comportamento do coeficiente de não-linearidade, em função da temperatura de sinterização é mostrado na Figura 2.3. Verifica-se da Figura que o valor de α é crescente com o aumento da temperatura de

sinterização até 1350°C. Acima desta temperatura, foi verificado uma diminuição abrupta para α , tornando-se o composto linear ($\alpha = 1$) para uma temperatura de sinterização de 1450°C. Acima desta temperatura, Matsuoka verificou que o varistor cerâmico apresentava propriedades lineares com uma baixa resistividade elétrica, aproximadamente 10 Ω .cm.

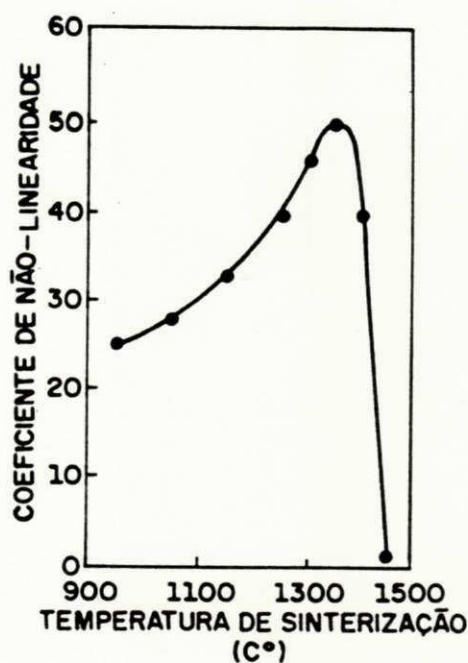


Figura 2.3 - Efeito da temperatura de sinterização sobre o coeficiente de não-linearidade α (1)

Estudos realizados a partir do EP (electron photomicrographics), permitiu a Matsuoka verificar a composição dos aditivos presentes nos varistores de ZnO, quando sinterizados a temperaturas entre 950 e 1450°C.

A partir deste estudo, foi verificado o efeito da temperatura de sinterização sobre o tamanho dos grãos. O aumento da temperatura de sinterização provoca um aumento no tamanho dos grãos. Com relação a estrutura da camada intergranular localizada na fronteira entre os grãos, esta não pode ser claramente identificada para temperaturas de sinterização entre 950 e 1050°C. Este fato mostra que baixas temperaturas de sinterização não são suficientes para a formação da camada intergranular. Para temperaturas acima de 1150°C, verificou-se um aumento na espessura desta camada com o aumento da temperatura de sinterização até 1350°C, na qual Matsuoka constatou o maior valor de α em seus estudos. A uma temperatura de sinterização de 1450°C, nenhuma camada intergranular pode ser identificada no contorno dos grãos, fato que explica o comportamento linear dos varistores. A inexistência da camada intergranular foi explicada por Matsuoka pela inexistência dos óxidos de Bismuto e Antimônio e pela dissolução uniforme dos óxidos de Cobalto, Mangânes e Cromo nos grãos de ZnO. O efeito da temperatura de sinterização sobre o tamanho médio dos grãos e a capacitância dos varistores utilizados por Matsuoka é apresentado na Tabela 2.2, para uma temperatura de sinterização entre 950 e 1450°C. Os resultados apresentados nesta tabela são relativos a varistores apresentando um diâmetro de 17,5 mm e uma espessura de 2 mm.

Destes estudos, Matsuoka atribuiu à camada intergranular um efeito fundamental sobre o coeficiente de não-linearidade. Bhushan et alli (25) estudaram o efeito da temperatura de sinterização sobre as propriedades elétricas e dielétricas para o sistema binário ZnO-Bi₂O₃, em uma faixa de temperatura de sinterização de 800 a 1100°C. Os resultados apresentados neste trabalho apresentam uma similaridade com os apresentados por Matsuoka. Os autores verificaram que para temperaturas de sinterização abaixo de 800°C, as amostras ensaiadas

apresentaram um comportamento ôhmico. O valor máximo para alfa, 13, foi obtido para uma temperatura de sinterização de 900°C, acima da qual o valor de α decresce.

Tabela 2.2 - Efeito da temperatura de sinterização sobre o tamanho médio dos grãos e a capacitância para varistores de ZnO com uma mesma composição (1)

TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO (°C)	950	1050	1150	1250	1350	1450
TAMANHO MÉDIO DOS GRAOS (µm)	1	2	3	6	10	15
CAPACITANCIA (nF)	0,20	0,39	0,68	1,10	1,50	2,75

Uma investigação minuciosa sobre a influência da temperatura de sinterização nas propriedades elétricas e dielétricas dos varistores de ZnO foi realizada pela McGraw Edison Company (6), a partir de uma composição que se manteve inalterada. O efeito da temperatura de sinterização sobre a tensão de referência, corrente CC equivalente a tensão contínua de operação e constante dielétrica para um tempo de permanência na temperatura de sinterização de duas horas são apresentados na Figura 2.4, enquanto que na Figura 2.5, é mostrado o efeito do tempo de permanência na temperatura de sinterização sobre estes parâmetros dos varistores para uma temperatura de sinterização de 1260°C.

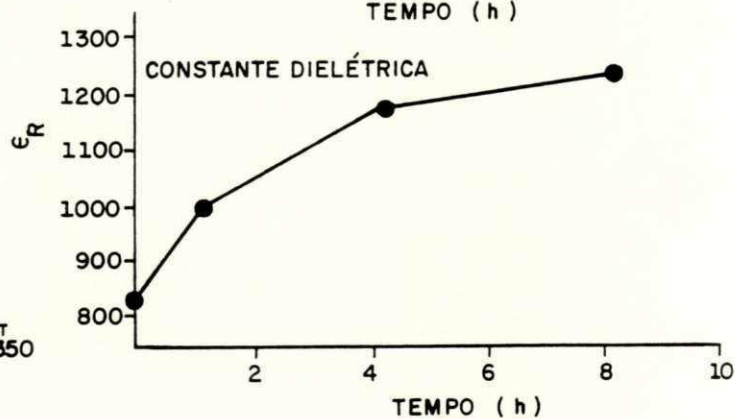
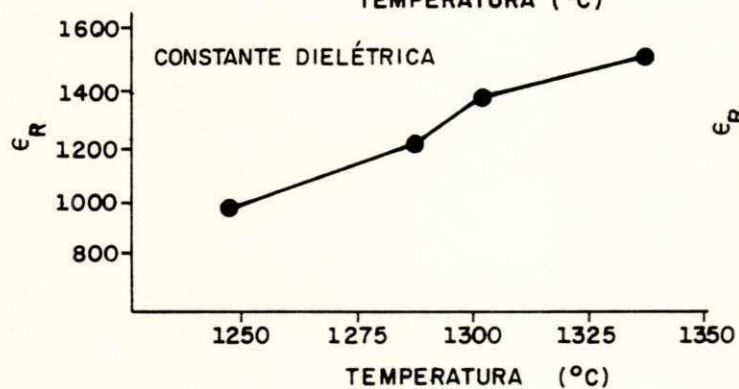
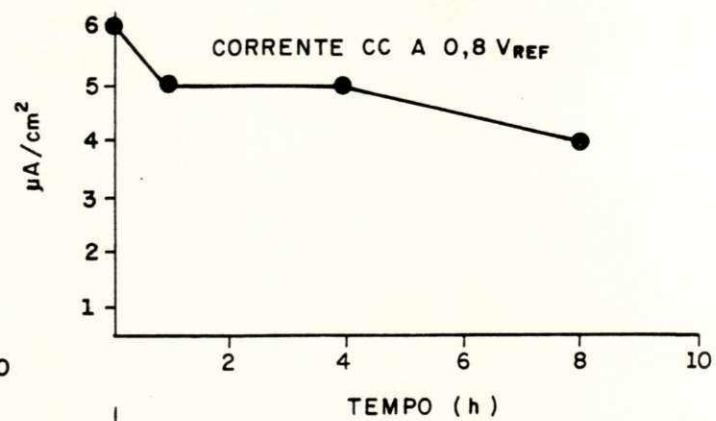
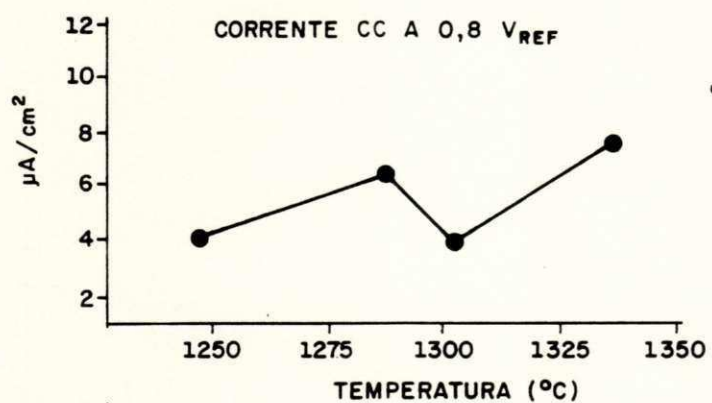
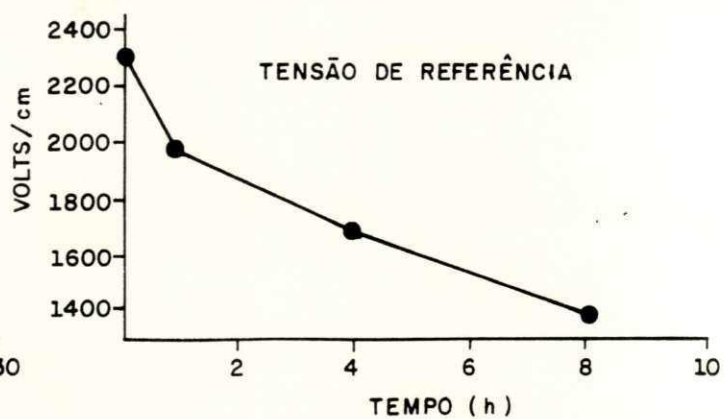
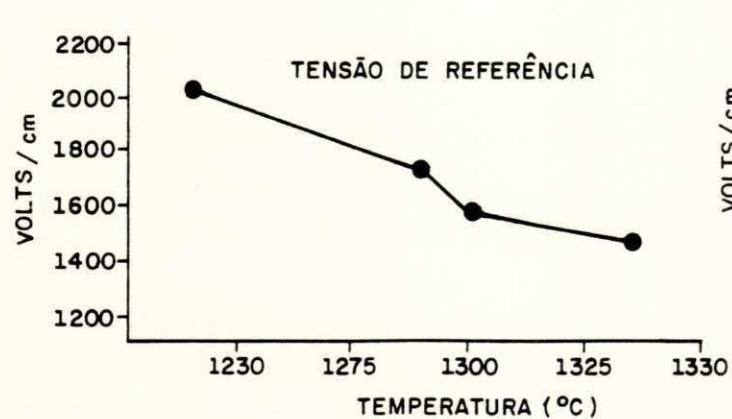


Figura 2.4 - Efeito da temperatura de sinterização sobre as propriedades dos varistores (6)

Figura 2.5 - Efeito do tempo de sinterização sobre as propriedades dos varistores (6)

2.3 Efeito da combinação e da concentração de aditivos sobre as propriedades dos varistores de ZnO

A característica "tensão x corrente" e as propriedades dielétricas dos varistores ZnO são fortemente influenciadas pela sua composição (18).

Desde o desenvolvimento dos primeiros varistores cerâmicos à base de ZnO, diversos estudos têm sido realizados mostrando o efeito dos vários aditivos utilizados na composição dos varistores e da quantidade destes aditivos sobre as propriedades não-lineares e dielétricas (1,6,8,10,11,15-17,25), propriedades estas grandemente influenciadas pela composição do material.

O ZnO puro apresenta-se como um semicondutor isolante, porém, quando sinterizado, constitui-se em um condutor razoável, não apresentando propriedades não-lineares. Esta condutividade provavelmente deriva-se do nível de doadores superficiais do ZnO associado com as vacâncias criadas durante o processo de sinterização a 1200°C. Portanto, para que sejam verificadas as propriedades não-lineares nos varistores, é necessário adicionar ao ZnO outro(s) óxido(s) metálico(s).

Matsuoka (1) a partir de experimentos mostrou o efeito da adição de um único óxido e de vários óxidos combinados sobre a resistência não-linear, o coeficiente de não-linearidade (α) e tamanho médio dos grãos de óxido de zinco, em função da temperatura de sinterização. Neste trabalho, pode ser verificado que os efeitos dos aditivos sobre as propriedades não-lineares dos varistores de ZnO são fortemente influenciados pela temperatura de sinterização.

Diversas investigações mostraram que as propriedades não-lineares verificadas nas fronteiras entre os grãos são atribuídas basicamente a adição ao ZnO de íons que possuem um raio atômico maior do que o raio atômico do íon de ZnO, tais como os íons de Bi, Ba, Sr, Pb, U, Nd e Pr. Os óxidos formados a partir destes íons, são denominados de "óxido de formação dos varistores" "varistor-forming" (10), e são os principais responsáveis pela formação da fase intergranular localizada na fronteira entre os grãos.

A estrutura básica da maioria dos varistores de ZnO produzidos em escala comercial é formada pela adição do Bi_2O_3 ao ZnO. No entanto, varistores utilizando o óxido de Praseodímio como "óxido de formação dos varistores" também tem sido produzidos para aplicação em sistemas de alta tensão (10,11).

Sabe-se que o Bi_2O_3 é o principal responsável pela formação da fase amorfa que circunda os grãos condutores de ZnO no interior da microestrutura. Eda (24) também apresentou resultados de estudos das propriedades elétricas e dielétricas para o sistema ZnO- Bi_2O_3 . Segundo Eda as propriedades não-lineares dos varistores de ZnO aparecem a partir da adição de pelo menos 0,1 mol% de Bi_2O_3 ao ZnO. O efeito da adição do Bi_2O_3 ao ZnO sobre o coeficiente de não-linearidade é apresentado na Figura 2.6. Verifica-se da Figura uma elevação do coeficiente de não-linearidade a a partir de 0,1 mol%, com uma tendência de saturação a partir da concentração 5 mol% de Bi_2O_3 , ou seja, as barreiras de potencial formadas não são suficientemente boas para apresentar uma elevada não-linearidade. Resultados similares foram obtidos por Bhushan et alii (25). que verificaram uma redução na corrente para a região de baixas tensões aplicadas com o aumento da concentração de Bi_2O_3 .

Com relação às propriedades dielétricas é sabido que um aumento na quantidade de Bi_2O_3 provoca uma redução nos valores da capacitância e da tangente de perdas.

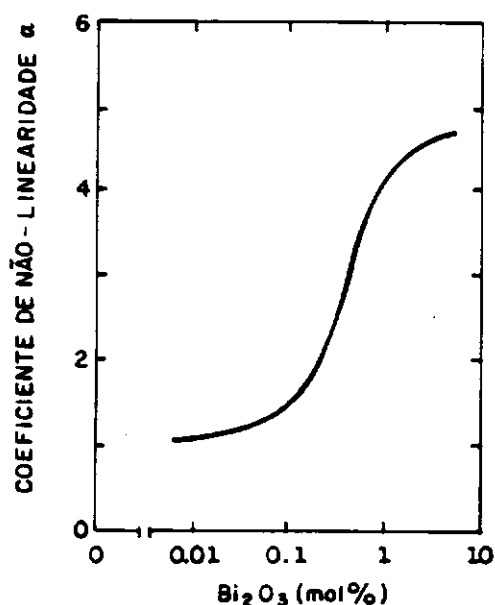


Figura 2.6 - Efeito da concentração do Bi_2O_3 ao ZnO sobre o coeficiente de não-linearidade (24)

A utilização do óxido de Praseodímio como elemento básico na formação dos varistores tem sido estudado desde a década passada(10,11). O Praseodímio é um elemento pertencente a família dos metais de terras raras sendo obtido como pó de óxido Praseodímio (Pr_6O_{11}). No início, este óxido era utilizado comercialmente somente para a produção de varistores para baixas tensões.

Foi verificado através do Scanning Electron Microscope (SEM) que os varistores produzidos tendo como componente o Pr_6O_{11} apresentam uma microestrutura constituída pelos grãos de cristais de ZnO e por uma fase intergranular (11) que circunda os grãos, composta

principalmente pelo Pr_6O_{11} . A espessura desta camada intergranular é menor do que 100 \AA . Verificou-se também que esta estrutura quando comparada ao sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$, apresenta uma área de condução maior. Uma maior área de condução de corrente deve-se ao aumento da área efetiva entre os grãos, causada pela escassez de partículas do tipo espinélio. Como consequência do aumento da área efetiva da seção transversal entre os eletrodos, os varistores formados a partir do Pr_6O_{11} apresentam uma maior constante dielétrica quando comparado com os varistores formados por Bi_2O_3 .

Apesar da não-linearidade apresentada pelos sistemas binários $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ e $\text{ZnO-Pr}_6\text{O}_{11}$, verifica-se que estes componentes quando adicionados ao ZnO sem a adição de outros componentes não apresentam uma não-linearidade suficiente para justificar uma produção de varistores em escala comercial. Portanto, para a obtenção de propriedades não-lineares típicas para varistores comercialmente viáveis, um terceiro ingrediente deve ser adicionado aos sistemas binários acima descritos. Estes óxidos, denominados de "óxido de desempenho do varistor" "varistor performance" (10), são geralmente óxidos metálicos de transição, tais como o Co_2O_3 , MnO_2 e NiO .

A adição de óxidos metálicos de transição ao sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ ou $\text{ZnO-Pr}_6\text{O}_{11}$, melhora consideravelmente as propriedades não-lineares dos varistores, aumentando o seu coeficiente de não-linearidade, diminuindo conseqüentemente a corrente do varistor para a região de baixas tensões aplicadas. Os óxidos metálicos de transição formam, durante a sinterização, uma solução sólida com o ZnO . Matsuoka (1) mostrou que varistores com esta composição, quando sinterizados numa faixa de temperatura compreendida entre 1250 e 1350°C , apresentavam valores para α de até 18. Isto significa que a adição dos óxidos de transição ao sistema

ZnO-Bi₂O₃ evita a evaporação do Bi₂O₃ para temperaturas de sinterização na faixa de 1250 a 1350°C. O efeito da adição do Co₂O₃ e do MnO₂ sobre o sistema ZnO-Bi₂O₃, contendo 1 mol% de Bi₂O₃ é apresentado na Figura 2.7. A melhoria acentuada da não-linearidade quando da presença de óxidos metálicos de transição na composição do elemento foi explicada por Eda (24). No entanto, varistores formados pela simples adição de 0,5 mol% de Co ou Mn ao ZnO quando sinterizados acima de 1250°C, não apresentam propriedades não-lineares, uma vez que ambos os óxidos difundem-se nos grãos de ZnO, quando sinterizados acima desta temperatura.

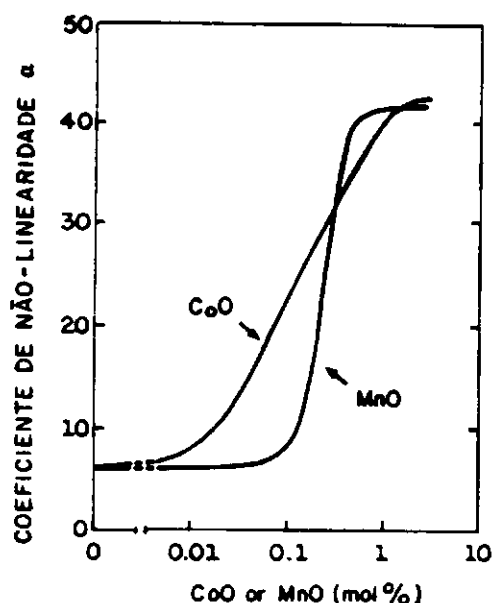


Figura 2.7 - Efeito da adição do Co₂O₃ e do MnO₂ sobre o sistema ZnO-Bi₂O₃ contendo 1 mol% de Bi₂O₃ (24)

Com relação às propriedades dielétricas, verifica-se que a adição de Co_2O_3 ou MnO_2 provoca uma redução da tangente de perdas na região de baixas frequências (24).

Philipp et alli (10) investigaram a performance dos varistores de ZnO para os possíveis diferentes sistemas binários e ternários formados a partir dos óxidos de zinco, "óxidos de formação dos varistores" (Bi_2O_3 ou Pr_6O_{11}) e "óxidos de desempenho" (MnO_2 ou Co_2O_3). As quantidades inicialmente escolhidas para os óxidos de formação foram de 0; 0,1 e 1 mol%, enquanto que para os óxidos de desempenho de 0; 0,001; 0,1 e 1 mol%. Maiores detalhes sobre esse estudo podem ser encontrados na referência.

Outro óxido que provoca grandes variações na performance dos varistores de ZnO é o óxido de Antimônio (Sb_2O_3). A adição do Sb_2O_3 ao sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ provoca uma redução no tamanho dos grãos, melhorando as propriedades não-lineares. Pequenos grãos de ZnO resultam em valores elevados para a tensão de referência. O Sb_2O_3 , quando adicionado a composição para a produção de varistores de ZnO apresenta duas funções básicas (24): a primeira, conforme descrito em 2.1 mostra que o Sb_2O_3 é responsável pela inibição no crescimento dos grãos, durante a sinterização, através da formação do espinélio ($\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$). A segunda é que o óxido de antimônio acentua a solubilidade de íons tais como o zinco na fase líquida rica em Bi_2O_3 , sendo esta função muito importante para a distribuição de defeitos formados nas fronteiras dos grãos durante o resfriamento. As chamadas barreiras de potencial apresentando propriedades altamente não-lineares são criadas e determinadas pela utilização do Sb_2O_3 . O efeito da adição do Sb_2O_3 ao sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ numa relação 2:2:1 sobre o coeficiente de não-linearidade e a tensão de referência, é apresentada na Figura 2.8.

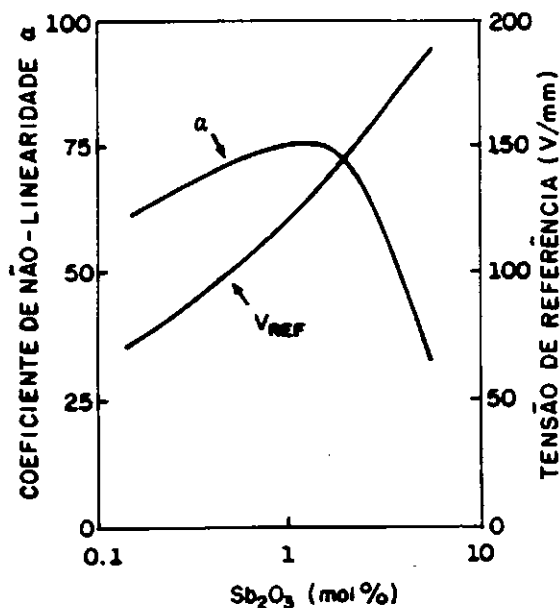


Figura 2.8 - Efeito do Sb_2O_3 ao sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ numa relação 2:2:1 sobre o coeficiente de não-linearidade e a tensão de referência (24)

Com relação às propriedades dielétricas, a adição do Sb_2O_3 causa uma redução na constante dielétrica.

Dióxido de Silício (SiO_2) pode ser utilizado para inibir o crescimento dos grãos. Por outro lado, TiO_2 ou BeO , quando adicionados à composição promovem o crescimento destes. Sistemas $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ tem sido utilizados comercialmente para a produção de varistores de baixa tensão, os quais requerem largos grãos de ZnO (23).

A adição de íons monovalentes ou trivalentes tais como o Li , Al e Ga , que possuem um raio atômico menor do que o raio atômico do íon de ZnO , também produz alterações nas características dos varistores. A adição de íons trivalentes, tais como o Al ou Ga provoca uma diminuição na

resistividade dos grãos de ZnO, acarretando em uma redução da tensão na região de descarga. Por outro lado, a adição destes íons provoca um aumento na densidade de portadores de carga, que por sua vez reduz a altura das barreiras de potencial provocando uma redução na tensão e consequente aumento da corrente na região de baixas tensões aplicadas (17,22). Deste modo, a dopagem com Al ou Ga além de uma determinada concentração, torna-se perigosa devido ao aumento da corrente resistiva. Com relação as propriedades dielétricas, a presença de íons de Al e Ga provoca um aumento na capacitância do varistor. Já a adição de íons monovalentes reduz a concentração de portadores de carga, aumentando a altura das barreiras de potencial e, conseqüentemente, a resistividade dos grãos de ZnO, diminuindo a corrente resistiva na região de baixas tensões aplicadas (17,22). Da mesma forma, a dopagem com íons monovalentes deve ser cuidadosamente controlada, visto que estes íons provocam um aumento na tensão para a região de descarga. Com relação as propriedades dielétricas, a adição de Li provoca uma redução na capacitância sobre toda a região de frequência e um aumento da tangente de perdas na região de altas frequências (22). Resultados experimentais mostrando os efeitos da adição de íons monovalentes e trivalentes sobre a característica $V \times I$ e sobre as propriedades dielétricas dos varistores são apresentados por Eda (22) e Miyoshi et alli (17).

O efeito da adição do Nb_2O_5 nas propriedades elétricas e dielétricas dos varistores foi investigado por Asokan et alli (16). Estudos anteriores foram realizados em um sistema binário ZnO- Nb_2O_5 . Nestes estudos pode ser observada a influência da quantidade de Nb_2O_5 e da temperatura de sinterização sobre o desempenho deste sistema. Experimentos foram realizados variando-se a concentração de Nb_2O_5 de 0,1 a 0,5 mol%, para temperaturas

de sinterização de 900 a 1300°C. Para uma temperatura de sinterização constante, o valor de α aumenta com o aumento da quantidade de Nb_2O_5 até 0,2 mol%, acima do qual α decresce. Similarmente, para uma composição constante, α aumenta com o aumento da temperatura de sinterização até 1100°C, acima da qual α decresce. O maior valor obtido para α para este sistema binário foi de 8, para uma quantidade de Nb_2O_5 de 0,2 mol% sinterizado a uma temperatura de 1100°C. Esta propriedade não-linear foi atribuída a precipitação da fase do tipo espinélio $\text{Zn}_3\text{Nb}_2\text{O}_8$ formada durante a calcinação do ZnO com o Nb_2O_5 . Com base nestes resultados, Asokan et alii investigaram o efeito da adição do Nb_2O_5 a um sistema formado por uma quantidade constante de $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-NiO-Al}_2\text{O}_3$, sobre às características na região de baixas correntes, o coeficiente de não-linearidade e a capacidade de absorção de energia. Para verificar a influência deste óxido, foram preparadas amostras contendo 0,1; 0,2; 0,25 e 0,3 mol% de Nb_2O_5 . Estas amostras foram sinterizadas a 1250°C por 2 horas e pós sinterizadas a 1100°C por 10 horas. As amostras aditivadas com 0,1 mol% apresentaram uma degradação acentuada após a aplicação de 2 pulsos de alta energia. Para amostras contendo mais do que 2 mol% foi verificado um baixo valor de α , bem como uma corrente significativamente alta na região de baixas tensões aplicadas. A redução das propriedades não-lineares com o aumento do conteúdo de Nb_2O_5 , pode ser explicada pelo aumento excessivo na formação da fase espinélio $\text{Zn}_3\text{Nb}_2\text{O}_8$. A quantidade de 0,2 mol% apresentou excelentes propriedades não-lineares, boa capacidade de absorção de energia e uma boa estabilidade, com um tempo de vida estimado superior àquele obtido para a mesma composição não contendo o Nb_2O_5 .

Chiou & Jih (15) realizaram estudos para a verificação do efeito da adição de composições formadas por

PbO-Bi₂O₃-Al₂O₃-BaO-CaO-SiO₂ sobre a composição básica apresentada por Matsuoka. Foram investigadas para diferentes composições as propriedades elétricas e o comportamento sob degradação para varistores com e sem estes aditivos. Os resultados experimentais mostraram que a adição de compostos "vitrificantes" melhora as características elétricas dos varistores, reduzindo as suas correntes na região de baixas tensões aplicadas, bem como a taxa de degradação dos varistores.

Na Tabela 2.3 (24,26) são apresentadas as funções básicas dos principais elementos utilizados como aditivos para a formação dos varistores.

Tabela 2.3 - Influência dos elementos utilizados como aditivos na formação dos varistores

Natureza dos aditivos	ação sobre o varistor
Bi,Pr > Ba,Nd,Sr,Pb,U	Formação do efeito varistor (Isolação dos grãos de ZnO e fornecimento de elementos necessários para os contornos dos grãos (O ₂ ,Co,Mn,Zn, etc.)
Co,Mn > Sb	Melhoria na característica não-linear - Formação dos estados interfaciais
Ni,Al < Co,Mn	Melhoria na característica não-linear
Sb,vidro,Ag,B > Ni,Cr	Estabilidade das características elétricas
Al,Ga > F,Cr	Diminuição da resistividade dos grãos - Formação dos doadores no ZnO
Li	Aumento da resistividade dos grãos
Sb,Si	Inibição do crescimento dos grãos de ZnO
Be > Ti > Sn	Promoção do crescimento dos grãos

Os varistores produzidos em escala comercial apresentam basicamente em suas composições os quatro aditivos básicos, Bi_2O_3 (ou Pr_6O_{11}), Co_2O_3 , MnO_2 e Sb_2O_3 , sendo adicionados a estes alguns óxidos para controlar o tamanho e a resistividade dos grãos e melhorar a estabilidade do varistor. A composição final bem como a quantidade de aditivos utilizados na fabricação dos varistores depende em muito das características desejadas. Composições típicas para a produção de varistores são apresentadas nas referências (1,6,7,8,15,24).

O efeito da quantidade de concentração de aditivos sobre as propriedades dos varistores de ZnO foi estudado inicialmente por Matsuoka (1) para a composição contendo os óxidos Bi_2O_3 , MnO_2 , Co_2O_3 , Cr_2O_3 e Sb_2O_3 , numa relação 1:1:1:1:2. Todos os varistores analisados foram sinterizados a uma temperatura de 1350°C . O efeito do conteúdo molecular total sobre o coeficiente de não-linearidade α , descrito por Matsuoka é apresentado na Figura 2.9.

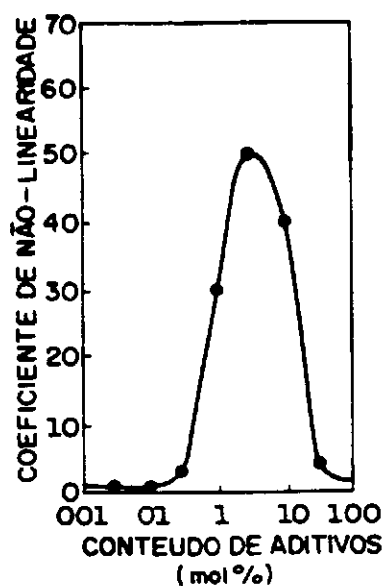


Figura 2.9 - Efeito da quantidade total de aditivos sobre o coeficiente de não-linearidade α (1)

Da Figura, vê-se a ausência de propriedades não-lineares para um conteúdo de aditivos total menor do que 0,1 mol%. Acima de 0,1 mol%, verifica-se uma elevação abrupta de α com o aumento do conteúdo total dos aditivos, apresentando um valor máximo de 50 para 3 mol%, após o qual este parâmetro decresce com o aumento dos aditivos. Uma mistura de 100 mol% dos aditivos, ou seja, sem a presença do óxido de zinco, não apresenta propriedades não-lineares. Estudos realizados por Matsuoka a partir do EP (electron photomicrographics), para diferentes conteúdos de aditivos, apresentaram concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

Posteriormente, Mc-Graw Edison Company (6) estudou o efeito da concentração de vários aditivos sobre a tensão de referência, corrente, constante dielétrica e capacidade de absorção de energia. O efeito da concentração de cada aditivo e o efeito da quantidade total de aditivos sobre as características acima descritas são apresentados nas Figuras 2.10 a 2.15.

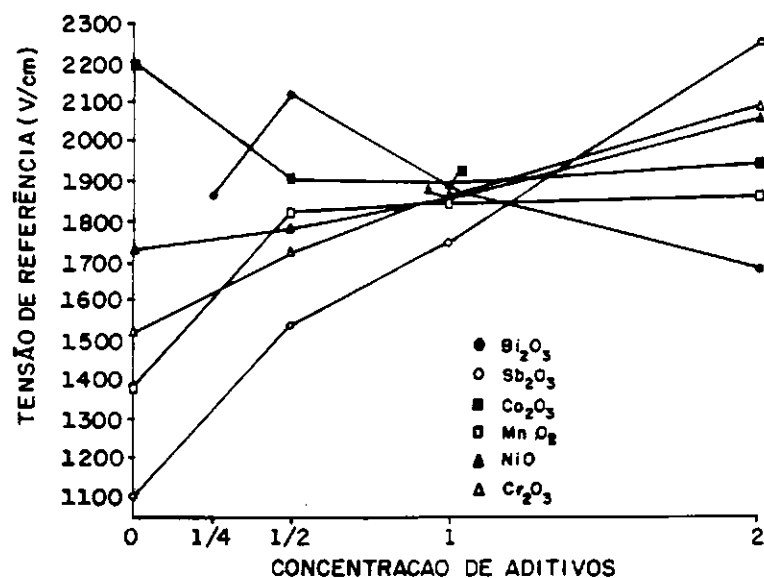


Figura 2.10- Efeito da concentração de cada aditivo sobre a tensão de referência (6)

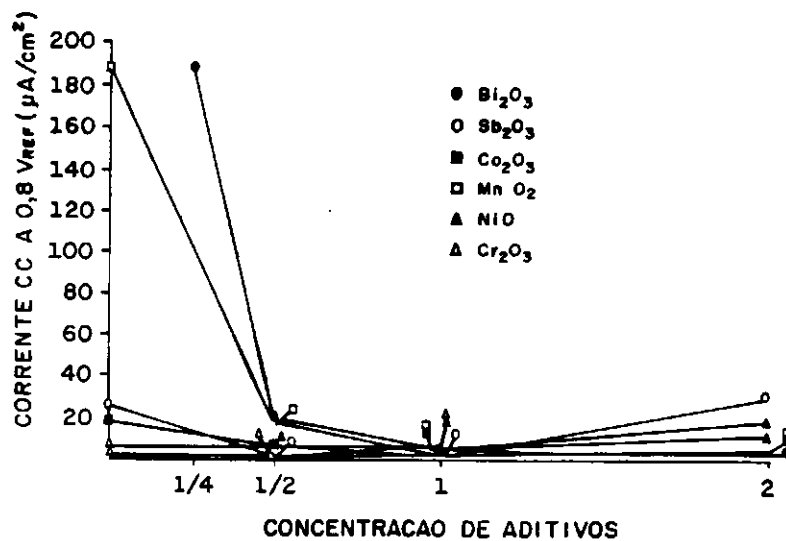


Figura 2.11- Efeito da concentração de cada aditivo sobre a corrente CC na tensão contínua de operação (6)

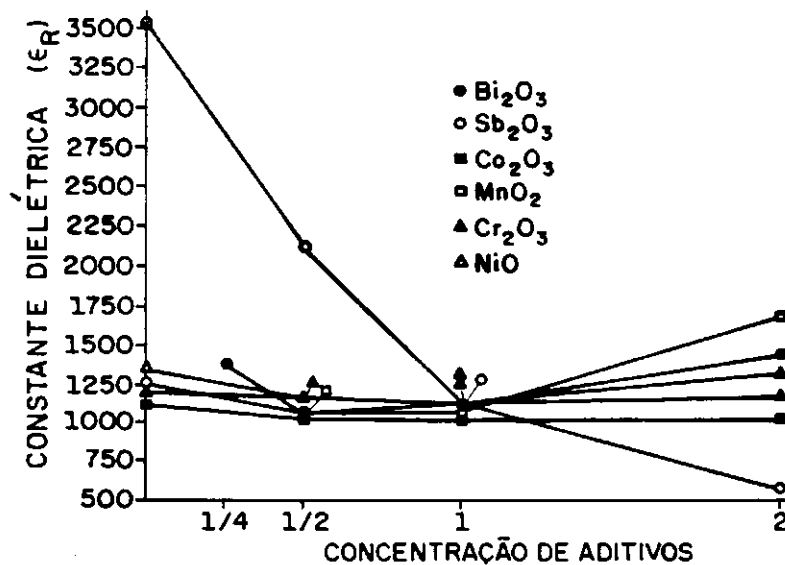


Figura 2.12- Efeito da concentração de cada aditivo sobre a constante dielétrica (6)

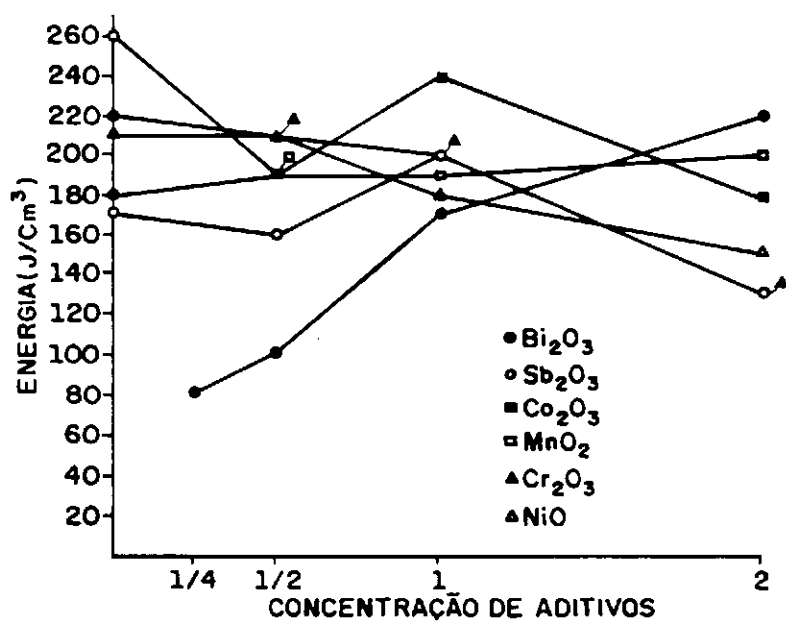
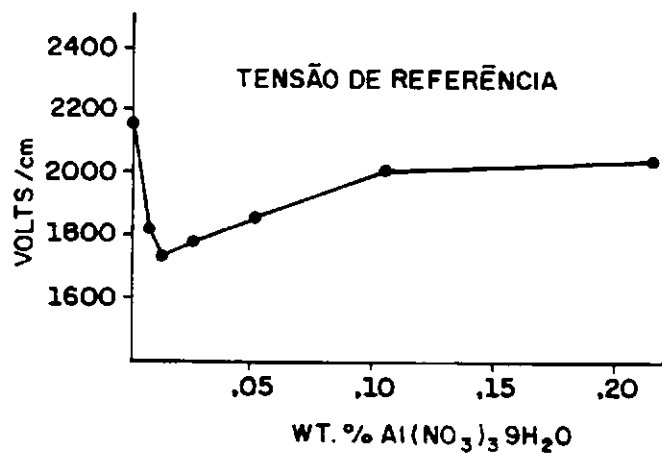
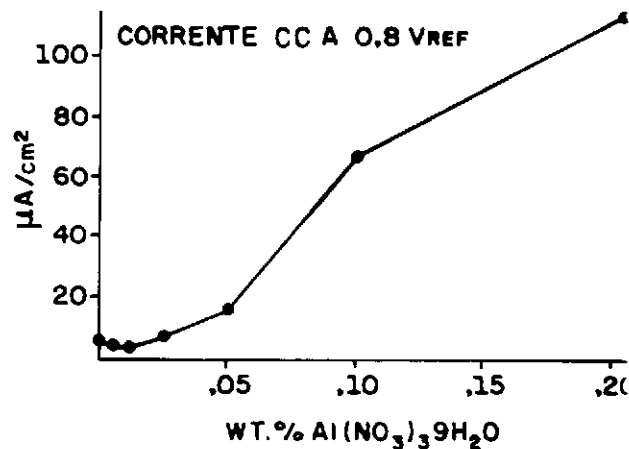
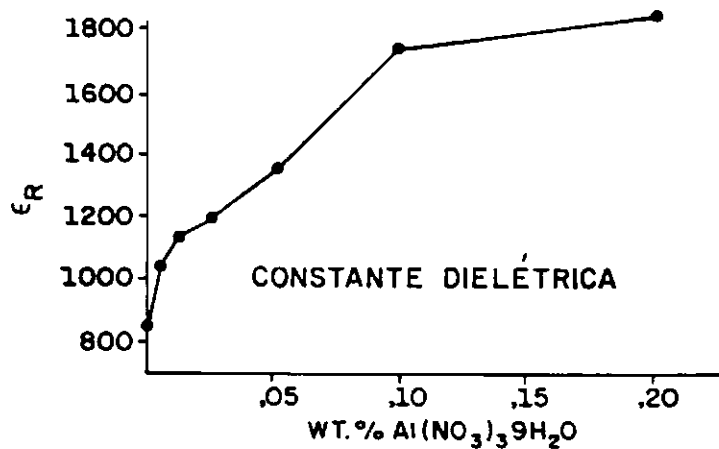


Figura 2.13- Efeito da concentração de cada aditivo sobre a energia (J/cm^3) (6)



Tensão de referência

corrente CC para a V_{CO} 

Constante dielétrica

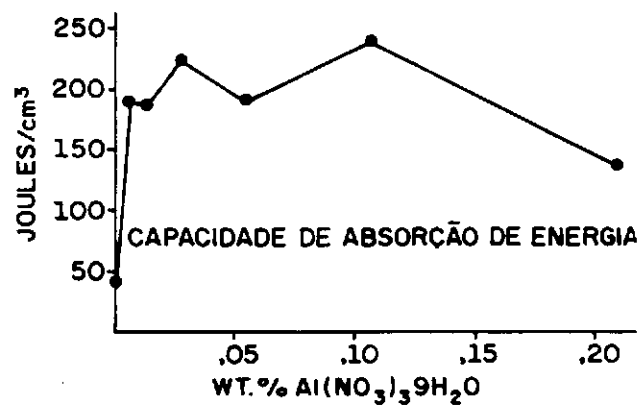
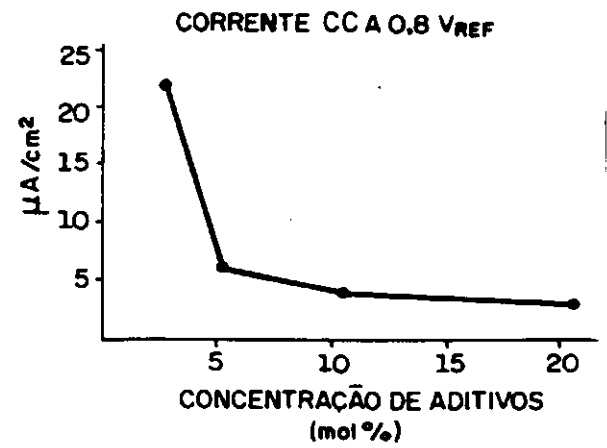
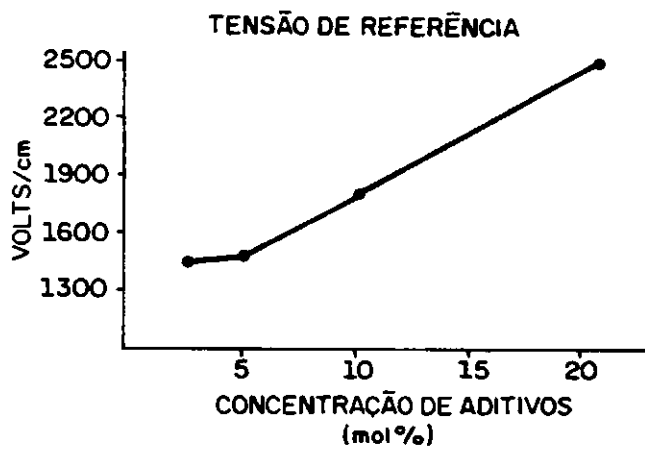
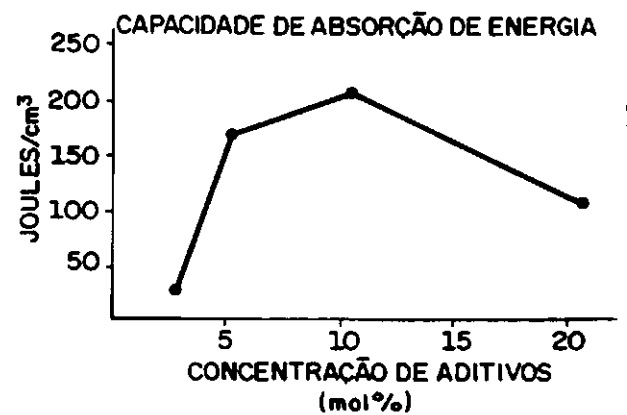
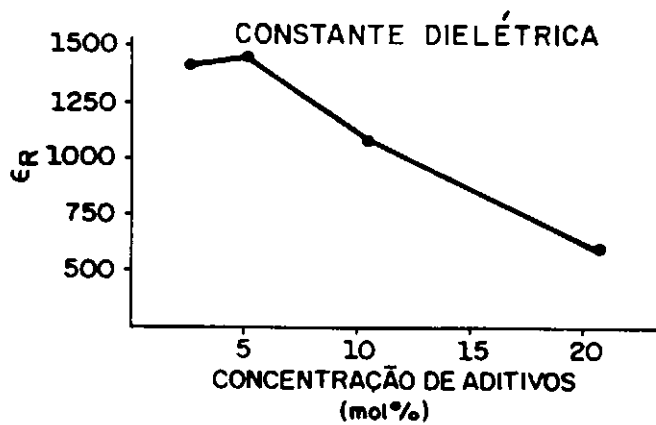
Energia (J/cm^3)

Figura 2.14- Efeito da concentração de Nitrato de Alumínio sobre as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores (6)



Tensão de referência

corrente CC para a V_{CO} 

Constante dielétrica

Energia (J/cm^3)

Figura 2.15- Efeito da concentração de vários aditivos sobre as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores (6)

2.4 Microestrutura dos varistores de ZnO

Conforme apresentado nas seções anteriores, as propriedades elétricas e dielétricas dos varistores são fortemente dependentes da adição de óxidos dopantes ao ZnO e de parâmetros físicos, tais como a temperatura e o tempo de sinterização, responsáveis pela formação da microestrutura característica dos varistores. Baixas características não-lineares são observadas para quantidades muito pequenas ou excessiva de dopantes adicionados ao ZnO (seção 2.3), ou ainda quando a temperatura de sinterização não é suficientemente alta para a formação da microestrutura varistora ou muito elevada que provoque a evaporação dos dopantes (seção 2.2). Desta forma, a análise das fases cerâmicas, resultado da reação entre os óxidos dopantes e o ZnO durante o processo de sinterização bem como o mecanismo de formação destas fases, são fatores importantes que precisam ser conhecidos para a otimização do desempenho dos varistores.

O entendimento do processo de formação da microestrutura dos varistores cerâmicos de ZnO ocorreu de forma gradual. Um dos primeiros estudos abordando a microestrutura dos varistores foi realizado por Matsuoka (1). A partir de estudos microscópicos, Matsuoka verificou que os varistores cerâmicos de ZnO apresentavam uma microestrutura na qual cada grão de óxido de zinco apresentando um tamanho médio de aproximadamente 10 μm e uma resistividade elétrica ρ_G compreendida entre 1 a 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ era circundado pela camada intergranular de espessura t , de aproximadamente 1 μm e com uma alta resistividade elétrica ρ_L , formada pela composição dos óxidos de zinco e seus aditivos. Com base nestes estudos, Matsuoka apresentou um modelo idealizado para a microestrutura dos varistores, modelo que serviu de base para vários estudos iniciais relativos às propriedades elétricas e dielétricas. Este modelo consiste de cubos

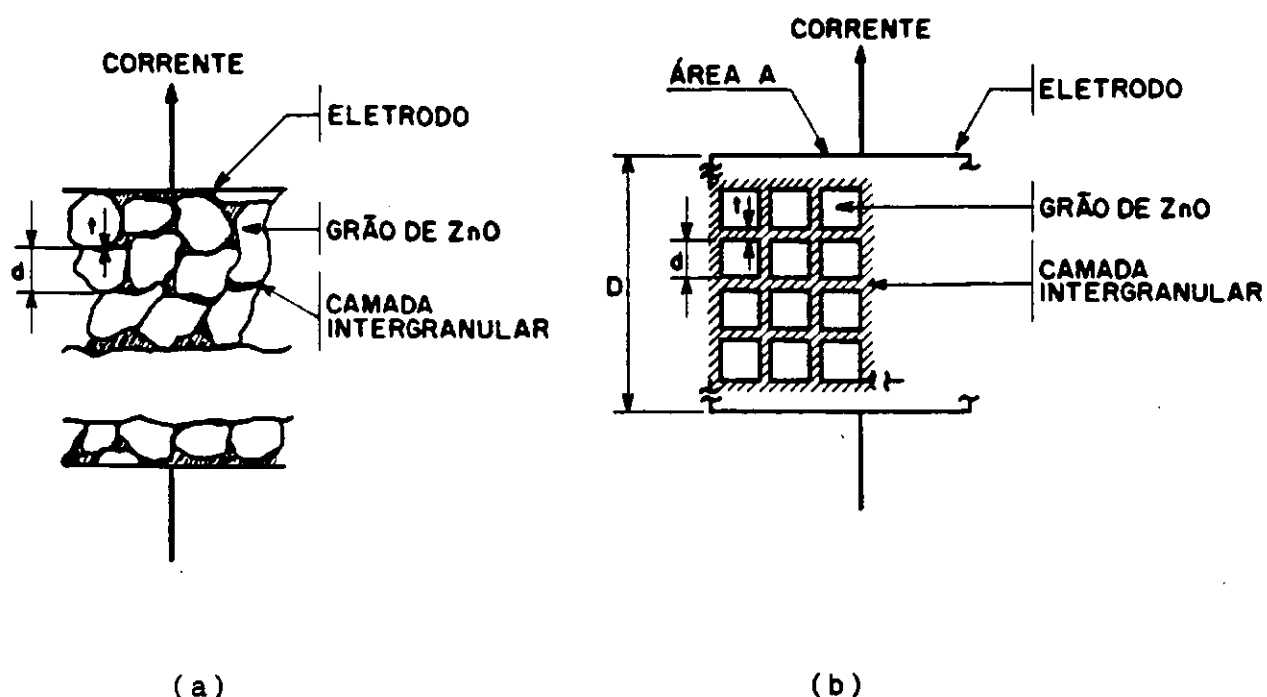
apresentando grãos de ZnO de comprimento d e separados uns dos outros por uma camada intergranular, apresentando uma espessura t . Uma representação esquemática para a microestrutura e para o modelo idealizados por Matsuoka é mostrada nas Figuras 2.16a e 2.16b, respectivamente.

Philipp & Levinson (27) em seus estudos das propriedades não-lineares dos varistores e ZnO, evidenciaram a partir de estudos microscópicos uma microestrutura formada por três fases: os grãos de óxido de zinco, a camada intergranular e a fase formada por partículas do tipo espinélio. Para o estudo, Philipp e Levinson utilizaram o modelo idealizado proposto por Matsuoka. No entanto, os autores atribuíram às propriedades não-lineares a existência de uma camada intergranular com uma espessura média de aproximadamente 100 \AA , bem menor do que a inicialmente proposta por Matsuoka.

Inada (21), com base no sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ apresentado por Matsuoka, realizou uma investigação minuciosa sobre o mecanismo de formação das fases cerâmicas, em relação a quantidade de aditivos e a temperatura de sinterização. Baseado nos estudos realizados por Inada, Leite (28), descreveu a variação das fases cerâmicas com relação a quantidade total de aditivos para varistores com uma composição básica contendo $(100-X) \text{ ZnO} + X/6 (\text{Bi}_2\text{O}_3 + 2 \text{ Sb}_2\text{O}_3 + \text{Co}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3)$ (% molar) e sinterizados a uma temperatura de 1350°C . Na Figura 2.17 é apresentada a síntese deste estudo.

O efeito da temperatura de sinterização sobre a formação das fases cerâmicas pode ser entendida pelas reações que ocorrem no sistema ternário $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3$ e pelo efeito dos outros óxidos, durante as etapas de

aquecimento e resfriamento (20-22). Inada (21) verificou que para as mesmas condições de sinterização as fases e a microestrutura de varistores de ZnO formados por este sistema ternário eram muito diferentes daquelas obtidas para o sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Co}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$, apresentado por Matsuoka. Desta forma, as fases resultantes e a microestrutura dos varistores dependem do tipo e da composição dos aditivos adicionados ao sistema ternário básico e das condições de sinterização.



(a) - Representação da microestrutura

(b) - Modelo idealizado

Figura 2.16- Representação esquemática da microestrutura proposta por Matsuoka para os varistores de ZnO (1)

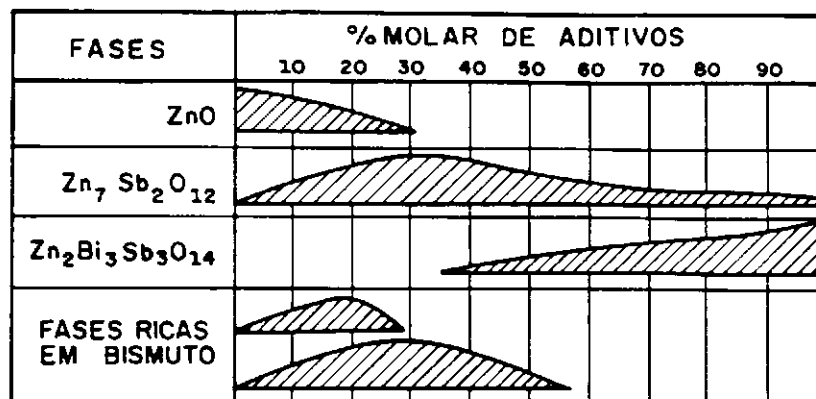


Figura 2.17- Variação das fases cerâmicas com relação a quantidade de aditivos no sistema $(100-X)$ ZnO + $X/6$ (Bi_2O_3 + $2 \text{Sb}_2\text{O}_3$ + Co_2O_3 + MnO_2 + Cr_2O_3) (% molar). $T_s = 1350^\circ\text{C}$ (28)

A dependência das formações das fases com a temperatura de sinterização para a composição básica contendo $(100-X)$ ZnO + $X/6$ (Bi_2O_3 + $2 \text{Sb}_2\text{O}_3$ + Co_2O_3 + MnO_2 + Cr_2O_3) (% molar), para uma quantidade total de aditivos X menor ou igual a 30 é apresentada na Figura 2.18. Esta Figura foi obtida a partir da leitura de parte de um trabalho desenvolvido, o qual não se dispõe do título bem como do seu autor, fato pelo qual não foi incluído nas referências bibliográficas.

Com o aumento da temperatura de sinterização acima de 900°C verifica-se, para esta composição, uma diminuição considerável da fase cerâmica de ZnO. Isto deve-se ao

aumento da fase formada por partículas do tipo espinélio para temperaturas de sinterização acima deste valor. Com relação as fases ricas em bismuto, estas passam por diversas fases polimórficas, iniciando pela fase $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$, formada durante o aquecimento e evoluindo, com o aumento da temperatura, para outras fases ricas em bismuto. Os estudos mostraram que para temperaturas de sinterização acima de 1300°C as fases β e $\sigma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ diminuem gradualmente. A formação das fases β e $\sigma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ pode se dar por choque térmico ou por cristalização de um excesso de bismuto que não reagiu.

As possíveis reações que podem ocorrer para o sistema apresentado por Matsuoka (1) são analisadas por Inada (21) e descritas nas referências 23 e 28.

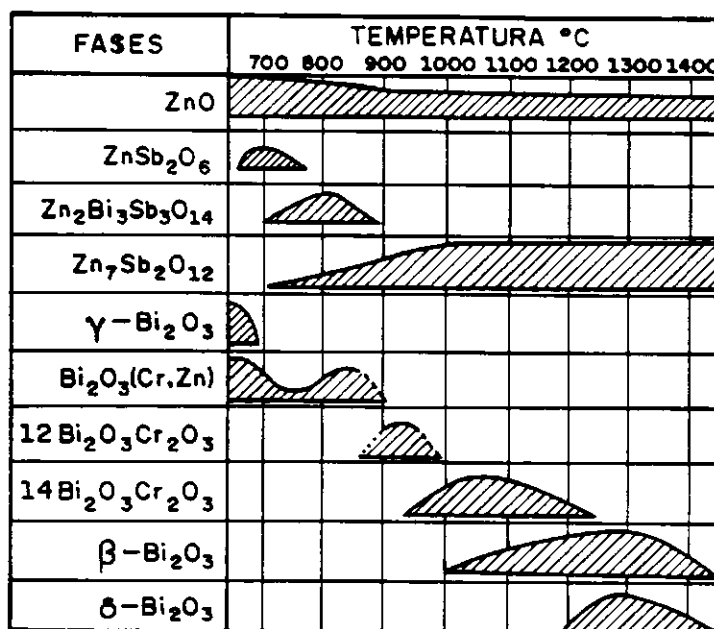


Figura 2.18- Efeito da temperatura de sinterização sobre as fases cristalinas formadas no sistema $(100-X)\text{ZnO} + X/6 (\text{Bi}_2\text{O}_3 + 2\text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{Co}_2\text{O}_3 + \text{MnO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3)$ (% molar), para X menor ou igual a 30.

Os varistores cerâmicos de ZnO formados por sistemas multicomponentes a partir do sistema ZnO-Bi₂O₃, apresentam uma complexa microestrutura, onde quatro fases podem atualmente ser bem evidenciadas: uma fase de óxido de zinco, uma fase do tipo espinélio (Zn₇Sb₂O₁₂), uma fase do tipo pirocloro (Zn₂Bi₃Sb₃O₁₄) e diversas fases ricas em Bi₂O₃.

A fase formada por óxido de zinco constitui a matriz cerâmica, caracterizada pela formação de grãos pouco homogêneos, com Co₂O₃ e MnO₂ difundidos em solução sólida, apresentando uma elevada condutividade, e dimensões compreendidas entre 1 a 20 µm. Cu, Ni e Al pode(m) ser observado(s) nesta fase quando da presença dos óxidos de cobre, de níquel e de alumínio. A fase que contém partículas do tipo espinélio (Zn₇Sb₂O₁₂) com quantidades de Co, Mn e Cr (quando presentes) em solução sólida, é formada durante o processo de sinterização pela reação do Sb₂O₃ com o Bi₂O₃-ZnO, sendo localizada no contorno dos grãos ou no interior destes, com partículas apresentando um diâmetro equivalente médio de aproximadamente 1 µm. Esta fase é responsável pelo controle do crescimento dos grãos. As fases ricas em Bi₂O₃, além da fase pirocloro, podem se apresentar de diversas formas polimórficas e são muito sensíveis a natureza e concentração dos dopantes, ao tipo de processo utilizado na fabricação, temperaturas de sinterização e tempo de permanência destas e taxas de resfriamento empregadas. Estas fases encontram-se na região de fronteira dos grãos, apresentando uma camada intergranular de espessura fina e variável, formada por diversas fases ricas em Bi₂O₃ adicionadas a pequenas quantidades de outros óxidos metálicos, tais como Zn, Sb e Cr (quando presentes) e podem sofrer transformações polimórficas quando submetidas a tratamento térmico após a sinterização. A fase pirocloro pode solubilizar Co₂O₃, MnO₂ e Cr₂O₃ (quando presentes), sendo encontrada na região intergranular, geralmente associada com a fase espinélio.

Esta fase é geralmente obtida sob resfriamento lento, sendo encontrada normalmente para maiores concentrações de aditivos. Experimentos realizados para o sistema $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Co}_2\text{O}_3-\text{MnO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Sb}_2\text{O}_3$ mostraram que para concentrações totais de aditivos maiores do que 30 mol%, ocorre uma redução gradual das fases ricas em Bi_2O_3 e das partículas do tipo espinélio, aparecendo a fase cúbica do tipo pirocloro ($\text{Zn}_2\text{Bi}_3\text{Sb}_3\text{O}_{14}$), que aumenta com o aumento da quantidade total de aditivos.

Uma síntese das fases identificadas na microestrutura de varistores formados a partir do sistema $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{MnO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Sb}_2\text{O}_3-\text{Co}_2\text{O}_3$ e a influência destas fases sobre as características dos varistores é apresentada na Tabela 2.4, abaixo.

Tabela 2.4 - Fases cerâmicas identificadas em sistemas multicomponentes (24)

óxidos de: $\text{ZnO} + \text{Bi}_2\text{O}_3, \text{MnO}_2, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Sb}_2\text{O}_3, \text{Co}_2\text{O}_3$

Fase cerâmica	Composição química	Solução sólida	Localização
Óxido de zinco	ZnO	Co, Mn	grãos
Espinélio	$\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$	Co, Mn, Cr	grão e fase intergranular
Pirocloro	$\text{Zn}_2\text{Bi}_3\text{Sb}_3\text{O}_{14}$	Co, Mn, Cr	fase intergranular
Fases ricas em Bismuto	$\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ $\text{Bi}_2\text{O}_2 \cdot 33$ $12\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ $14\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ AMORFA $12\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (*)	Zn, Sb, Cr	fase intergranular

(*) - Quando da presença do SiO_2

Por outro lado, conforme descrito em 2.3, varistores formados a partir do Pr_6O_{11} apresentam uma microestrutura formada por duas fases: os grãos de ZnO e a camada intergranular formada principalmente pelo Pr_6O_{11} . Análises microscópicas realizadas nestes tipos de varistores não evidenciaram a presença das partículas do tipo espinélio (11).

Uma representação esquemática para a microestrutura dos varistores de ZnO formados a partir do Bi_2O_3 e do Pr_6O_{11} , são apresentadas nas Figura 2.19a e 2.19b, respectivamente.

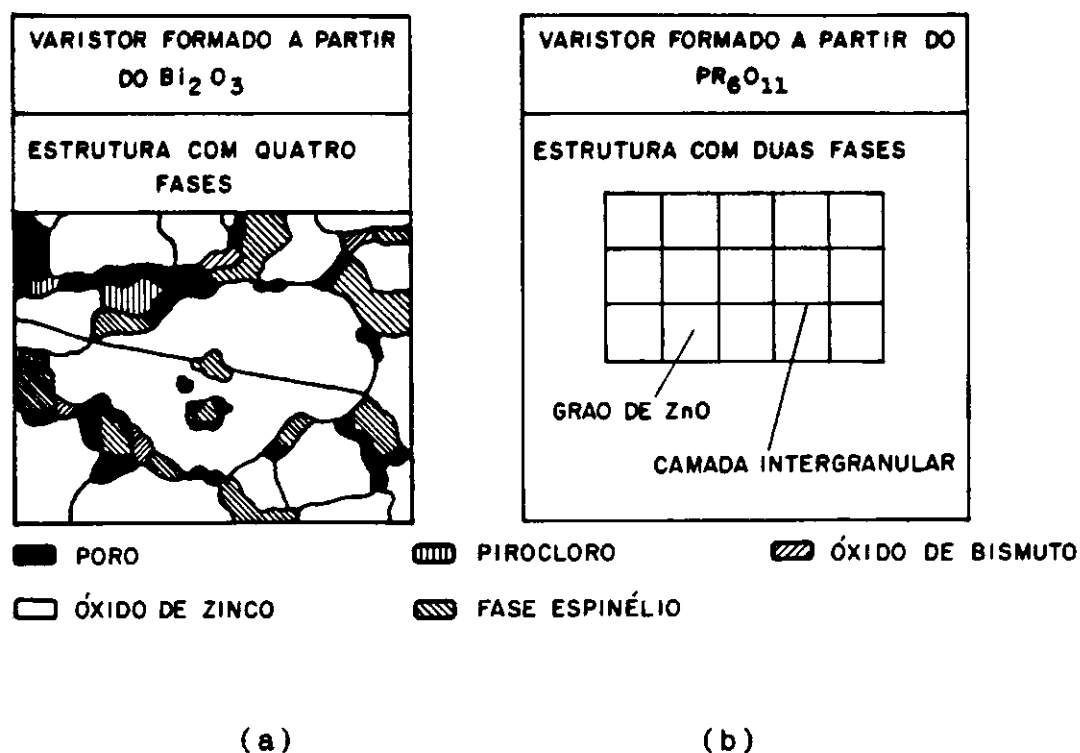


Figura 2.19- Representação esquemática das microestruturas dos varistores (a) - sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$
(b) - sistema $\text{ZnO-Pr}_6\text{O}_{11}$

A região da fronteira dos grãos, formada pelas diversas fases ricas em Bi_2O_3 é responsável pelas propriedades não-lineares dos varistores e possui uma característica tal que a sua resistividade específica decresce com o aumento da tensão aplicada. Este decrescimento é mais acentuado a medida que a tensão aplicada se aproxima da tensão de referência (V_{ref}) do varistor. Diversas investigações foram realizadas com relação a formação destas fases, que podem se localizar em diferentes regiões da microestrutura, podendo formar uma fase intergranular contínua, segregar ou absorver nos contornos dos grãos ou ainda se concentrar nas junções de múltiplos grãos. A Figura 2.20 representa esquematicamente a localização da fase rica em Bi_2O_3 , na região intergranular e na região entre os grãos.

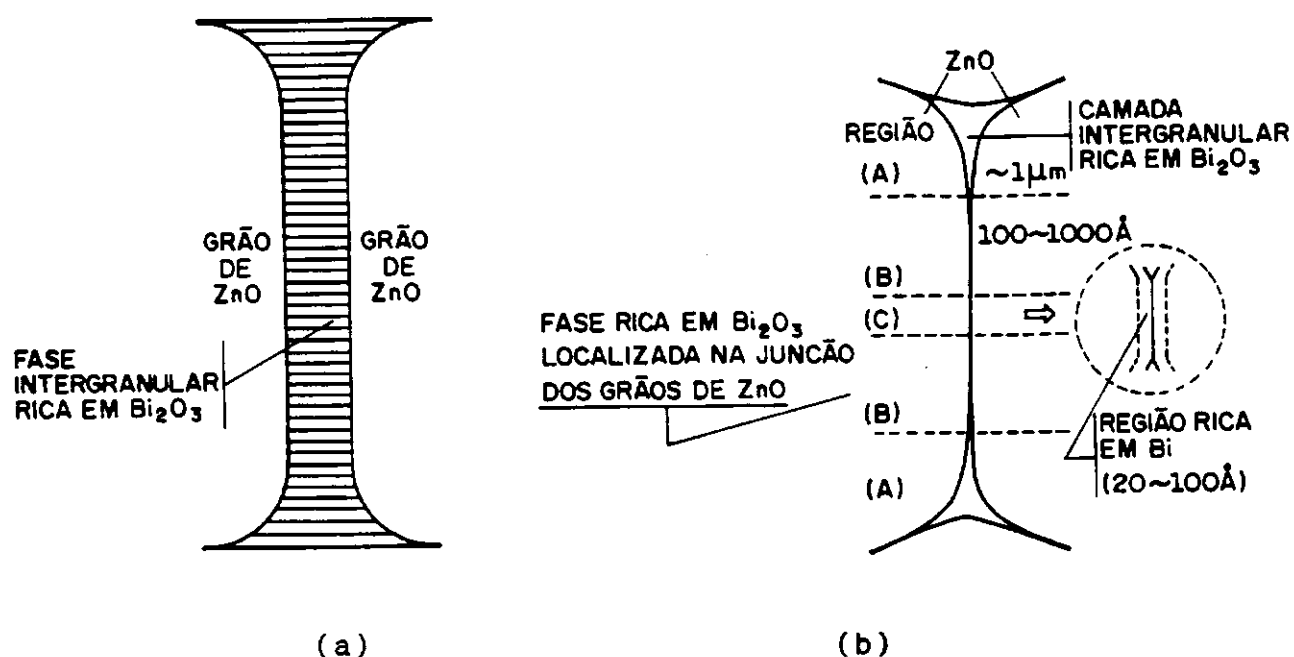


Figura 2.20- Localização da fase rica em Bi_2O_3

- (a) - formando uma camada intergranular contínua
- (b) - apresentando uma espessura variável

Sabe-se atualmente que a maioria dos grãos de ZnO não apresenta uma fase intergranular contínua rica em Bi_2O_3 . Desta forma, as camadas intergranulares formadas a partir do Bi_2O_3 e localizadas nas fronteiras dos grãos apresentam uma espessura variável. Eda (22,24), a partir de estudos realizados por outros investigadores, dividiu a estrutura desta fase em três regiões distintas, conforme esquematicamente apresentado na Figura 2.20b. A primeira é uma região da fronteira entre os grãos apresentando uma camada intergranular rica em Bi_2O_3 , com uma espessura aproximada de 1 μm (região A). Ao aproximar-se dos pontos de contato, esta camada intergranular rica em Bi_2O_3 torna-se menos espessa, formando a segunda região da fronteira entre os grãos (região B). Esta região apresenta uma espessura compreendida entre 100 a 1000 Å . Existe um ponto de contato através do qual nenhuma camada intergranular rica em Bi_2O_3 bem definida pode ser observada. Esta região corresponde a terceira região da fronteira entre os grãos, apresentando uma espessura muito fina, de aproximadamente 20 a 100 Å (região C). Nesta região da estrutura foram detectados na região de interface da fronteira dos grãos quantidades de bismuto enriquecido, Co e uma quantidade excessiva de fons de oxigênio.

A explicação para a variação encontrada na camada intergranular rica em Bi_2O_3 ao longo da fronteira dos grãos foi apresentada por Eda (22,24). Esta variação pode ser causada pela energia superficial (aparente) dos grãos de ZnO e pela distribuição desigual do Bi_2O_3 no corpo prensado. Em alguns lugares, Bi_2O_3 fundido pode se introduzir facilmente ao longo das fronteiras dos grãos. Já em lugares onde o Bi_2O_3 fundido não pode penetrar, pode ocorrer, durante a sinterização, o deslocamento de fons de bismuto para as fronteiras dos grãos (22).

A relação de ocupação das três estruturas existentes na fronteira entre os grãos é variável, sendo esta relação

fortemente dependente da composição da mistura (principalmente o Bi_2O_3) e das condições de sinterização. Varistores cerâmicos com 0,5 mol% de Bi_2O_3 adicionado a mistura e sinterizado a 1250°C por aproximadamente 2 horas apresentam principalmente as regiões B e C, enquanto que os varistores com a mesma composição e sinterizados a 1400°C por algumas horas apresentam em sua estrutura principalmente a região C. Varistores que apresentam quantidades de Bi_2O_3 maiores do que 5 mol% apresentam na sua estrutura principalmente a região A.

Um modelo idealizado, mostrado esquematicamente na Figura 2.21 foi apresentado por Einzinger (23) para a microestrutura dos varistores formados a partir do Bi_2O_3 . Neste modelo pode ser verificado a espessura variável para a camada intergranular localizada na fronteira dos grãos. Além disso, as barreiras de potencial responsáveis pelo comportamento elétrico não se apresentam constantes por todo o volume do varistor.

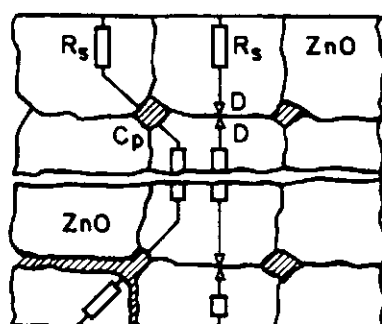


Figura 2.21- Esquema representativo do modelo idealizado para representar a microestrutura dos varistores formados a partir do Bi_2O_3 (23)

CAPÍTULO 3 -CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E DIELÉTRICAS DOS VARISTORES DE ZnO

3.1 Mecanismos de condução dos varistores

Várias teorias têm sido propostas para explicar o mecanismo através do qual se dá a condução de corrente pelos varistores de ZnO (1, 6, 27, 29-36). Com base nessas teorias, foram propostos diversos modelos para as barreiras de energia, bem como equações matemáticas para obtenção dos parâmetros necessários para descrever o comportamento dos varistores de ZnO nas suas regiões de operação. Um modelo para o mecanismo de condução deve não somente explicar fisicamente o processo de condução de corrente, como também deve ser capaz de explicar as diversas propriedades associadas aos varistores de ZnO, tais como o efeito dos aditivos sobre as propriedades, a característica "tensão x corrente" e sua dependência com a temperatura, as propriedades dielétricas, a degradação assimétrica verificada para a característica "tensão x corrente", a corrente termicamente estimulada, entre outros (29).

Existe por parte de diversos investigadores uma controvérsia quanto ao processo de condução de corrente através dos varistores. Até o presente momento, nenhuma das teorias apresentadas tem sido unanimemente aceita, existindo ainda dúvidas com relação a natureza e o controle dos aspectos microestruturais responsáveis pela formação das barreiras elétricas existentes no contorno dos grãos. O que é sabido atualmente é que o processo de condução de corrente na região de baixas tensões aplicadas é termicamente ativado, ou seja, para uma mesma intensidade de campo elétrico aplicado existirá um maior transporte de corrente quanto maior for a temperatura dos varistores. A teoria que para a maioria dos investigadores parece ser a mais consistente para explicar o mecanismo de condução de corrente para a região de baixos campos elétricos aplicados é baseada na existência das duplas barreiras de Schottky na

interface dos grãos (30). Por outro lado, uma condução de corrente significativa não ocorre até que o campo elétrico aplicado através dos varistores atinja um valor crítico, o qual corresponde ao campo elétrico de ruptura.

Não se pretende nesta seção explicar o mecanismo de condução de corrente sobre os varistores, mas sim fazer uma breve descrição dos principais modelos propostos até a presente data, baseado nos trabalhos realizados por Eda (24,29), Einzinger (23) e Mahan et alii (30). O progresso nos estudos sobre os possíveis mecanismos de condução de corrente propostos é apresentado na Tabela 3.1 abaixo (24).

Tabela 3.1 - Progresso na pesquisa sobre o mecanismo de condução de corrente através dos varistores de ZnO (24)

ANO	MODELO
1968	Invenção do varistor de ZnO (Matsuoka et alii)
1968-75	Descoberta dos principais aditivos
1970	
1971	Space Charge Limited Currente (SCLC) (Matsuoka)
1972-1974	
1975	Formação de túneis através de uma fina camada (Levinson & Philipp)
	Formação de túneis através das barreiras de Schottky (Levine)
1976	Formação de túneis através das barreiras de Schottky (Morris et alii)
1977	Formação de túneis através das barreiras de Schottky com heterojunções (Entage)
1978	Formação de túneis através das barreiras de Schottky com heterojunções (Eda)
	Formação de túneis através das homojunções (Einzinger)
1979	Formação de túneis através das barreiras de Schottky (Hower & Gupta)
	"Hole-assisted tunneling" através das barreiras de Schottky (Mahan et alii)
1980-1981	
1982	"Bypass effect" nas heterojunções (Eda)
1983	
1984	"Hole-induced breakdown" (Pike)
1985	
1986	"Bypass effect" nas heterojunções (Levinson & Philipp)
	"Hole-induced breakdown" (Blatter & Greuter)
1987	"Space-charge-induced current" (Suzuoki et alii)
1988-1993	

O primeiro modelo conhecido foi proposto por Matsuoka (1) baseado na teoria do SCLC (Space charge limited current) na região do contorno dos grãos. Esta teoria é aplicável para explicar o efeito dos aditivos sobre as propriedades não-lineares, sendo no entanto, insuficiente para explicar a pequena dependência da característica "tensão x corrente" com a temperatura na região altamente não-linear.

O segundo modelo, proposto por Levinson & Philipp (27) consiste na teoria de formação de túneis através das finas camadas localizadas nas fronteiras dos grãos. Segundo os autores, as propriedades altamente não-lineares observadas na região de tensão acima de tensão de referência dos varistores eram atribuídas ao efeito túnel (emissão de campo) nas barreiras de potencial localizadas nos grãos para a interface da camada intergranular do material de óxido metálico proposto por Fowler - Nordheim, enquanto que para a região de baixas tensões aplicadas, abaixo da tensão de referência, o mecanismo de condução de corrente era atribuído a lei de "Poole-Franquel" termicamente ativada ou a lei das barreiras de Schottky. A diferença entre os dois modelos é que a barreira de Schottky é um processo em que os elétrons ultrapassam as barreiras enquanto que no modelo de "Poole-Franquel" os elétrons passam por entre as barreiras (28). Segundo estas leis, quando um dado campo elétrico E é aplicado, a barreira de potencial da fronteira entre os grãos de ZnO é reduzida por este campo elétrico e íons térmicos elevam o nível de energia desta barreira, por onde flui a corrente.

Estas teorias são aceitáveis para explicar os resultados experimentais obtidos para a característica $V \times I$ e sua dependência com a temperatura, sendo no entanto, incompletas para explicar o efeito dos aditivos e a degradação assimétrica observada na característica $V \times I$.

Um terceiro modelo proposto consiste na teoria de formação de túneis através das barreiras de Schottky devido aos estados interfaciais. Para esta teoria, duas proposições foram apresentadas: a primeira considera as barreiras de Schottky simétricas no contorno entre os grãos de ZnO, não sendo considerada as heterojunções constituídas de ZnO e da camada intergranular rica em Bi₂O₃. Esta teoria explica razoavelmente o elevado valor do coeficiente de não-linearidade α , não explicando entretanto, a degradação assimétrica na característica $V \times I$, causada por tensões contínuas. A segunda teoria proposta para este modelo considera as heterojunções existentes (29,31).

O quarto modelo proposto foi o da formação de túneis através das barreiras de Schottky com a criação de lacunas "tunneling through homojunctions of ZnO". Esta teoria apresenta a importância dos portadores minoritários nas fronteiras dos grãos (30).

O quinto modelo, proposto por Einzinger, consiste na formação de túneis através das homojunções de ZnO. Esta teoria destaca a importância do equilíbrio térmico dos defeitos formados na fronteira dos grãos durante o resfriamento.

O sexto modelo proposto por Pike (32) e posteriormente por Blatte & Greuter (33,34) consiste na teoria do "hole-induced breakdown". De acordo com esta teoria, nas proximidades da tensão de referência pares de elétrons e lacunas são criados. Estas lacunas reunidas na interface anulam as barreiras de potencial o que conduz a um elevado aumento no fluxo de corrente. Estas lacunas são criadas pela aceleração dos elétrons na região de depleção. Este modelo, parece consistente com as propriedades altamente não-lineares, com os elevados valores para α , os efeitos dos estados interfaciais, o mecanismo de criação

de lacunas, as propriedades dinâmicas entre outros, sendo considerado atualmente como o mais consistente para explicar o mecanismo de condução na região de acentuada não-linearidade.

O sétimo modelo descrito por Eda (22), consiste no chamado "bypass effect", onde é demonstrada a função importante da camada intergranular rica em Bi_2O_3 na região de baixas correntes. Esta teoria supõe que os caminhos paralelos de corrente através das heterojunções e da camada intergranular rica em Bi_2O_3 devam ser considerados. Este modelo parece consistente com as propriedades elétricas nas regiões de baixas correntes, o efeito da camada intergranular rica em Bi_2O_3 sobre a degradação e a ação dos varistores observadas nos varistores de ZnO com grandes quantidades de Bi_2O_3 e a heterojunção do fino filme $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$.

O oitavo modelo consiste na teoria da ISCC "Induced Space Charge Current" na heterojunção.

A descrição detalhada de cada um dos modelos acima descritos pode ser encontrada nas referências indicadas por Eda (24).

3.2 Característica "tensão x corrente" dos varistores

A característica mais importante dos varistores cerâmicos à base de ZnO é a sua relação entre "tensão x corrente", a qual estabelece as propriedades não-lineares dos varistores. A característica tensão x corrente dos varistores de ZnO pode ser dividida basicamente em tres regiões distintas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

- Região de baixas tensões aplicadas medida sob aplicação de tensões alternadas e contínuas.
- Região altamente não-linear de tensões intermediárias medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra.
- Região de "Upturn" da tensão medida por impulsos de corrente 8/20 ou 4/10

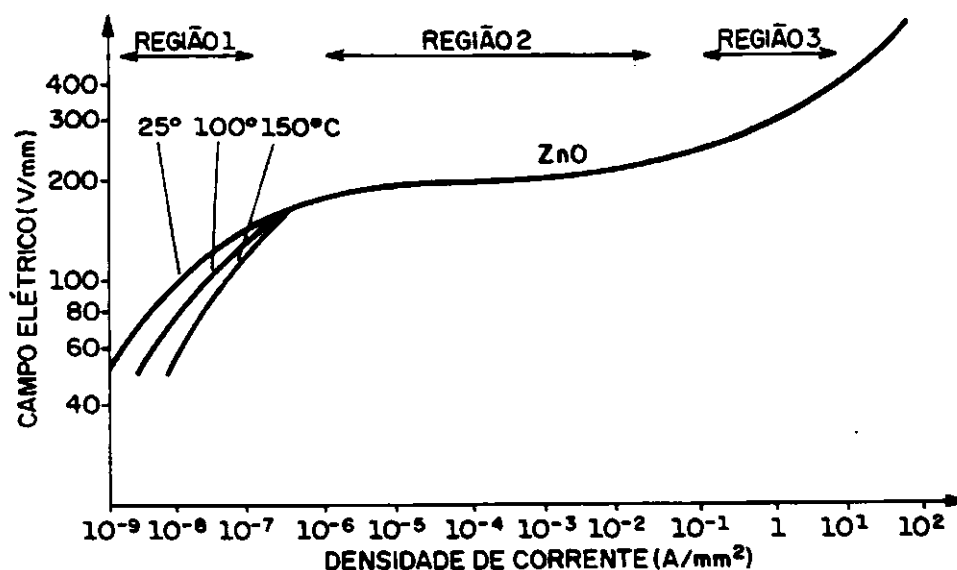


Figura 3.1 - Característica "tensão x corrente" para os os varistores de ZnO

3.2.1 - Região de baixas tensões aplicadas medida sob aplicação de tensões alternadas e contínuas.

Inicialmente, para baixas tensões aplicadas, até aproximadamente a sua tensão contínua de operação, a característica $V \times I$ dos varistores é caracterizada por um comportamento aproximadamente linear, tornando-se bastante íngreme nas proximidades da sua tensão de referência. Nesta região, as propriedades elétricas principais são

determinadas pela capacitância, pela temperatura e pelas perdas CA e CC, na região de fronteira entre os grãos. O comportamento da característica "tensão x corrente" nesta região é apresentada na Figura 3.2.

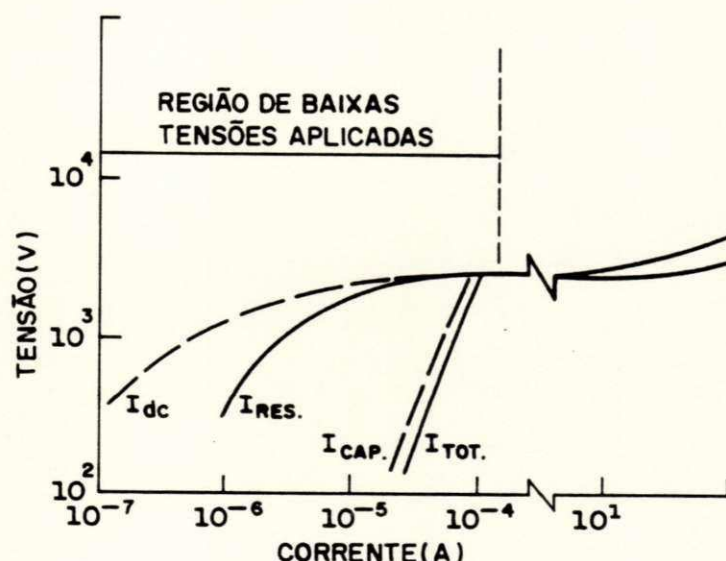


Figura 3.2 - Característica "tensão x corrente" para os varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas

Verifica-se para esta região que, quando da aplicação de uma tensão alternada de frequência industrial, circula pelos varistores uma corrente que apresenta componentes resistiva e capacitiva, sendo esta última predominante para amplitudes de tensão até próximas da tensão de referência. A componente resistiva é a responsável pelas perdas Joule através dos varistores e portanto, deve ser controlada, visto ser este um parâmetro importante para a estabilidade térmica dos varistores. De uma forma geral, os varistores comerciais apresentam nas proximidades da tensão contínua de operação, valores baixos para a corrente resistiva, sendo a sua amplitude da ordem de 10 a 40% da amplitude da corrente total(13,19).

O conhecimento da relação entre a tensão aplicada e a corrente resistiva que circula pelos varistores nesta região, é de vital importância para uma avaliação adequada da performance destes varistores. Dentre os aspectos importantes para o entendimento das propriedades dos varistores nesta região, podem ser destacados os seguintes:

a)- Uma grande dependência da corrente resistiva com a temperatura: a corrente resistiva quando da aplicação de tensão contínua bem como a componente resistiva da corrente quando da aplicação de tensão alternada de frequência industrial apresentam uma grande dependência com a temperatura, sendo esta dependência mais crítica para solicitações em tensão contínua. Para ambas as condições verifica-se que os varistores de ZnO apresentam um coeficiente de temperatura negativo para a resistência, ou seja, o aumento da temperatura dos varistores acarreta um aumento na corrente que circula pelos mesmos. A dependência da corrente com a temperatura tem sido amplamente investigada. Um dos primeiros estudos conhecidos apresentando uma análise da variação da resistividade elétrica dos varistores com a temperatura foi apresentado por Matsuoka (1). Com base nestes estudos, Matsuoka mostrou que a variação da resistividade elétrica dos varistores com a temperatura obedece uma relação exponencial descrita por:

$$\rho_{ci} = \rho_0 \cdot \exp(q\phi/KT) \quad (3.1)$$

onde: ρ_{ci} é a resistividade da fronteira entre os grãos
em $\Omega.cm$

ρ_0 é uma constante

ϕ é a altura da barreira de potencial em eV

q é a carga do elétron em Coulomb

K é a constante de Boltzman

T é a temperatura do varistor em graus Kelvin

Uma redução na faixa da região de não-linearidade da corrente com o aumento da temperatura também foi observada por Matsuoka, evidenciando uma redução na resistividade elétrica na região de baixas correntes com o aumento da temperatura. Para temperaturas de aproximadamente 900°C e acima, a região não-linear não pôde ser observada por Matsuoka. O efeito da temperatura sobre o coeficiente de não-linearidade dos varistores também foi investigado, onde foi verificado que o valor de a diminui com o aumento da temperatura.

O efeito da temperatura sobre as componentes capacitiva e resistiva CA e corrente CC, na região de baixas tensões, é apresentado na Figura 3.3.

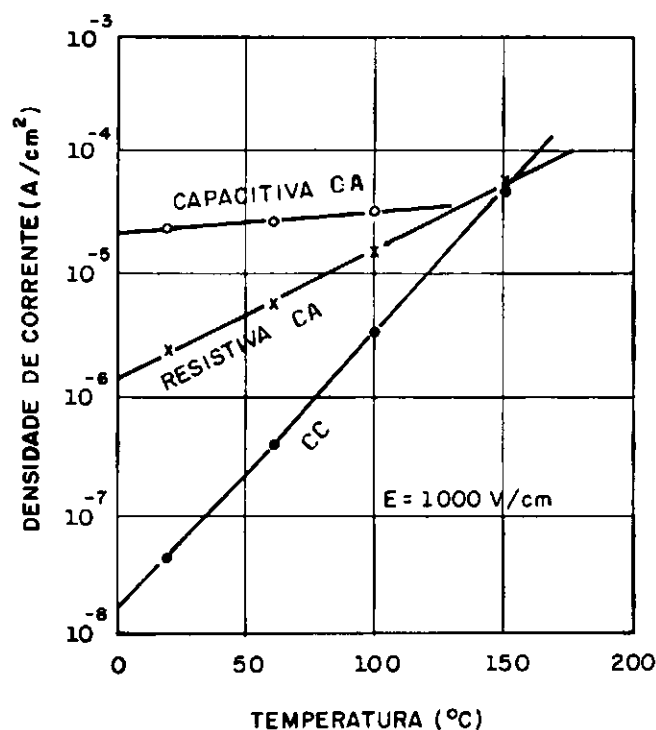


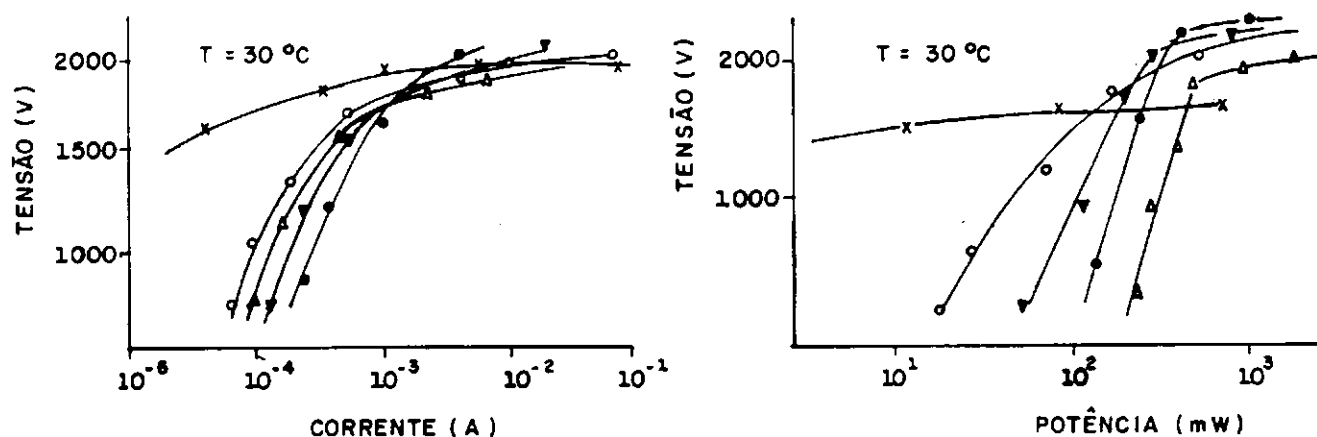
Figura 3.3 - Efeito da temperatura sobre a corrente CC e as componentes resistiva e capacitiva CA

A dependência da corrente com a temperatura indica que nesta região o transporte de corrente nas fronteiras dos grãos de ZnO se dá pelo processo de ativação térmica.

b)- Para uma mesma intensidade de campo elétrico, a componente resistiva da corrente em CA é maior do que a corrente resistiva CC, acarretando em maiores perdas para os varistores quando da aplicação de tensões alternadas. Para baixas amplitudes de tensão, nas proximidades da tensão contínua de operação dos varistores, verifica-se que a componente resistiva da corrente CA é aproximadamente dez vezes maior do que a corrente CC.

Várias publicações tem reportado o efeito das diferentes solicitações de tensão e da frequência sobre a corrente total, sua componente resistiva e a potência (37-42). Liang Yu-Jin et alii (37) investigaram o efeito das diferentes solicitações de tensão sobre a corrente resistiva e a potência. Para tal, medições da corrente resistiva e da potência foram realizadas para diferentes solicitações de tensão que aparecem nos sistemas HVDC bem como para solicitação de tensão alternada a 50 Hz. Os resultados obtidos destes experimentos são apresentados nas Figuras 3.4a e 3.4b. A partir das Figuras, os autores interpretaram os resultados obtidos considerando duas regiões distintas: a região de baixas tensões aplicadas, onde a amplitude da tensão de ensaio encontra-se abaixo da tensão de referência do varistor, e a região de não-linearidade, na qual a tensão aplicada excede a tensão de referência. Na região de baixas tensões aplicadas as amplitudes das correntes CC puras e suas respectivas potências, são menores do que as amplitudes obtidas para aplicações de tensão alternada a 50 Hz, enquanto que os valores apresentados para esta solicitação são menores do que os obtidos para as demais solicitações de tensão CC superpostas com harmônicos. Liang Yu-Jin et alii (37)

constataram, a partir da decomposição das formas de onda obtidas a partir dos ensaios em série de Fourier, uma relação dos valores de corrente e potência obtidos para as diferentes formas de onda com a magnitude dos harmônicos de ordem elevada.



- X - Tensão CC pura
- o - Tensão CA 50 Hz
- Δ - Tensão na barra CC ($\alpha = 90^{\circ}$)
- ∇ - Tensão nos terminais das válvulas ($\alpha = 19^{\circ}$ e $k=1,112$)
- \bullet - Tensão nos terminais das válvulas ($\alpha = 90^{\circ}$ e $k=1,253$)

Figura 3.4 - a) Característica V x I dos varistores de ZnO

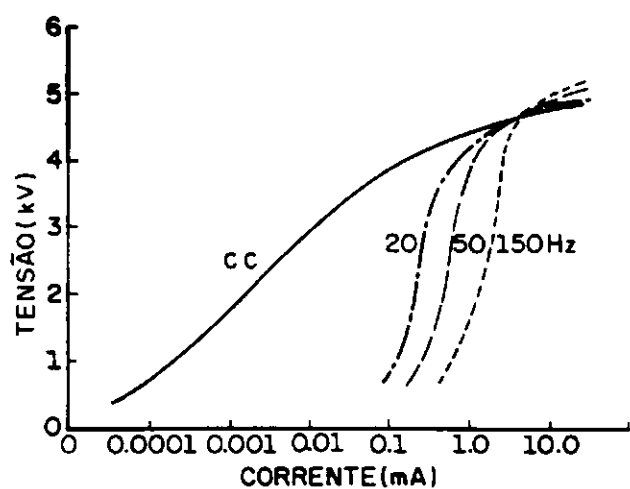
b) Perdas nos varistores de ZnO sob aplicação de diferentes solicitações de tensão (37)

Liang Yu-Jin et alii (37) e Zheng (38) mostraram que as perdas nos varistores são devidas a uma combinação

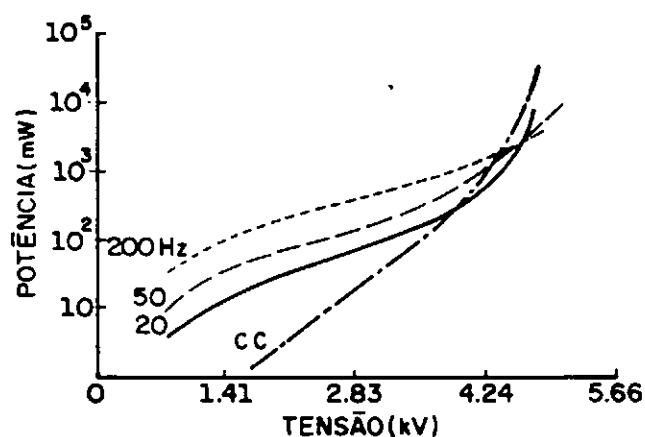
de duas componentes: as perdas por condução e por polarização, esta última nula para aplicações de tensão CC. O efeito de polarização é dominante na região de baixas tensões aplicadas aumentando, para esta região, com o aumento da frequência, fato que explica baixas amplitudes de corrente para tensões CC puras, comparados com as amplitudes das correntes para solicitações de tensões alternada e contínua superpostas com harmônicos, para uma mesma condição de amplitude de tensão e temperatura. Da mesma forma, os componentes de alta frequência constituem-se num fator importante para os valores de potência dissipada. Maiores valores de corrente e potência obtidos para tensões superpostas com harmônicos em relação a tensão alternada, pode ser explicado pelo fato do aumento da magnitude dos harmônicos elevados provocar uma elevação na corrente de polarização.

Com o aumento da amplitude da tensão para níveis acima da tensão de referência dos varistores, verifica-se que devido a acentuada não-linearidade dos varistores a corrente de condução, inicialmente de baixa amplitude se eleva drasticamente, prevalecendo sobre a corrente de polarização. Por outro lado, a componente de perdas devido ao efeito de condução do varistor apresenta uma maior dependência com a temperatura, quando comparada com a componente de perdas devido a polarização. Isto explica uma maior variação da corrente e potência com a temperatura, quando da aplicação de tensões contínuas.

Haddad et alii (39) e Horiuchi et alii (40), investigaram o comportamento das características "tensão x corrente total" e "tensão x potência", para diferentes frequências. Os resultados obtidos por Haddad et alii (39), para um determinado tipo de varistor, são apresentados nas Figuras 3.5a e 3.5b, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3.5 - Efeito da tensão e da frequência sobre (a) a corrente total (b) e a potência (39)

Verifica-se pelas Figuras que para amplitudes de tensão de até aproximadamente 4,7 kV_{crista} (tensão de referência do varistor), para uma mesma amplitude de tensão a corrente que circula pelo varistor e a potência consumida aumentam com o aumento da frequência. Após este nível de tensão ser alcançado verifica-se uma diminuição dos parâmetros com o aumento da frequência.

Uma melhor observação do fenômeno acima descrito pode ser obtida a partir das Figuras 3.6a e 3.6b, que apresentam os efeitos da frequência e da tensão aplicada sobre a corrente total e potência, respectivamente.

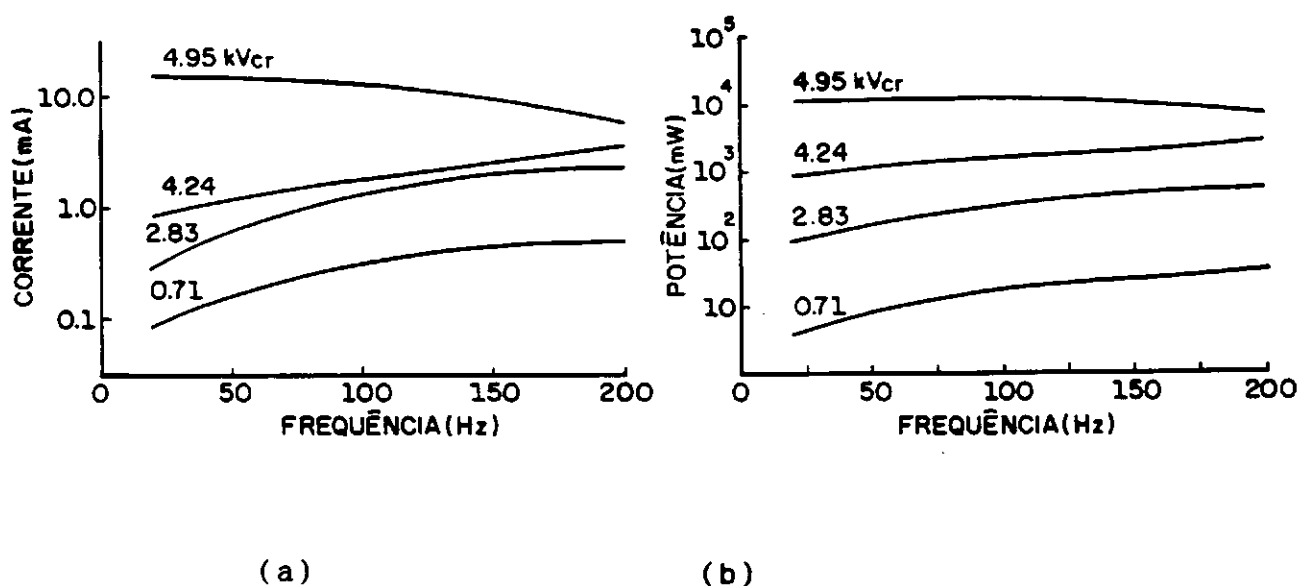


Figura 3.6 - Efeito da frequência sobre (a) a corrente total (b) e a potência, para diferentes níveis de tensão aplicada (39)

Para baixas tensões aplicadas, a corrente e a potência, como anteriormente descrito aumentam significativamente com o aumento da frequência. Para tensões próximas a nominal do varistor observa-se um menor aumento destes parâmetros com a frequência, enquanto que para tensões acima da nominal observa-se o processo inverso, ou seja, a corrente e a potência diminuem com o aumento da frequência.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.4 a 3.6 estão consistentes com as teorias apresentadas por Liang Yu-Jin et alii (37) e Zheng (38).

c)- existe uma predominância da componente capacitiva da corrente para níveis de tensão até próximos à tensão de referência dos varistores, com uma pequena dependência da temperatura, quando da aplicação de tensão alternada de frequência industrial. Esta componente capacitiva da corrente é maior em relação a componente resistiva para menores intensidades de campo elétrico e menores temperaturas sobre o varistor.

A ordem das amplitudes das correntes para uma mesma solicitação de tensão, associadas a um campo elétrico é apresentada abaixo:

$$I_{r_{DC}(+)} < I_{r_{DC}(-)} < I_{r_{AC}} < I_{C_{AC}} < I_{t_{AC}}$$

d)- a componente resistiva da corrente, quando da aplicação de tensão alternada de frequência industrial e a corrente resistiva CC tendem a aumentar com o tempo, quando uma tensão é aplicada continuamente sobre os varistores ou podem aumentar abruptamente, após surtos de altas correntes. Estudos realizados com aplicação de tensões alternadas e contínuas por um longo período de tempo, sem solicitações de impulso, têm demonstrado que o aumento temporal da corrente resistiva é proporcional a raiz quadrada do tempo. Maiores detalhes sobre a variação da componente resistiva da corrente CA com o tempo podem ser obtidas na referência (43).

Conforme descrito anteriormente, um dos aspectos de maior interesse no estudo dos varistores de ZnO nesta região é entender como a resistividade da região da fronteira entre os grãos varia em função do tipo de solicitação de tensão e temperatura. Os primeiros estudos sobre as propriedades elétricas dos varistores na região de baixas tensões aplicadas atribuíam ao mecanismo de Poole-

Frenquel, ou as barreiras de Schottky, como o mais provável mecanismo de condução de corrente nesta região, no qual a região de fronteira entre os grãos é a responsável por este comportamento (27). Quando um dado campo elétrico E é aplicado, a barreira de potencial da fronteira entre os grãos de ZnO é reduzida pelo campo elétrico e íons térmicos elevam o nível de energia desta barreira, por onde flui a corrente.

Com base nestas teorias, a relação $J - E$ existente entre a densidade de corrente e a intensidade de campo elétrico pode ser expressa para a região de baixas tensões aplicadas pela seguinte relação:

$$J = J_0 \cdot \exp(-(\phi - \beta \cdot E^{0,5})/K \cdot T) \quad (3.2),$$

J_0 , que tem dimensões de densidade de corrente é associado a relação $A^* \cdot T^2$, onde A^* é a constante efetiva de Richardson e T é a temperatura do varistor em graus Kelvin. Na equação 3.2 ϕ representa a altura da barreira de potencial, E é o campo elétrico aplicado e β uma grandeza dada por:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{nX}} \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}} \quad (3.3)$$

Em que n é o número de grãos por unidade de comprimento, X é a largura da camada de depleção, q , ϵ_0 e ϵ_r são respectivamente, a carga do elétron, e constantes dielétricas do vácuo e dos grãos de ZnO dopados, e K é a constante de Boltzman ($K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K). A expressão (3.2), representa um processo de emissão termoiônica de elétrons sobre uma barreira de potencial ϕ , quando da presença de um campo elétrico externo. Com base nesta equação, a altura ϕ e a largura X da barreira de potencial,

podem ser obtidas a partir das curvas da densidade de corrente em função da temperatura ($\ln J \times 1/T$) e da densidade de corrente em função da raiz quadrada do campo elétrico ($\ln J \times \sqrt{E}$), respectivamente.

A camada de depleção que forma as barreiras de potencial de altura ϕ adjacente a interface entre os grãos é composta de espécies de doadores iônicos positivos, com a interface sendo uma camada de "aprisionamento" para os portadores livres removidos da região de depleção. A magnitude da altura destas barreiras é determinada pela densidade de portadores de carga (N_d) na camada de depleção e pela densidade de estados interfaciais (N_s).

Estudos posteriores sobre as propriedades físicas e elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas, apresentaram algumas inconsistências com a teoria acima descrita, entre as quais a degradação assimétrica verificada na característica "tensão x corrente" após aplicação de tensão contínua ou de impulsos de corrente. Estudos das propriedades dielétricas mostraram que quando da aplicação de baixas tensões alternadas, a capacitância do varistor por fronteira de grão pode ser expressa pela relação $1/C^2 \approx (\phi + V)$, onde V é a tensão aplicada por contorno de grão. Com base nestas observações, o diagrama de bandas de energia, no equilíbrio, para o contato entre os grãos, pode ser associado a uma dupla barreira de Schottky, com uma camada de depleção de largura X , estendendo-se de cada lado do contorno. Uma descrição detalhada do modelo das duplas barreiras de Schottky, foi apresentada por Mahan et alii (30).

Hower & Gupta (35), considerando a existência das duplas barreiras de Schottky, apresentaram relações entre a densidade de corrente e o campo elétrico, para os dois lados do contorno, dadas por:

$$J = J_0 \cdot \exp(-q\phi_r/KT) \cdot [1 - \exp(-qV_r/KT)] \quad (3.4),$$

para o lado direito do contorno entre os grãos e

$$J = J_0 \cdot \exp(-q\phi_s/KT) [1 - \exp(-qV_s/KT)] \quad (3.5),$$

para o lado esquerdo do contorno.

V_r e V_s representam a tensão por grão no lado direito e no esquerdo da camada de depleção, respectivamente. Os demais parâmetros são idênticos aos apresentados na seção anterior.

Mahan et alii (30), estabeleceram equações para V_r e V_s , dadas por:

$$\begin{aligned} V_r &= \phi_0 \cdot (1 + V_g/4\phi_0)^2 \\ V_s &= \phi_0 \cdot (1 - V_g/4\phi_0)^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

onde ϕ_0 é a energia de ativação a zero volts ($V=0$) e V_g é a tensão por grão, podendo ser representada por:

$$V_g = V_r - V_s.$$

Em termos práticos, V_g pode ser determinada a partir da relação entre o valor de crista da tensão aplicada (V_{CA}) e o número de grãos (N_g) existentes no varistor. O número de grãos pode ser estimado pela relação entre a espessura do varistor (h) e o diâmetro médio dos grãos.

Uma vez que na região de interesse $V_r > V_s$, Hower & Gupta (35), desprezando o efeito do lado esquerdo do contorno, apresentaram uma equação para descrever aproximadamente a relação entre a densidade de corrente (J) e o campo elétrico (E), dada por:

$$J = J_0 \cdot \exp(-q\phi/KT) [1 - \exp(qV_g/KT)] \quad (3.7)$$

Para $V_g > 3KT/q$, a parcela $1 - \exp(qV_g/KT)$ tende para a unidade. Portanto, a equação (3.7) pode ser reescrita por:

$$J = J_0 \cdot \exp(-q\phi/KT) \quad (3.8)$$

A equação (3.8) acima descrita, apresenta uma dependência exponencial da densidade da componente resistiva da corrente com a temperatura, previamente identificada por Matsuoka. Equações mais exatas para descrever a relação entre J e E na região de baixas tensões aplicadas foram apresentadas por Mahan et alli (30) e Greuter et alli (36).

3.2.2 - Região altamente não-linear de tensões intermediárias medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra.

Uma condução de corrente significativa não ocorre pelos varistores até que o campo elétrico aplicado sobre estes atinja um valor crítico, denominado de campo elétrico de ruptura. Com base em diversas referências pode-se verificar que a tensão de ruptura, associada a este campo elétrico, nas fronteiras dos grãos está compreendida na faixa entre 2 a 3,5 V/barreira, sendo proporcional ao número de junções de grãos existentes no interior da microestrutura, ou seja, é proporcional ao inverso do tamanho dos grãos de ZnO. Por exemplo, para um tamanho médio dos grãos compreendido entre 10 a 20 μm , o campo elétrico de ruptura do varistor para densidades de corrente na faixa de 10^{-6} A/mm² é estimada na faixa de 100 até 350 V/mm. A tensão de ruptura associada a este campo elétrico de ruptura, também denominada de tensão de referência, pode ser variada através do controle do crescimento dos grãos de ZnO durante o estágio de sinterização, conforme apresentado

em 2.2. Por exemplo, com a inibição do aumento dos grãos existirão um maior número de junções no interior do volume do varistor, aumentando a sua tensão de referência.

A partir da tensão de referência do varistor observa-se, sobre uma larga faixa de densidade de corrente, a segunda região da característica $V \times I$ caracterizada por uma propriedade de condução altamente não-linear. Esta região define o nível de proteção dos pára-raios, quando correntes de impulso atmosférico ou de manobra fluem pelo mesmo. Quanto maior o valor de α , melhores serão as características de proteção.

Para o correto funcionamento dos varistores de ZnO nesta região é importante que todos os caminhos de corrente apresentem um mesmo número de barreiras, pois caso contrário, a queda de tensão de um caminho para o outro pode ser diferente, acarretando em uma distribuição não uniforme de corrente. A presença de qualquer inomogeneidade do material provoca uma distribuição não-uniforme de corrente e, como consequência, um aquecimento localizado que pode conduzir a perfuração do elemento varistor, quando da ocorrência de surtos.

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

a)- Um elevado coeficiente de não-linearidade verificado na característica "tensão x corrente" (α compreendido entre 20 e 50, ou mais);

b)- A corrente que circula pelos elementos de ZnO tem nesta região uma característica predominantemente resistiva;

c)- Uma dependência não significativa da corrente com a temperatura.

Conforme mencionado em 1.2, frequentemente a relação não-linear entre a tensão e a corrente, nesta região, tem sido representada pela equação abaixo:

$$V = k.I^{1/\alpha} \quad (3.9) ,$$

onde V representa a queda de tensão resistiva (V), I a corrente que circula pelos elementos (A), α é o coeficiente de não-linearidade e K é uma constante característica do varistor. Levinson & Philipp (27) constataram a partir de resultados obtidos experimentalmente a existência de diferentes valores de α ao longo da característica $V \times I$. Portanto, para a validade da equação acima, torna-se necessário considerar diferentes valores de K e α para as diferentes faixas de corrente. Lat (44) a partir da curva característica $V \times I$ de um determinado varistor, obteve as constantes K e α em função da amplitude da corrente, conforme observado na Figura 3.7 (44).

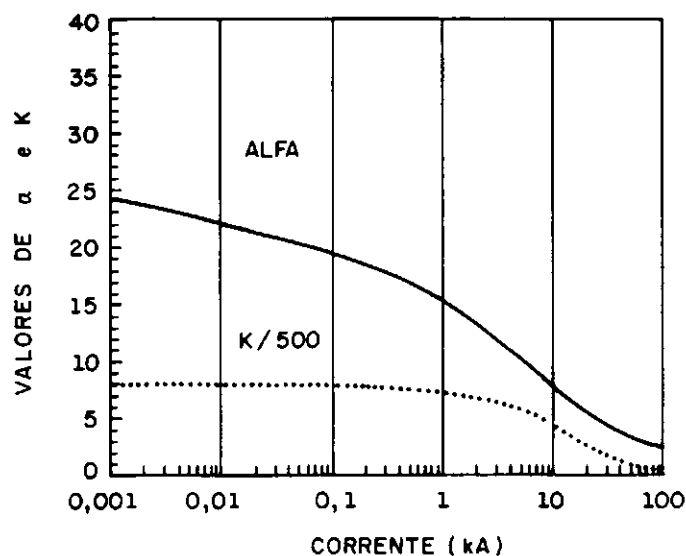


Figura 3.7 - Determinação das constantes K e α em função da amplitude da corrente, para um dado varistor

Os parâmetros foram determinados experimentalmente para um determinado tipo de varistor, não podendo portanto serem utilizados indiscriminadamente para qualquer tipo de varistor.

3.2.3 - Região de "Upturn" da tensão medida por impulsos de corrente 8/20 ou 4/10

A característica $V \times I$ dos varistores na região de altas correntes apresenta uma elevação drástica "upturn" da tensão. Pela Figura 3.1, verifica-se que até uma certa faixa de corrente, a variação da tensão com a corrente apresenta-se de forma proporcional. No entanto, este comportamento deixa de ser observado a medida que se aumenta a corrente. Esta variação deve-se a uma queda de tensão não desprezível através dos grãos de ZnO, devido a circulação de correntes elevadas. Este fenômeno, portanto, não é uma propriedade do mecanismo de condução, mas sim associado a queda de tensão através da resistência própria finita dos grãos de ZnO. Inicia-se, portanto, a predominância da resistência dos grãos de ZnO sobre a camada intergranular. O comportamento ôhmico é definido pela resistividade intrínseca dos grãos de ZnO ($\rho = 1$ a $10 \Omega \cdot \text{cm}$).

O coeficiente de não-linearidade a desta terceira região é menor quando comparado a região altamente não-linear. Isto deve-se a queda de tensão nos grãos de ZnO.

A exatidão da equação (3.9) pode ser significativamente melhorada pela adição do termo $R_g \cdot I$, sendo R_g a resistência dos grãos de ZnO. Desta forma, a equação (3.9) torna-se:

$$V = K \cdot I^{1/a} + R_g I \quad (3.10)$$

No limite da região de altas correntes, a queda de tensão através da camada intergranular torna-se desprezível, com o varistor apresentando um comportamento ôhmico. Neste caso, a relação entre a tensão e a corrente é aproximadamente dada por:

$$V = R_g \cdot I \quad (3.11)$$

Dois fenômenos importantes têm merecido a atenção nos estudos das propriedades dos varistores na região de médias e altas correntes: a dependência da amplitude da tensão residual com o tempo de frente do impulso de corrente (4,5,26,45) e a pequena dependência da temperatura nestas regiões(11,13,46,47).

Quando os varistores são submetidos a aplicação de impulsos de corrente íngremes verifica-se a existência de um "overshoot" sobre a forma de impulso da tensão residual. Entende-se por tensão residual dos varistores, a tensão que aparece entre os terminais destes quando da passagem de uma corrente de descarga com determinada forma e amplitude. Uma curva típica deste efeito é apresentada na Figura 3.8.

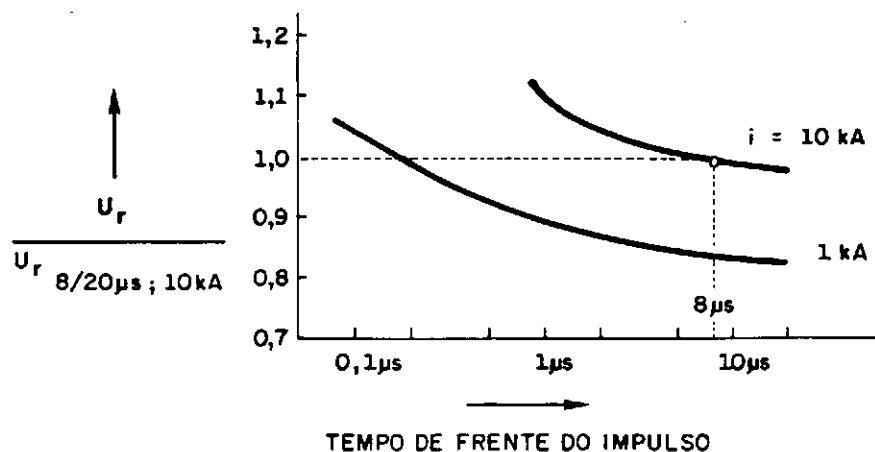


Figura 3.8 - Variação da tensão residual com o tempo de frente da corrente de impulso (45)

Verifica-se da Figura 3.8, que para tempos de frente muito rápidos, por exemplo 100 ns, ocorre uma elevação na amplitude da tensão para uma dada corrente ("overshoot"). Este "overshoot" diminui com o aumento do tempo de crista do impulso de corrente, atingindo valores inferiores a 10% para tempos de crista da ordem de 3 microsegundos.

Outro fenômeno importante nestas regiões é a pequena dependência da corrente com a temperatura. Verifica-se nestas regiões um pequeno coeficiente positivo para a temperatura, ou seja, existe um pequeno aumento da tensão residual com o aumento da temperatura. A dependência da corrente com a temperatura nas regiões de médias e altas correntes é mostrada na Figura 3.9.

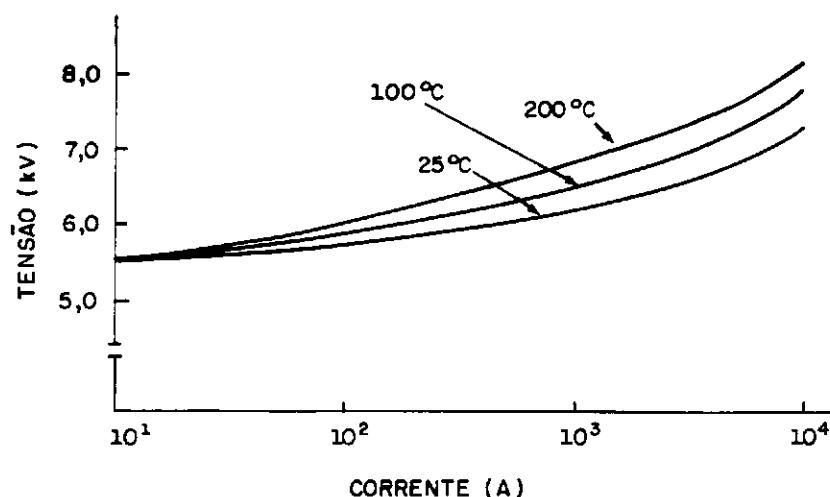


Figura 3.9 - Efeito da temperatura sobre a tensão residual dos varistores para a região de altas correntes (46)

Verifica-se através da Figura 3.9 que a tensão residual para 10 kA, forma 8/20 μ s, a 200°C, é levemente

superior a tensão residual para as mesmas características acima, porém medida a temperatura ambiente.

Ritcher (47) realizou um estudo detalhado para verificar o efeito da temperatura sobre a tensão residual. Valores de tensão residual medidos para uma corrente de descarga nominal de 10 kA, com forma 8/20 μ s, a uma temperatura de 60°C apresentaram um aumento compreendido entre 0,8 a 2% em relação às mesmas medições à temperatura ambiente. Valores medidos a 100°C, apresentaram um aumento compreendido entre 1,1 a 3,5%, em relação à temperatura ambiente.

3.3 Propriedades dielétricas dos varistores de ZnO

As propriedades dielétricas dos varistores de ZnO apresentam uma dependência com a frequência, tensão aplicada e temperatura.

A teoria dos dielétricos é bem desenvolvida para estudar as propriedades dielétricas de sistemas lineares, não sendo aplicáveis a sistemas não-lineares, tais como os varistores de ZnO. No entanto, conforme apresentado em 3.2.1, os varistores de ZnO apresentam um comportamento aproximadamente linear quando aplicados na região de baixas tensões, bem abaixo da tensão de referência. A partir desta aproximação, a análise da resposta a frequência e os mecanismos de perdas dielétricas dos varistores têm sido avaliados e estudados a partir da teoria da resposta linear.

Um dos primeiros estudos sobre as propriedades dielétricas dos varistores foi realizado por Matsuoka (1), para varistores de baixa tensão. A capacitância foi medida através de uma ponte Schering, para uma tensão aplicada de 1 V_{ef} , a uma frequência de 1 kHz. Neste estudo, Matsuoka desenvolveu equações para determinação da capacitância e da

resistência dos grãos de ZnO, a partir da microestrutura idealizada, apresentada na Figura 2.16b, seção 2.4. Segundo Matsuoka, a capacitância dos varistores era constante e função da constante dielétrica e da espessura da camada intergranular, do tamanho dos grãos de ZnO e da área e altura dos varistores.

Levinson & Philipp (27) observaram o efeito da temperatura e da frequência sobre a constante dielétrica, através de medições realizadas com uma ponte de capacitância para tensões CA de $1 V_{ef}$. Neste estudo foi verificado uma diminuição da constante dielétrica com o aumento da frequência. Com relação a temperatura, os autores observaram que para uma mesma frequência, a constante dielétrica aumenta com o aumento da temperatura. Os valores elevados obtidos para a constante dielétrica dos varistores ensaiados, foram atribuídos, segundo os autores, ao fato da verdadeira espessura dielétrica da camada intergranular ser muito pequena quando comparada com a espessura física.

Posteriormente, Levinson e Philipp realizaram dois estudos sobre as propriedades dielétricas, com base no circuito equivalente apresentado na Figura 4.1, seção 4.1. No primeiro (48), estudos experimentais foram realizados para avaliar a resposta CA dos varistores de ZnO, a partir da teoria da resposta linear, para faixas de frequências de 30 Hz a 10^8 Hz e temperaturas na faixa de -200 a 300°C . A dependência da frequência e da temperatura sobre a constante dielétrica e tangente de perdas foi verificada pelos autores, onde foi observado que a constante dielétrica decresce com o aumento da frequência, até aproximadamente 10^6 Hz. Uma redução drástica foi observada para a faixa de frequência de 10^5 a 10^6 Hz, a partir da qual a constante dielétrica mantém-se praticamente invariável. Já com relação a resistividade paralela, foi verificado que esta decresce continuamente com o aumento da

frequência. Em uma primeira aproximação, a resistência da região da fronteira entre os grãos (R_{CI}) é aproximadamente proporcional ao inverso da frequência, ou seja, $R_{CI} \sim 1/f$. A tangente de perdas apresentou uma característica peculiar, decrescendo inicialmente com o aumento da frequência a um mínimo entre 1-10 kHz, aumentando posteriormente com o aumento da frequência até aproximadamente 300 kHz, diminuindo novamente para maiores frequências. A resistividade paralela em função da frequência apresentou uma variação significativa com a temperatura, diminuindo de valor para uma mesma frequência com o aumento da temperatura até aproximadamente $2 \cdot 10^4$ Hz, a partir da qual verificou-se uma tendência de uma maior resistividade paralela para maiores temperaturas a uma mesma frequência. O efeito da frequência sobre a constante dielétrica e a tangente de perdas para um dado tipo de varistor é apresentado na Figura 3.10, enquanto que os efeitos da frequência e da temperatura sobre a resistividade paralela para outro tipo de varistor são apresentados na Figura 3.11.

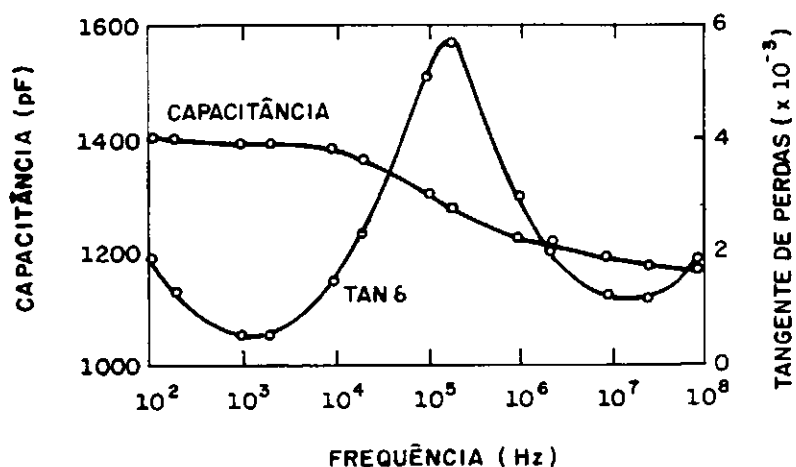


Figura 3.10- Efeito da frequência sobre a constante dielétrica e a tangente de perdas (29)

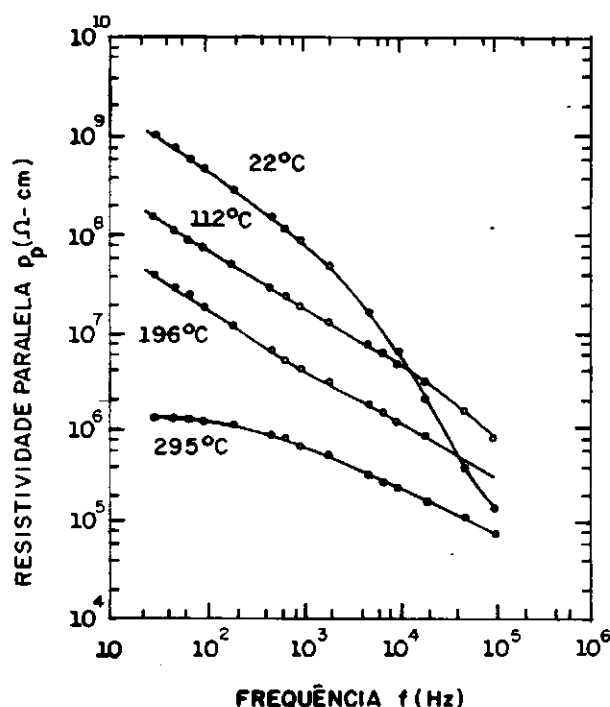


Figura 3.11- Efeito da frequência e da temperatura sobre resistividade paralela (48)

No segundo estudo (49), as propriedades dielétricas e a resistividade dos varistores foram avaliadas para a região de frequência compreendida entre 10^6 Hz a $2 \cdot 10^9$ Hz. Ensaio foram realizados utilizando-se os circuitos paralelo e série, de forma a representar o efeito da frequência sobre a camada intergranular e a resistividade dos grãos. Os autores constataram a partir dos estudos que a resistividade paralela, representativa da camada intergranular, é um parâmetro fortemente dependente da frequência, reduzindo drasticamente o seu valor para a região de altas frequências. Foi verificado que para baixas frequências há uma predominância da resistência da camada intergranular sobre a resistência dos grãos de ZnO, $R_{CI} \gg R_{ZnO}$. Por outro lado, na região de altas frequências $f > 10^8$ Hz, $R_{CI} \ll R_{ZnO}$, e o efeito da resistividade da camada

intergranular (R_{CI}) torna-se desprezível, sendo a parte real da impedância do varistor determinada pela resistividade dos grãos de ZnO (R_{ZnO}).

Diversos outros estudos foram realizados para verificar a dependência da frequência e da temperatura sobre as propriedades dielétricas (10,11,15-17,22,25,50). Todos os trabalhos apresentaram uma concordância com os resultados obtidos por Philipp e Levinson. Verifica-se uma redução na capacitância com o aumento da frequência até uma frequência crítica, da ordem de 3×10^5 Hz, a partir da qual a capacitância varia bruscamente. Com relação a tangente de perdas, verifica-se a existência de pontos de mínimo e de máximo, relacionados provavelmente ao fenômeno de dispersão do dielétrico. Os estudos de efeito da frequência sobre as propriedades dielétricas apresentaram um pico para a frequência na faixa de 100 kHz. Este pico foi apresentado como independente da composição dos aditivos e sensível à temperatura.

Um ponto importante de observação com relação as propriedades dielétricas é o elevado valor da constante dielétrica dos varistores (1000-2000), quando comparados à constante dielétrica de cada elemento que participa da composição do varistor (~ 10).

Conforme apresentado em 2.3, a composição dos aditivos para a formação dos varistores têm uma grande influência sobre as propriedades dielétricas. Matsuura & Yamaoki (50), verificaram a influência dos aditivos sobre a capacitância e tangente de perdas. Medições de capacitância e tangente de perdas para amostras de diferentes composições foram realizadas para frequências na faixa de 60 a 5×10^8 Hz. Os valores obtidos para a capacitância em função da frequência, mostraram uma dependência da capacitância com os aditivos utilizados na composição do varistor. Com relação a tangente de perdas, os autores

constatarem para a faixa de frequência estudada, a existência de dois pontos de mínimo e um de máximo. O primeiro ponto de mínimo, observado na região de baixas frequências, depende dos aditivos utilizados na composição do varistor, enquanto que o ponto de mínimo correspondente a região de altas frequências, independe da composição do varistor. O valor de máximo obtido para a tangente de perdas é afetado pela composição. No entanto, verificou-se que a frequência correspondente a este ponto de máximo praticamente independe da composição do varistor. Brushman (25), verificou o efeito da concentração de Bi_2O_3 e da temperatura de sinterização sobre a constante dielétrica e a tangente de perdas, em função da frequência. Levinson & Philipp (10) investigaram o efeito da concentração de aditivos para varistores formados a partir do Bi_2O_3 e do Pr_6O_{11} .

Um dos primeiros trabalhos relativo ao estudo das propriedades dielétricas considerando níveis de tensão mais elevados para os varistores foi apresentado por Eda (29). Neste estudo, a dependência da capacitância com a tensão foi verificada para uma frequência de 1 kHz, para uma faixa de tensão de 0 a 100 V. A tensão de referência dos varistores utilizados neste estudo era próxima de 200 V. A dependência da capacitância (C) com a tensão aplicada (V) foi analisada através da curva $1/C^2 \times V$, onde verificou-se até a faixa de tensão estudada, um aumento proporcional do inverso do quadrado da capacitância com a tensão aplicada.

A capacitância dos varistores de ZnO é atribuída a barreira de Schottky na fronteira entre os grãos e a fase intergranular rica em Bi_2O_3 . A capacitância devido a fase rica em Bi_2O_3 é supostamente independente da tensão aplicada. Por outro lado, a capacitância da barreira de Schottky apresenta uma grande dependência com a tensão aplicada. Isto pode ser verificado através da curva da

tensão aplicada contra o inverso do quadrado da capacitância. A análise desta curva sugere que o aumento da tensão provoca uma deformação das barreiras de Schottky.

Elli et alii (51) investigaram a influência da capacitância e da tangente de perdas com a frequência, tensão e temperatura. Com relação a tensão, os autores constataram uma redução da capacitância e aumento da tangente de perdas com o aumento da tensão aplicada. Com relação a temperatura, verifica-se um aumento de ambas as propriedades com o aumento da temperatura, para uma mesma tensão aplicada. Com relação a frequência, os autores observaram uma pequena redução da capacitância com o aumento da frequência, para frequências maiores do que 10^3 Hz.

3.4 Estabilidade térmica e degradação

Os processos de degradação e de estabilidade térmica de longa duração dos varistores utilizados em pára-raios de ZnO têm sido exaustivamente investigados (3,11-13,15,16,43,52), sendo o entendimento destes fenômenos de fundamental importância para a produção e aplicação adequada dos pára-raios. A importância do estudo da estabilidade térmica dos varistores de ZnO resulta do fato de que estes são continuamente solicitados por tensões CA ou CC. Com relação aos estudos de degradação dos varistores muitos mecanismos tem sido propostos para explicar o fenômeno, entre os quais podem ser citados o de armadilhas de elétrons, migração de íons e perda de oxigênio (24,28).

Sabe-se que o processo de degradação dos varistores é uma função combinada da tensão aplicada e da corrente com a temperatura e afeta somente a região de baixas tensões aplicadas, e pode ser diminuído através de tratamento

térmico das amostras (28). Um dos fenômenos importantes observados na degradação dos varistores de ZnO é a assimetria da característica "tensão x corrente", quando da solicitação permanente de tensão contínua ou aplicação de vários impulsos de mesma polaridade. A assimetria devido a impulsos de corrente esta relacionada com a polarização, sendo verificada somente em varistores formados pelo sistema ZnO-Bi₂O₃ (22). A alteração da característica "tensão x corrente" na região de baixas tensões aplicadas, quando da aplicação de tensão contínua, provoca uma alteração nas propriedades dielétricas. Um aumento dos valores da tangente de perdas na região de baixas frequências é característico.

Sob o ponto de vista elétrico, o estudo do fenômeno de degradação nos varistores de ZnO têm sido reportado em diversas literaturas em três diferentes condições:

1 - degradação devido a impulsos de corrente de elevada amplitude ou de correntes de longa duração associados a altas energias.

2 - aumento da potência dissipada quando da solicitação permanente por tensões alternadas ou contínuas após a aplicação de impulsos de corrente de elevada amplitude ou de longa duração.

3 - aumento da potência com o tempo quando continuamente solicitado por tensões alternada ou contínua.

No primeiro caso a degradação leva a destruição dos varistores e pode ocorrer sob duas formas distintas, pela ruptura dos varistores causada por impulsos de corrente de alta intensidade e curta duração ou pela perfuração causada por impulsos de corrente de menor intensidade, porém de

longa duração (52). A destruição por ruptura é atribuída a gradientes de temperatura gerados por impulsos de corrente de elevada amplitude, gradientes estes responsáveis pelas tensões térmicas no varistor devido a expansão térmica diferencial. A destruição dos varistores por perfuração está relacionada com a distribuição não uniforme de densidades de corrente ao longo da seção do varistor. Desta forma, quando da circulação de correntes de impulso haverá uma determinada área com uma maior concentração de corrente, o que provoca uma elevação de temperatura localizada, o que pode conduzir a fusão desta área do varistor. De forma a avaliar a performance dos varistores de ZnO frente a impulsos de alta corrente e impulsos de corrente de longa duração associados a altas energias, ensaios elétricos de corrente de impulso elevada e impulso de corrente retangular ou descarga de linhas de transmissão, são prescritos nas diversas normas (53-55)

A degradação devido ao aumento de potência CA ou CC, proveniente de solicitações transitórias está relacionada com o balanço entre a energia gerada pelo varistor devido ao surto (P_G) e a capacidade do varistor de dissipar esta energia (P_D). Este tipo de degradação provoca uma redução gradual na máxima temperatura para o qual o varistor tem a capacidade de dissipar as energias provenientes de surtos, ou seja, diminui gradualmente a capacidade de absorção de energia dos varistores. Se a energia absorvida pelos varistores for maior do que a sua capacidade de dissipação, poderá ocorrer o fenômeno de instabilidade térmica. Um aumento de temperatura no varistor, devido ao coeficiente de temperatura negativo para a região de baixas correntes, acarretará em uma maior corrente resistiva CA ou CC, que por sua vez produzirá maiores perdas CA ou CC, que tende a elevar a temperatura do varistor. Desta forma, um processo cíclico aumento de

temperatura --> aumento de corrente resistiva --> aumento de potência --> aumento de temperatura poderá ocorrer até que haja a falha do varistor, ou no caso, do pára-raios. O ensaio de ciclo de operação com estabilidade térmica é prescrito nas normas técnicas (53-55) para avaliar o desempenho dos varistores ou dos pára-raios frente a este tipo de solicitação.

O terceiro tipo de degradação consiste em um aumento gradual da corrente resistiva com o tempo, e que pode conduzir a instabilidade térmica. A aplicação de tensão CA ou CC continuamente sobre os varistores gera uma certa quantidade de calor devido as perdas por efeito Joule. Uma vez atingida uma determinada quantidade de calor gerada no varistor, um processo de realimentação positivo descrito acima poderá ocorrer, devido a dependência da corrente com a temperatura, conduzindo o(s) varistor(es) a instabilidade térmica.

Conforme já descrito em 3.2.1, estudos tem demonstrado que neste tipo de degradação, o aumento temporal da corrente resistiva é proporcional a raiz quadrada do tempo. Tominaga et alii (43), realizaram estudos analíticos e experimentais sobre este processo de degradação, onde é descrito a condição crítica da estabilidade térmica, a partir de um balanço entre o calor gerado (Q) e a potência dissipada (P). Ensaio de longa duração para diferentes solicitações de tensão e tempo são realizados para verificar a estabilidade térmica dos varistores de ZnO. Com base nestes ensaios, a vida útil dos pára-raios tem sido estimada a partir da relação de Arrhenius. Um ensaio baseado na lei de Arrhenius, prescrito nas normas (53-55) para verificar a estabilidade térmica dos varistores de ZnO, é o ensaio de envelhecimento acelerado. Este ensaio consiste na aplicação da tensão contínua de operação do varistor por um período de

1000 horas a uma temperatura de ensaio de 115 ± 3 °C, o que equivale, segundo a teoria de Arrhenius, a uma vida útil de 110 anos a uma temperatura de 40 °C (53).

Apesar dos diferentes tipos de degradação que podem ocorrer sobre os varistores serem, conforme descrito acima, usualmente estudados em separado o que se verifica, na prática, é uma ação conjunta destes fenômenos.

CAPÍTULO 4 - OS MODELOS PROPOSTOS

Diversos modelos representativos para os varistores de ZnO tem sido propostos com a finalidade de explicar o mecanismo de condução, bem como descrever as propriedades elétricas e dielétricas destes elementos não-lineares nas regiões de operação dos mesmos. Para uma boa representatividade dos varistores de ZnO, estes modelos devem ser capazes de descrever as propriedades físicas e elétricas dos varistores nas suas regiões de operação, tais como a característica $V \times I$ sob aplicação de tensões contínua, alternada e de impulso, a variação das grandezas corrente e potência com a frequência e tensão aplicada, entre outras.

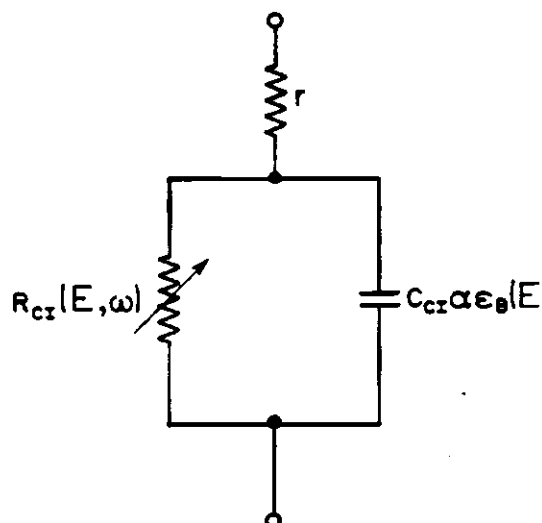
Neste capítulo, é feita uma descrição dos principais modelos propostos para representar as características dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas, compreendida até a tensão de referência destes. São apresentados, quando necessários, os principais estudos e experimentos efetuados, para o desenvolvimento dos modelos, bem como os seus parâmetros representativos.

Outros modelos, não descritos nesta seção, foram desenvolvidos para analisar o comportamento dos varistores de ZnO nas regiões de não-linearidade acentuada e de altas correntes.

4.1 Modelo proposto por Levinson e Phillip

O primeiro modelo para representar as propriedades dos varistores de ZnO foi proposto por Levinson & Philipp (27), baseado no estudo da microestrutura dos varistores de ZnO desenvolvida por Matsuoka e em resultados obtidos através de ensaios experimentais. Com base neste modelo, apresentado na Figura 4.1, estudos do mecanismo de condução

e do comportamento dos parâmetros elétricos dos varistores de ZnO foram realizados e apresentados em diversas publicações.



R_{CI} - Resistência não-linear da camada intergranular

C_{CI} - Capacitância da camada intergranular

r - Resistência série representativa dos grãos de ZnO

Figura 4.1 - Circuito equivalente para o modelo proposto por Levinson & Philipp (27)

Este modelo apresenta um circuito RC paralelo, definido pelos autores como representativos da camada intergranular, e responsável pela não-linearidade do varistor. Os autores demonstraram através de experimentos, que ambos os parâmetros R_{CI} e C_{CI} eram dependentes da tensão aplicada e da frequência. Associado a este circuito, existe uma resistência r de pequeno valor ôhmico, representativa dos grãos de óxido de zinco. Este parâmetro é importante para estudos na região de correntes elevadas, sendo responsável pelo "upturn" da tensão observado na característica $E \times J$ (ou $V \times I$), descrito em 3.2.3. Para estudos na região de baixas correntes, devido ao seu pequeno valor ôhmico, esta resistência pode ser desprezada.

A dependência da resistividade (ρ_B) com o campo elétrico (E) é definida por:

$$\rho_B = \frac{E}{J} \quad (4.1), \text{ onde } J \text{ é a densidade de corrente.}$$

Para baixos campos elétricos, ρ_B é independente de E. Neste caso, os varistores de ZnO comportam-se de forma ôhmica.

A impedância equivalente deste modelo apresentado é expressa por:

$$Z_{EQ} = R + \frac{R_{CI}}{1+w^2C_{CI}^2R_{CI}^2} - \frac{jwR_{CI}^2C_{CI}}{1+w^2R_{CI}^2C_{CI}^2} \quad (4.2)$$

Segundo este modelo, quando da aplicação de tensão CC, a impedância equivalente do circuito (Z_{EQ}), é dada por:

$$Z_{EQ} = R + R_{CI} \quad (4.3)$$

Para baixas tensões aplicadas, $R_{CI} \gg R$. A partir desta consideração, a impedância equivalente do circuito para a região de baixas frequências pode ser expressa por:

$$Z_{EQ} = \frac{R_{CI}}{1+w^2C_{CI}^2R_{CI}^2} - \frac{jwR_{CI}^2C_{CI}}{1+w^2R_{CI}^2C_{CI}^2} \quad (4.4)$$

A primeira parcela da equação acima corresponde a componente resistiva da corrente, enquanto que a segunda parcela representa a componente capacitiva da corrente.

Pela equação (4.4), verifica-se que com o aumento da frequência há uma diminuição da impedância equivalente,

com o conseqüente aumento da corrente total. Pode ser observado também a tendência de um maior aumento da componente resistiva da corrente total sobre a componente capacitiva. Para a região de baixas tensões aplicadas, até as proximidades da tensão de referência, a impedância equivalente quando da aplicação de tensão alternada de frequência industrial pode ser simplificada expressa por:

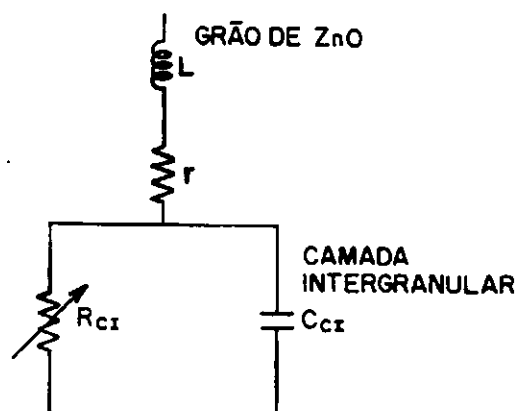
$$Z_{EQ} = \frac{1}{\omega^2 C_{CI}^2 R_{CI}} - \frac{j}{\omega C_{CI}} \quad (4.5)$$

Nesta região, $1/\omega C_{CI} \gg R_{CI}$, resultando em uma predominância da componente capacitiva da corrente sobre a resistiva. Com o aumento da tensão aplicada observa-se uma diminuição da resistência da camada intergranular (R_{CI}), aumentando a parcela da corrente correspondente a componente resistiva. Uma pequena redução na capacitância também pode ser observada, sem no entanto, acarretar em um grande aumento na componente capacitiva.

Apesar deste modelo proposto por Levinson e Philipp ter sido citado em diversas referências, verifica-se que a maioria dos fenômenos observados para os varistores de ZnO nas possíveis regiões de operação dos mesmos (ver seções 3.2.1 a 3.2.3), como por exemplo, o efeito da temperatura sobre os varistores na região da baixas tensões aplicadas e a variação da resistividade da camada intergranular e da capacitância com a tensão aplicada não podem ser diretamente identificados por este modelo.

Estudos adicionais desenvolvidos pelos autores acima (48) sobre a resposta a frequência dos varistores de ZnO, levaram os mesmos a adicionar ao modelo acima apresentado uma indutância L, associada ao próprio varistor

de ZnO em série com a resistência r , conforme apresentado esquematicamente na Figura 4.2.



R_{CI} - Resistência não-linear da camada intergranular

C_{CI} - Capacitância da camada intergranular

r - Resistência série representativa dos grãos de ZnO

L - Indutância inerente do material

Figura 4.2- Circuito equivalente para um varistor de ZnO proposto por Levinson & Philipp a partir dos estudos de efeito da temperatura na resposta a frequência dos varistores (48)

Um modelo similar foi apresentado por Kobayashi et alii (46), a partir de experiências realizadas visando descrever a resposta dos varistores de ZnO aos impulsos de corrente.

Ensaio realizados por Elli et alii (51) sobre varistores de ZnO, em diferentes condições de tensão aplicada, frequência e temperatura, conduziram também ao modelo proposto apresentado na Figura 4.2. A diferença, segundo Elli, estava no fato dos componentes R_{CI} e C_{CI} do circuito paralelo serem, neste caso, dependentes da tensão aplicada, frequência e temperatura.

4.2 Modelo proposto por Matsuura e Yamaoki

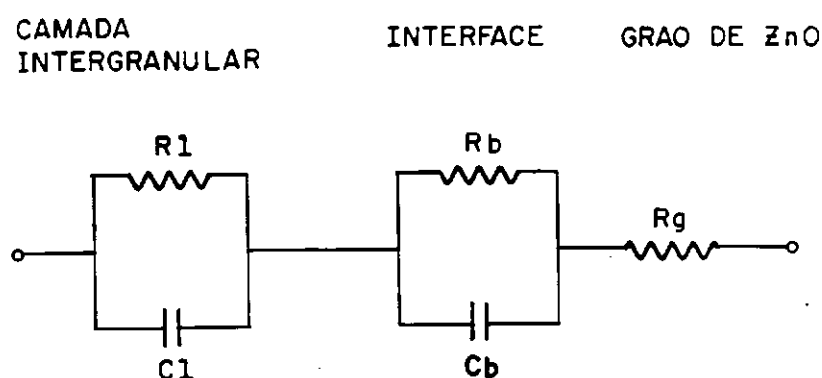
Matsuura & Yamaoki (50) desenvolveram um modelo a partir do estudo idealizado da microestrutura dos varistores de ZnO, com base no fenômeno de dispersão dos dielétricos.

Medições de capacitância e tangente de perdas para amostras de diferentes composições, foram realizadas para frequências na faixa de 60 a 5×10^8 Hz. Os autores investigaram a origem das dispersões dielétricas observadas nos varistores ensaiados a partir de um circuito equivalente baseado no modelo de Maxwell-Wagner, levando em consideração a microestrutura dos varistores, e a existência das barreiras de Schottky. A existência da barreira de Schottky na região de fronteira entre os grãos de ZnO foi verificado pelos autores a partir da dependência da capacitância com a tensão aplicada.

Este modelo idealizado, apresentado esquematicamente na Figura 4.3 é composto por representações dos grãos de ZnO, camadas intergranulares e pela interface entre os grãos e as camadas intergranulares. A resistência R_g , representativa dos grãos de ZnO é disposta em série com dois circuitos RC paralelos. No primeiro circuito, os parâmetros representam o material da camada intergranular, enquanto que o segundo, leva em consideração a interface entre os grãos de óxido de zinco e a camada intergranular.

Os resultados experimentais, quando comparados com os valores teóricos obtidos pelos autores a partir deste modelo apresentaram uma excelente concordância na característica "tensão x corrente". Uma boa concordância também foi obtida para os valores experimentais de capacitância e tangente de perdas, em função da tensão aplicada, quando comparados com os valores obtidos pelo uso do modelo.

Os autores no entanto não demonstraram como obter os parâmetros para uma boa representação deste modelo, bem como a influência de cada parâmetro sobre as propriedades dos varistores. Estas informações foram apresentadas posteriormente por Emtage (31) e por Eda (22), e serão comentadas nas seções 4.3 e 4.6.



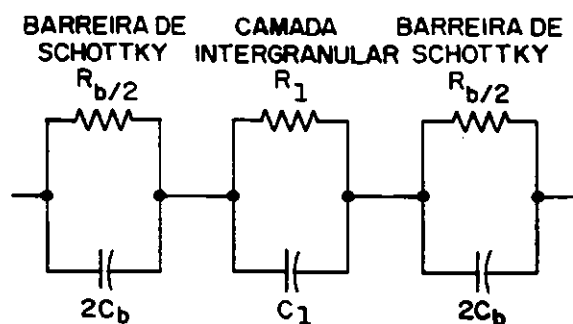
- C_i - Capacitância da camada intergranular
- R_i - Resistência da camada intergranular
- C_b - Capacitância representativa da interface entre os grãos de ZnO e a camada intergranular
- R_b - Resistência representativa da interface entre os grãos de ZnO e a camada intergranular
- R_g - Resistência série dos grãos de ZnO

Figura 4.3- Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Matsuura & Yamaoki (50)

4.3 Modelo proposto por Emtage

Um modelo similar ao descrito na seção anterior foi proposto por Emtage et alii (31), a partir do desenvolvimento de um modelo para as barreiras baseado em estudos das propriedades dielétricas e da degradação assimétrica observada na característica $V \times I$ dos varistores, devido a aplicação de tensões contínuas.

Segundo os autores, uma degradação assimétrica na característica $V \times I$ dos varistores indica a existência de duas barreiras de depleção (barreiras de Schottky), separadas pela camada intergranular. A partir deste estudo, uma simples barreira intergranular pode ser representada pelo circuito equivalente apresentado esquematicamente na Figura 4.4, abaixo.



C_i - Capacitância da camada intergranular

R_i - Resistência da camada intergranular

$2C_b$ - Capacitância representativa da barreira de depleção

$R_b/2$ - Resistência representativa da barreira de depleção

Figura 4.4- Circuito elétrico para os varistores de ZnO proposto por Emtage et alii (31)

Neste modelo, cada barreira de depleção é representada por um circuito paralelo contendo uma resistência $1/2 R_b$ e uma capacitância $2 C_b$. As duas barreiras são separadas por uma camada isolante (camada intergranular), caracterizada por uma resistência R_i e uma capacitância C_i . As resistências R_b e R_i são termicamente ativadas na região de condução, $R_b \sim \exp(\phi_b/KT)$ e $R_i \sim \exp(\phi_i/KT)$, onde ϕ_b e ϕ_i representam a altura da barreira e

o nível de armadilhas, respectivamente. Em geral, $\phi_b > 2 \phi_i$ e $R_b \gg R_i$.

Sob esta consideração, a admitância deste circuito equivalente pode ser calculada por (15):

$$Y = \frac{R_b^{-1}(1+w^2R_bR_iC_b^2) + JwC_b(1+w^2R_b^2C_i(C_b+C_i))}{(1 + w^2R_b^2(C_b+C_i)^2)} \quad (4.6)$$

Com relação a tangente de perdas é válida a seguinte equação:

$$\tan \delta = \frac{C_b}{C_i^{1/2}(C_i + C_b)^{1/2}} \cdot \frac{w/w_p}{1 + w^2/w_p^2} \quad (4.7)$$

$$w_p = \frac{1}{R_i C_i^{1/2} (C_i + C_b)^{1/2}}$$

w_p é a frequência equivalente ao pico da tangente de perdas

4.4 Modelo proposto por Knecht e Burger

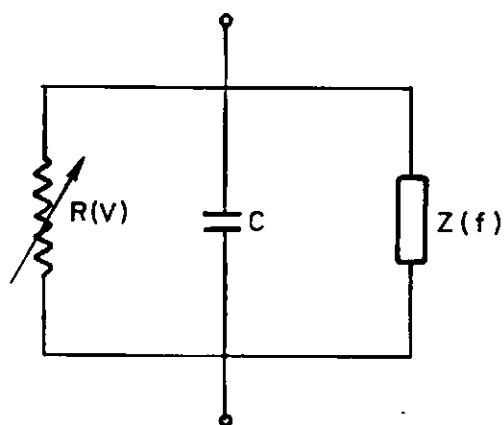
Um modelo com configuração diferente dos até então propostos, foi sugerido por Knecht & Burger(42) a partir de resultados experimentais realizados em varistores de ZnO em diferentes frequências.

Experimentos a partir da aplicação de tensão alternada de frequência industrial foram realizados pelos autores, onde foi observada a predominância da componente capacitiva da corrente sobre a resistiva até as proximidades da tensão de referência. A partir destes ensaios, foi verificado que para a região de baixas

correntes, a componente resistiva da corrente apesar de pequena, comparada à componente capacitiva, gerava perdas nos varistores superiores às obtidas para uma mesma intensidade de campo elétrico, quando da aplicação de tensão contínua. Os autores constataram que a relação entre as perdas geradas pela aplicação de tensões alternadas, quando comparadas às geradas por tensões contínuas sob a aplicação de um mesmo campo elétrico, eram maiores para menores solicitações de campo elétrico, diminuindo com o aumento do mesmo. Medições realizadas para diferentes frequências, mostraram que as perdas geradas devido a aplicações de tensões alternadas aumentavam com o aumento da frequência. Estes ensaios propiciaram aos autores o desenvolvimento de um modelo levando em consideração o efeito da frequência, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 4.5.

Neste modelo, os varistores de ZnO são representados por três parâmetros em paralelo, sendo que os parâmetros $R(V)$ e $Z(f)$ representam a parte resistiva da impedância do varistor. $R(V)$ é uma resistência independente da frequência e fortemente dependente da tensão aplicada, sendo obtida diretamente através da característica "V x I" do varistor de ZnO sob aplicação de tensões contínuas. O segundo parâmetro representa uma capacitância, apresentando como características uma pequena dependência com a tensão aplicada, frequência e temperatura. A inovação do modelo proposto vem do terceiro parâmetro que representa uma resistência $Z(f)$, praticamente independente da tensão aplicada, porém fortemente dependente da frequência. Para frequências na faixa de até aproximadamente 10 kHz, o autor atribuiu para $Z(f)$ uma relação dada por:

$$Z(f) = Z_0 \cdot f^{-0.8} \quad (4.7)$$



$R(V)$ - Resistência da camada intergranular fortemente dependente da tensão aplicada

$Z(f)$ - Resistência da camada intergranular fortemente dependente da frequência

C - Capacitância da camada intergranular com pequena dependência da tensão, frequência e temperatura

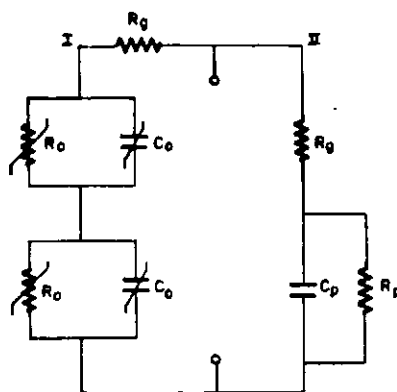
Figura 4.5- Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Ketch & Burger (42)

Para baixas tensões aplicadas, as perdas são determinadas por $Z(f)$. Com o aumento da tensão aplicada, devido a não-linearidade de $R(V)$, ocorre um processo de transição gradual dependente da frequência bem como da temperatura. Os autores constataram que as perdas em varistores de ZnO submetidos a temperaturas próximas à normal de operação (30 a 60°C), quando da aplicação da tensão de referência eram determinadas por $Z(f)$. Já para temperaturas de aproximadamente 150°C, quando da aplicação da mesma tensão, grande parte das perdas geradas nos

varistores eram originadas por $R(V)$. Para tensões mais elevadas, acima de tensão de referência, as perdas são exclusivamente originadas por $R(V)$.

4.5 Modelo proposto por Einzinger

Einzinger (23) desenvolveu um modelo, apresentado na Figura 4.6 para a representação dos varistores de ZnO a partir de estudos das propriedades físicas e elétricas da microestrutura destes varistores.



- R_0 - Resistência representativa da dependência das barreiras formadas com a tensão
- C_0 - Capacitância representativa da dependência das barreiras formadas com a tensão
- R_g - Resistência representativa dos grãos de ZnO
- R_p - Resistência representativa das propriedades dos varistores na região de baixas correntes
- C_p - Capacitância representativa das propriedades dos varistores na região de baixas correntes

Figura 4.6 - Circuito elétrico equivalente para a microestrutura dos varistores de ZnO proposto por Einzinger (23)

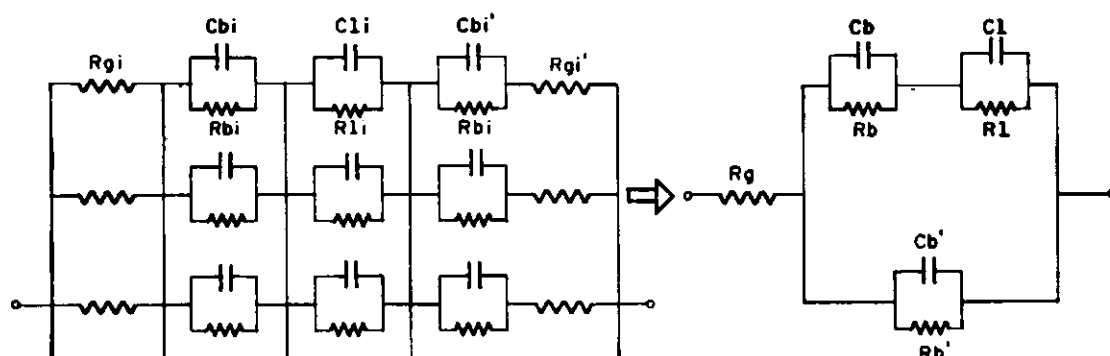
Estudos realizados por Einzinger mostraram a evidência de uma contribuição não desprezível da fase rica

em Bi_2O_3 localizada na fronteira dos grãos para a região de corrente de pré-ruptura, bem como uma não-linearidade pronunciada da junção na pré-ruptura. Baseado nesta experiência, Einzinger desenvolveu um circuito equivalente apresentando duas partes independentes destrutíveis da barreira do varistor. Verifica-se no circuito da Figura acima a existência de dois braços em paralelo, os quais contribuem para a impedância total dos varistores. O braço ativo do varistor I é formado por duas conexões R_0C_0 em série, representativas da dependência das barreiras formadas com a tensão. Estas duas conexões independentes devem-se ao fato da deterioração gradual verificada por Einzinger na característica $V \times I$ originalmente simétrica, após a aplicação de pulsos diretos de mesma polaridade. R_g representa a resistência série do grão. O braço II contribui para as propriedades dos varistores na região de baixas tensões, até próximo a tensão de referência, não apresentando influência no comportamento nas propriedades não-lineares dos varistores.

4.6 Modelo proposto por Eda

Eda (22) apresentou um circuito equivalente para descrever as propriedades dos varistores de ZnO , com base no estudo desenvolvido a partir de resultados experimentais obtidos sobre heterojunções de óxidos metálicos de $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3$, produzidas para representar o comportamento da camada intergranular na vizinhança dos grãos de ZnO . Este modelo pressupõe a existência de caminhos paralelos de corrente através das heterojunções e das camadas intergranulares ricas em Bi_2O_3 . Para estudar o efeito das diferentes regiões da camada intergranular observadas na microestrutura dos varistores, conforme apresentado na seção 2.4, sobre as propriedades elétricas e dielétricas, Eda realizou ensaios sobre três amostras com espessuras equivalentes àquelas das três regiões verificadas para a camada intergranular.

A partir dos resultados experimentais pode ser verificado uma dependência da característica $V \times I$ com a espessura da heterojunção e com a temperatura. Com relação as propriedades dielétricas, características similares a dos varistores de ZnO foram constatadas para as heterojunções. Baseado em resultados experimentais e a partir do mecanismo denominado de "Bypass effect" nas heterojunções para explicar a condução de corrente através dos varistores de ZnO, um modelo foi proposto por Eda, cuja representação esquemática esta apresentada na Figura 4.7.



R_g - Resistência representativa dos grãos de ZnO

R_i - Resistência da camada intergranular

C_i - Capacitância da camada intergranular

R_b e R'_b - Resistências representativas das barreiras de Schottky

C_b e C'_b - Capacitâncias representativas das barreiras de Schottky

Figura 4.7 - Circuito equivalente proposto por Eda (22)

Neste modelo, R_g representa a resistência dos grãos de ZnO. R_b (R'_b) e R_i representam as resistências das

barreiras de Schottky e da camada intergranular. Da mesma forma, C_b (C'_b) e C_i representam as capacitâncias das barreiras de Schottky e da camada intergranular.

Para simplificação do estudo, o circuito equivalente acima apresentado pode ser desmembrado em dois circuitos, apresentados nas Figuras 4.8a e 4.8b. Verifica-se que o circuito apresentado na Figura 4.8a é semelhante ao circuito proposto por Matsuura & Yamaoki (50), descrito em 4.2.

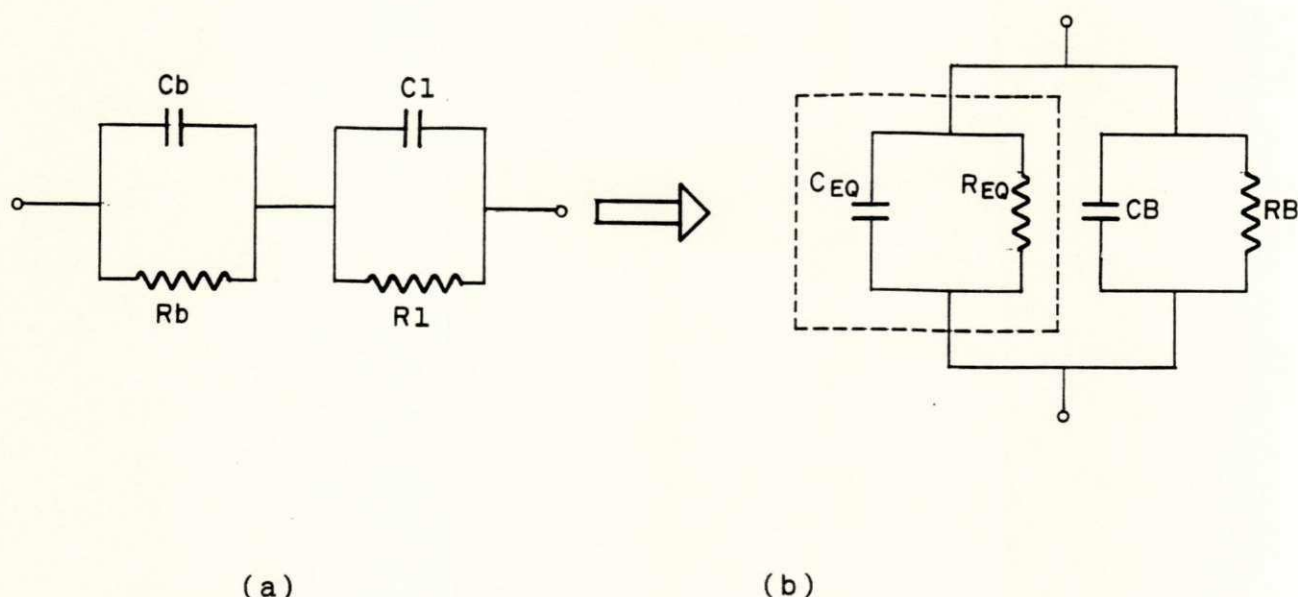


Figura 4.8 - Desmembramento do circuito equivalente proposto por Eda

Desprezando o efeito de R_g , o que segundo Levinson & Philipp (48) é válido para frequências menores do que 10^8 Hz, o circuito acima proposto apresenta valores de capacitância e tangente de perdas equivalentes dados por (22):

$$C_{EQ} = \frac{C_b(1 + \tan^2 \delta_b) \cdot C_i(1 + \tan^2 \delta_i)}{C_b(1 + \tan^2 \delta_b) + C_i(1 + \tan^2 \delta_i)} \quad (4.9)$$

$$\tan \delta_{EQ} = \frac{C_b(1 + \tan^2 \delta_b) \cdot (\tan \delta_i) + C_i(1 + \tan^2 \delta_i) \cdot (\tan \delta_b)}{C_b(1 + \tan^2 \delta_b) + C_i(1 + \tan^2 \delta_i)} \quad (4.10)$$

$$\tan \delta_b = \frac{1}{\omega R_b C_b} \quad \tan \delta_i = \frac{1}{\omega R_i C_i}, \quad \omega = 2\pi f$$

Para a comprovação do modelo, valores de R_b , R_i , C_b e C_i foram adequadamente escolhidos pelo autor, para a obtenção de curvas mostrando a dependência da capacitância e da tangente de perdas com a frequência. Neste modelo $R_b \gg R_i$ e $C_b < C_i$. Os valores para os parâmetros acima, bem como as equações que validam estes parâmetros são apresentados por Eda (22).

No modelo os parâmetros R_b , R_i , C_b e C_i são referidos para a tangente de perdas na região de baixas frequências, o pico da tangente de perdas na região de altas frequências, a capacitância em toda a faixa de frequência junto com o valor de pico da tangente de perdas e a capacitância na região de altas frequências junto com o valor de pico da tangente de perdas, respectivamente. O aumento que se observa na tangente de perdas para a região de baixas frequências, devido a aplicação de tensão CC corresponde a uma redução no valor de R_b . Esta redução pode ser atribuída a redução da altura da barreira de Schottky. A dependência verificada na temperatura sobre a frequência correspondente ao pico da tangente de perdas é obtida neste modelo substituindo-se R_i por $R_{i0} \cdot \exp(\phi_i/KT)$, onde R_{i0} é uma constante, ϕ_i é a energia de ativação de R_i , K é a

constante de Boltzman e T a temperatura absoluta. A dependência da temperatura sobre a frequência correspondente ao valor mínimo da tangente de perdas na região de baixas frequências é obtida substituindo-se R_b por $R_{b0} \cdot \exp(\phi_b/KT)$, onde R_{b0} é uma constante, ϕ_b é a energia de ativação de R_b . A dependência da temperatura na capacitância e valor de pico da tangente de perdas é obtida substituindo-se C_b por $C_{b0} \cdot \exp(-\phi_{cb}/KT)$, onde C_{b0} é uma constante, ϕ_{cb} é a energia de ativação de C_b . No estudo, energias de ativação de 0,35 eV, 0,015 eV e 0,35 eV, foram consideradas para ϕ_b , ϕ_{cb} e ϕ_i , respectivamente.

O circuito apresentado na Figura 4.8b, representativo do modelo proposto mostrado na Figura 4.7 apresenta valores equivalentes para a capacitância e tangente de perdas dados por:

$$C_{MOD} = C_{EQ} + C_B \quad (4.11)$$

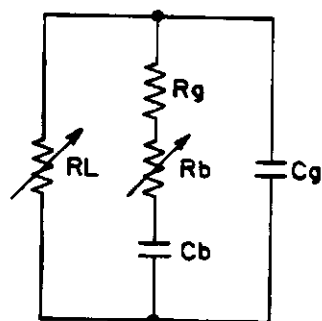
$$\tan \delta_{MOD} = \frac{C_{EQ} \cdot \tan \delta_{EQ} + C_B \cdot \tan \delta_B}{C_{EQ} + C_B} \quad (4.12)$$

$$\tan \delta_{EQ} = \frac{1}{\omega C_{EQ} R_{EQ}} \quad \tan \delta_B = \frac{1}{\omega C_B R_B}$$

Os resultados obtidos por Eda a partir da utilização do modelo com base nas equações acima apresentaram concordância com os resultados experimentais.

4.7 Modelo apresentado por Mc Graw-Edison Company

Um modelo para representação das propriedades dos varistores de ZnO foi apresentado no trabalho desenvolvido pela Mc Graw-Edison Company (6) através de um circuito elétrico equivalente, conforme apresentado esquematicamente na Figura 4.9.



R_L - Resistência não-linear representativa da condução em CC

R_g - Resistência representativa dos grãos de ZnO

R_b - Resistência não-linear representativa da camada intergranular

C_b - Capacitância representativa da camada intergranular

C_g - Capacitância representativa dos grãos de ZnO

Figura 4.9 - Circuito equivalente para os varistores de ZnO (6)

Este modelo representa o varistor de ZnO como uma rede de combinações série e paralela de grãos de ZnO condutivos separados pelas barreiras intergranulares, as quais são responsáveis pela não-linearidade acentuada observada nos varistores.

Neste modelo observa-se a existência de três ramos em paralelo. O primeiro ramo apresenta uma resistência não-linear R_L , representativa da circulação de correntes CC. O segundo ramo apresenta uma associação série de três parâmetros, os quais representam uma única região de

fronteira dos grãos. Este ramo apresenta uma resistência R_g representativa dos grãos de ZnO, uma resistência não-linear R_b e uma capacitância C_b , ambos os parâmetros representativos de uma camada intergranular. O terceiro ramo apresenta uma capacitância C_g da região granular de ZnO efetiva somente para a região de frequências elevadas.

Os parâmetros do circuito apresentado são dados por:

$$Z_B = R_B - (j/wC_B), \quad w = 2\pi f \quad (4.13)$$

$$C_g = \epsilon_g \cdot \epsilon_0 \cdot S/h$$

$$R_L = \rho_L \cdot h/S$$

onde ϵ_0 é a constante dielétrica no vácuo, ϵ_g é a constante dielétrica relativa do cristal de ZnO ($\epsilon_g \approx 8,5$), S e h são a área e a altura do varistor, respectivamente.

Os parâmetros R_B e C_B , que compõe o circuito $R_B C_B$ série representativo de uma simples fronteira entre grãos são ambos dependentes da temperatura T, da frequência f, do tamanho médio do grão de ZnO d e de uma simples espessura da junção t e foram determinados assumindo-se as seguintes condições verificadas experimentalmente: 1- aumenta com o aumento da temperatura; 2- é inversamente proporcional a frequência e 3- apresenta uma capacitância que permanece aproximadamente independente da frequência. A expressão para a determinação dos parâmetros R_B e C_B são apresentados na referência (6).

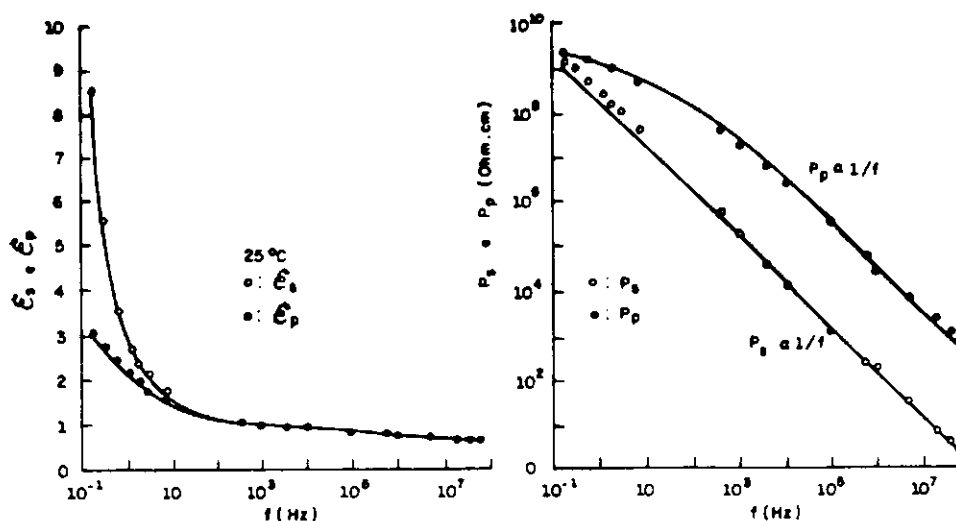
Os autores constataram experimentalmente uma ampla faixa de frequência para o qual $R_B \gg R_g$, assim como R_L e C_g podem ser desprezados. Essas considerações simplificam o circuito apresentado na Figura 4.9 a um simples circuito RC série.

Partindo das considerações acima, a impedância equivalente do modelo apresentado pode ser expressa por:

$$Z_{EQ} = R_B - (j/wC_B) = R_S - j/w.\epsilon_0.\epsilon_S \quad (4.14)$$

onde $\rho_S = d.R_S$ e $\epsilon_S = (d/t).\epsilon_B$

Uma análise comparativa do circuito $R_B C_B$ série estudado pela Mc Graw-Edison Company (6) com o circuito RC paralelo proposto por Levinson & Philipp (27) para representação da camada intergranular foi realizada pelos autores, a partir de experimentos realizados sobre um determinado tipo de varistor. Este estudo comparativo pode ser visualizado através das Figuras 4.10a e 4.10b, que apresentam o efeito da frequência sobre as permissividades relativas série e paralela e sobre as resistividades série e paralela, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 4.10- a) Variação das constantes dielétricas série e paralela com a frequência b) e variação das resistividades série e paralela com a frequência (6)

4.8 Modelo proposto por Liang Yu-Jin, Zhao Yu-Ji e Zeng Hong-Yan

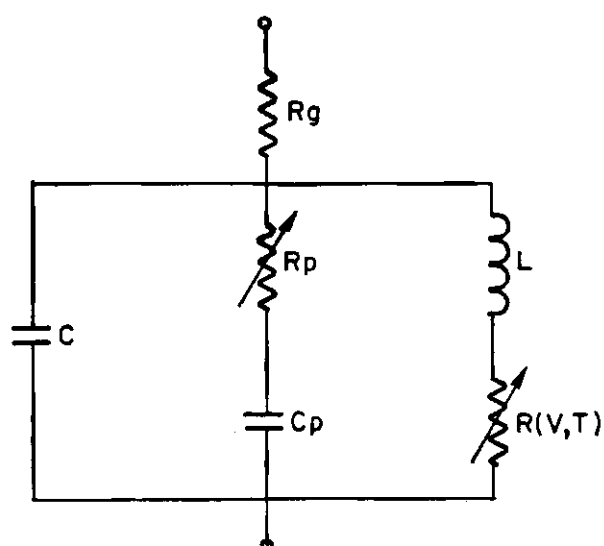
Um modelo de características bastante complexas, desenvolvido com base em resultados obtidos a partir de estudos experimentais, foi proposto recentemente por Liang Yu-Jin et alii (37), para descrever o comportamento elétrico dos varistores de ZnO.

A partir de estudos experimentais realizados sobre varistores de ZnO, sob aplicação de diferentes solicitações de tensões CC representativas das possíveis solicitações existentes em sistemas HVDC, e tensões CA a 50 Hz, os autores constataram que o comportamento da corrente e da potência, em função do tipo de solicitação aplicada, pode ser analisado considerando-se duas regiões distintas:

- para a região de baixas tensões aplicadas, onde a amplitude da tensão de ensaio está abaixo da tensão de referência do varistor há uma predominância da corrente de polarização, que é fortemente dependente da frequência, sobre a corrente de condução. Esta predominância resulta em baixos valores de corrente CC, comparados aos valores de corrente obtidas a partir de solicitações de tensões alternada e contínua superposta com harmônicos.

- para a região de não-linearidade, na qual a tensão aplicada excede a tensão de referência dos varistores, verifica-se, devido a acentuada não-linearidade, um crescimento abrupto da corrente de condução que predomina nesta região.

Com base nas considerações acima descritas, um circuito equivalente apresentado esquematicamente na Figura 4.11, foi desenvolvido pelos autores.



- R_p e C_p - Resistência e capacitância de polarização
 $R(V,T)$ - Resistência não-linear dependente da tensão e da temperatura obtida sob aplicação de tensão DC
 R_g - Resistência dos grãos de ZnO
 C - Capacitância da camada intergranular
 L - Indutância representativa do tempo de retardo na resposta da corrente de condução

Figura 4.11- Circuito elétrico equivalente proposto por Liang Yu-Jin et alii (37) para descrever o comportamento elétrico dos varistores de ZnO

Verifica-se no modelo a existência de uma resistência R_g , representativa dos grãos de ZnO em série com um circuito formado por três ramos em paralelo. No primeiro ramo, o parâmetro C de valor constante representa a capacitância da camada intergranular. No segundo ramo, os autores propõe uma configuração série dos parâmetros R_p e C_p representativos da resistência e capacitância de polarização, respectivamente. O terceiro ramo, apresenta

uma resistência $R(V,T)$ não-linear, dependente da tensão aplicada e temperatura, obtida sob aplicação de tensão contínua. Em série com esta resistência não-linear, é proposta uma indutância L , para representar o tempo de retardo na resposta da corrente de condução observado por Tominaga (56).

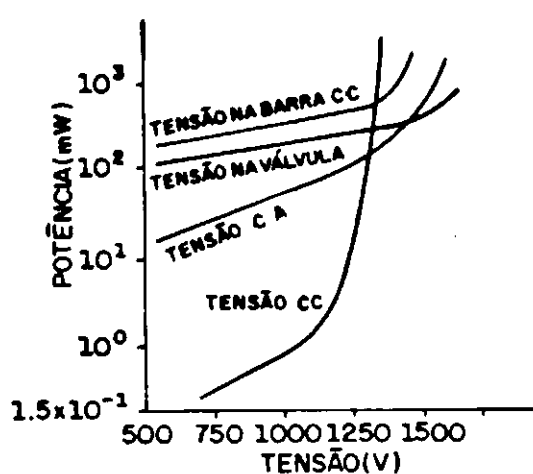
4.9 Modelo proposto por Zheng

Zheng (38), que participou dos estudos que conduziram ao modelo anterior, sugeriu um novo modelo desenvolvido após a análise do efeito de polarização do varistor de ZnO e das características de não-linearidade deste. Medições de potência para diferentes solicitações de tensões que aparecem em sistemas HVDC foram realizadas. Adicionalmente, a potência dos varistores foi medida para solicitações de tensão alternada a 50Hz. As medições foram efetuadas variando-se a tensão para uma faixa de temperatura de 10°C a 160°C . Os resultados obtidos por Zheng para as diferentes solicitações de tensão, estão sintetizados nas curvas potência versus tensão e potência versus temperatura para uma dada tensão, apresentadas nas Figuras 4.12a e 4.12b, respectivamente.

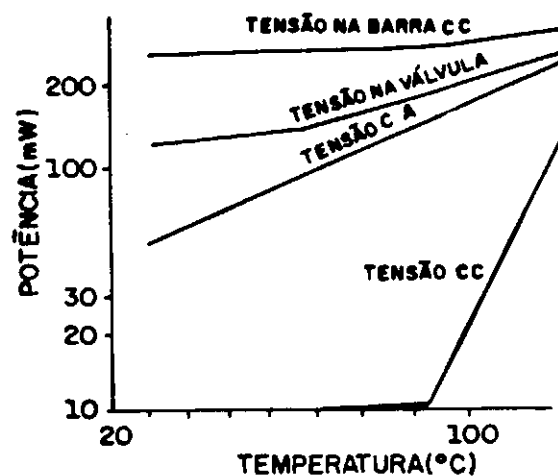
A partir dos resultados obtidos, Zheng verificou em todas as solicitações de tensão a existência de uma relação exponencial na característica "potência x temperatura", sendo a dependência da potência com a temperatura maior para tensões CC puras. Também é verificado uma dependência das perdas Joule com a forma de onda aplicada, amplitude da tensão e tempo de aplicação da mesma. Na região de baixas correntes, um aumento na frequência acarreta num aumento da potência.

Observação importante foi feita por Zheng com relação a faixa de corrente na qual o varistor foi medido.

Para a região de baixas correntes, os valores de potência obtidos para as diferentes amplitudes de tensão CC são menores do que os valores obtidos com tensão alternada, para as mesmas amplitudes de tensão. Já na região de não-linearidade, os valores de potência para tensões CC foram maiores do que os obtidos para tensão alternada. A relação obtida entre os valores de P_{CC} e P_{CA} nesta região, aumenta a medida que eleva-se a tensão aplicada.



(a)



(b)

Figura 4.12- a) Variação da potência em função da tensão aplicada b) e variação da potência em função da temperatura para tensões com diferentes formas de onda (38)

Partindo de conhecimentos prévios, Zheng descreveu que a potência dissipada nos varistores de ZnO ocorre não só devido aos efeitos de condução mas também de polarização. Este efeito de polarização, que predomina na região de baixas correntes e temperaturas, aumenta com o aumento da frequência. Desta forma, as características de potência obtidas para os varistores foram descritas pela equação abaixo:

$$P(w,T) = P_0(T) + P_A(w,T) \quad (4.15),$$

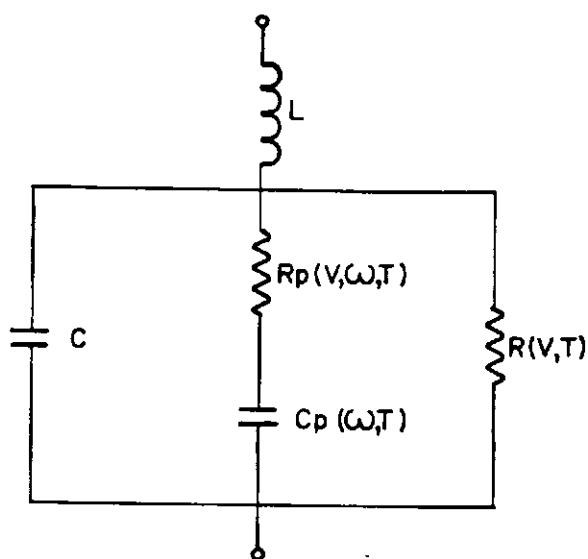
onde

$P_0(T)$ representa as perdas devido a condução e $P_A(w,T)$ corresponde as perdas devido a polarização, sendo ambas funções exponenciais da temperatura. Para tensões contínuas $P_A(w,T) = 0$ e, conseqüentemente, as perdas são mínimas.

Para baixas amplitudes de tensão, as perdas nos varistores devem-se principalmente à componente de perdas devido a polarização. O aumento na amplitude de tensão, acarreta num aumento das perdas de condução, perdas estas que na região de tensão acima da tensão de referência constituem-se na componente predominante para as perdas verificadas nos varistores.

Com relação ao efeito da temperatura, Zheng mostrou que a componente de perdas devido ao efeito de condução do varistor $P_0(T)$ apresenta uma maior dependência da temperatura, comparada à componente de perdas devido a polarização. Isto explica uma maior variação da corrente e potência com a temperatura quando da aplicação de tensões contínuas.

A partir da consideração do efeito de polarização verificado para os varistores e das características não-lineares destes, Zheng propôs o modelo apresentado esquematicamente na Figura 4.13.



$R_p(V, \omega, T)$ - Resistência não-linear dependente da frequência, tensão aplicada e temperatura, devida a polarização com perdas

$C_p(\omega, T)$ - Capacitância dependente da frequência e temperatura, associada a polarização com perdas

$R(V, T)$ - Resistência dependente da tensão aplicada e temperatura, associada as perdas devido a condução

C - Capacitância representativa da polarização sem perdas

L - Indutância associada a geometria do varistor

Figura 4.13- Circuito elétrico equivalente para varistores de ZnO proposto por Zheng (38)

Neste modelo, Zheng propõe uma indutância associada com a geometria do varistor em série com três braços em paralelo. No primeiro braço da Figura, uma resistência não-linear $R_p(V, \omega, T)$ dependente da tensão aplicada, temperatura e frequência e, representativa da polarização

com perdas é colocada em série com uma capacitância $C_p(w,T)$ dependente da frequência e temperatura, também associada a polarização com perdas. O segundo braço, apresenta uma capacitância C , representativa da polarização sem perdas. O terceiro braço apresenta uma resistência $R(V,T)$, dependente da tensão aplicada e temperatura. Este parâmetro representa as perdas devido a condução.

4.10 Modelo proposto por Horiuchi, Ichikawa, Mizukoshi, Kurita e Shirakawa

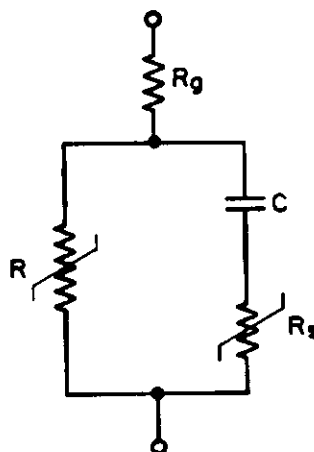
O modelo proposto no trabalho apresentado por Horiuchi et alii (40) foi desenvolvido a partir de ensaios de verificação do comportamento dos varistores de ZnO quanto à potência dissipada, para solicitações de tensões contínuas com componentes de altas frequências e tensões alternadas com frequências na faixa de 50Hz a 20kHz.

A partir da análise da dependência da corrente total e da potência gerada nos varistores, com a frequência e tensão aplicada, realizada pelos autores, um circuito equivalente foi apresentado para descrever o comportamento elétrico dos varistores de ZnO, circuito este apresentado esquematicamente na Figura 4.14.

Este modelo consiste basicamente de uma resistência R_g representativa dos grãos de óxido de zinco em série com dois braços em paralelo. O primeiro é composto por uma resistência R , de elevado valor, que representa uma componente resistiva não-linear, responsável pela geração das perdas quando da aplicação de tensões contínuas. Esta ocorre devido as barreiras de potencial na fronteira entre os grãos. O segundo braço, apresenta uma capacitância C , representativa da componente capacitiva, em série com uma resistência não-linear R_s responsável pelas perdas devido a frequências mais elevadas. R_s depende da frequência, sendo

considerada como perda dielétrica devido a saltos de cargas capturadas na fronteira dos grãos, polarização interfacial ou outros detalhes do fenômeno de polarização nos varistores de ZnO, ainda não claramente explicados. Um aumento na frequência acarreta em uma redução no valor de R_s , como conseqüência, ocorre um aumento das perdas nos varistores.

A impedância do braço de R_s e C em série, é muito menor do que a resistência R, acarretando em elevadas amplitudes de correntes resistivas para solicitações de tensões alternadas quando comparadas às mesmas solicitações para tensões contínuas.



- R_g - Resistência representativa dos grãos de ZnO
- R_s - Resistência não-linear dependente da frequência responsável pelas perdas devido a frequências mais elevadas
- C - Capacitância da camada intergranular
- R - Resistência não-linear responsável pelas perdas quando da aplicação de tensões contínuas

Figura 4.14 - Circuito equivalente para o varistor de ZnO proposto por Horiuchi et alii (40)

Para que o modelo apresentado apresente boa concordância com resultados obtidos de ensaios em laboratórios, é necessário considerar as características não-lineares de R_S .

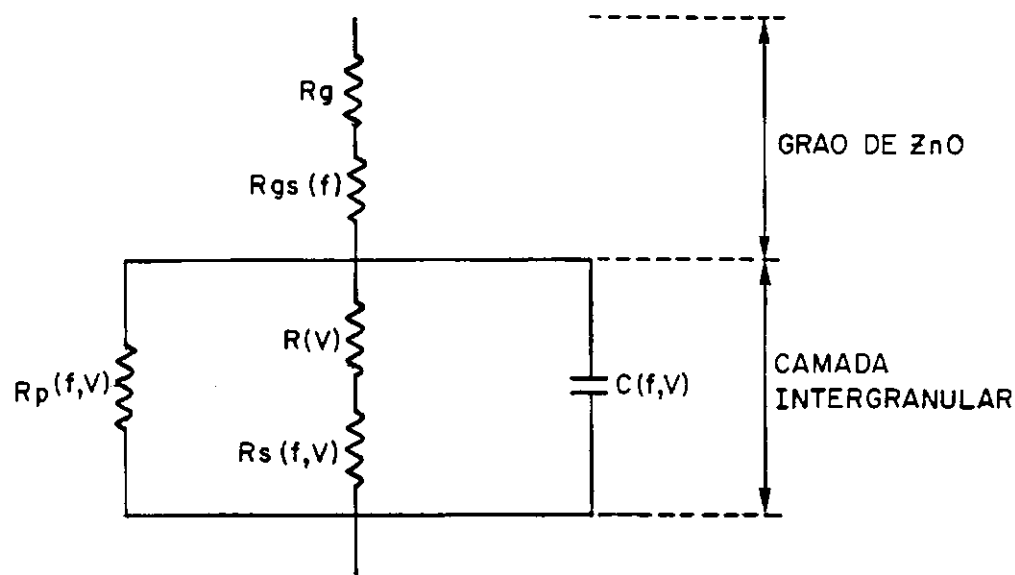
4.11 Modelo proposto por Haddad, Fuentes, German e Waters

O modelo mais recente desenvolvido para representar as propriedades elétricas dos varistores de ZnO foi proposto por Haddad et alii (39). Este modelo, desenvolvido a partir de resultados obtidos em estudos experimentais e com base em outras publicações foi baseado nas seguintes considerações:

- 1)- o aumento verificado nas grandezas corrente e potência consumida com o aumento da frequência, na região de baixas correntes;
- 2)- uma diminuição verificada nas grandezas corrente e potência consumida com o aumento da frequência, na região de não-linearidade;
- 3)- a região de descarga, onde a tensão é limitada pela resistência dos grãos de ZnO. Verifica-se nesta região que para uma mesma amplitude de corrente, a tensão residual dos varistores aumenta para surtos mais rápidos.

Estudos experimentais foram realizados objetivando verificar o efeito da frequência sobre a corrente total e a potência para diferentes níveis de tensão. Para tal, ensaios foram realizados em amostras de varistores de ZnO para diferentes níveis de tensão, compreendidos entre 0 e 4 kV_{ef} , e para uma faixa de frequência entre 20 e 200 Hz. A tensão de referência das amostras, na qual a corrente de condução tornou-se significativa foi de aproximadamente 3,2 kV_{ef} . Os resultados destes experimentos foram apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6, em 3.2.1.

A partir dos resultados obtidos, os autores constataram que para baixas amplitudes de tensão, as grandezas corrente e potencia consumida aumentam com o aumento da frequencia. Por outro lado, para uma faixa de tensão na qual a característica de condução do varistor torna-se significativa, para uma mesma amplitude de tensão, ambas as grandezas corrente e potencia decrescem com o aumento da frequencia. Com base nestes resultados e nas considerações descritas no início desta seção, os autores propuseram um novo modelo para representar o comportamento dos varistores nas possíveis regiões de operação dos mesmos, modelo este apresentado na figura 4.15.



- R_g - Resistência dos grãos de ZnO
- $R_{gs}(f)$ - Resistência que caracteriza o efeito verificado na tensão residual
- $C(f,V)$ - Capacitância da camada intergranular
- $R(V)$ - Resistência do varistor sob tensão DC
- $R_s(f,V)$ - Resistência do varistor sob tensão alternada
- $R_p(f,V)$ - Resistência fortemente dependente da frequência

Figura 4.15- Circuito equivalente proposto por Haddad et alli (39)

Basicamente o circuito equivalente proposto apresentado na Figura 4.15 possui uma resistência r , representativa dos grãos de óxido de zinco. A camada intergranular é representada por um circuito equivalente $R_{EQ}.C$ paralelo, onde $C(f,V)$ é uma capacitância dependente da frequência e da tensão aplicada. A resistência equivalente R_{EQ} é altamente não-linear, e dependente da temperatura, da amplitude e da forma da tensão aplicada. Para representar individualmente os diferentes efeitos que podem ocorrer nos varistores de ZnO, a resistência equivalente R_{EQ} e a resistência R_g do grão de ZnO foram distribuídas pelos autores em elementos resistivos.

A resistência dos grãos de óxido de zinco é representada por R_g . Em série com R_g é inserida uma resistência $R_{gs}(f)$, a qual caracteriza o efeito verificado na variação da tensão residual medida sobre o varistor de ZnO que, para uma dada amplitude de corrente, aumenta com o aumento da taxa de crescimento da corrente. Para uma boa representatividade do fenômeno $R_{gs}(f)$ deve apresentar uma característica de tempo de resposta apropriada. A camada intergranular é representada por três braços em paralelo. $C(f,V)$ representa a capacitância da camada intergranular, sendo este parâmetro, conforme descrito anteriormente, dependente da frequência e da tensão aplicada. $R(V)$ representa a resistência da amostra em corrente contínua. A resistência $R_s(f,V)$ em série com $R(V)$ é uma resistência para tensões alternadas, fortemente dependente da tensão aplicada e dependente da frequência, apresentando um valor nulo para solicitações contínuas. $R_p(f,V)$, representa uma resistência dependente da frequência. Na região de baixas correntes, $R_p(f,V)$ caracteriza a resistência sob tensão alternada. Esta resistência diminui o seu valor com o aumento da frequência, enquanto que o efeito da tensão sobre esta resistência é pequeno. R diminui ligeiramente com o aumento da tensão. Em síntese, segundo o modelo

proposto por Haddad et alii, na região de baixas tensões aplicadas existem três braços em paralelo. Nesta faixa de tensão, a resistência $R_p(V,T)$ é muito menor do que $R(V)$ que representa a resistência sob aplicação de tensão contínua. O aumento da corrente com o aumento da frequência sob aplicação de tensão alternada deve-se a uma redução no valor de R_p . Para a região acima da tensão de referência, a resistência CC $R(V)$ reduz-se para valores relativamente baixos, comparados com a resistência CA, representada pela resistência $R_s(f,V)$ em série com $R(V)$. $R_s(f,V)$ aumenta com o aumento da frequência. A metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo, necessários para a representação do comportamento elétrico dos varistores de ZnO é descrita pelos autores, sendo a escolha dos parâmetros baseada nos resultados experimentais obtidos. Os valores das resistências $R(V)$, $R_s(f,V)$ e $R_p(f,V)$ determinados pelos autores para uma frequência de 50 Hz, são mostrados na Figura 4.16.

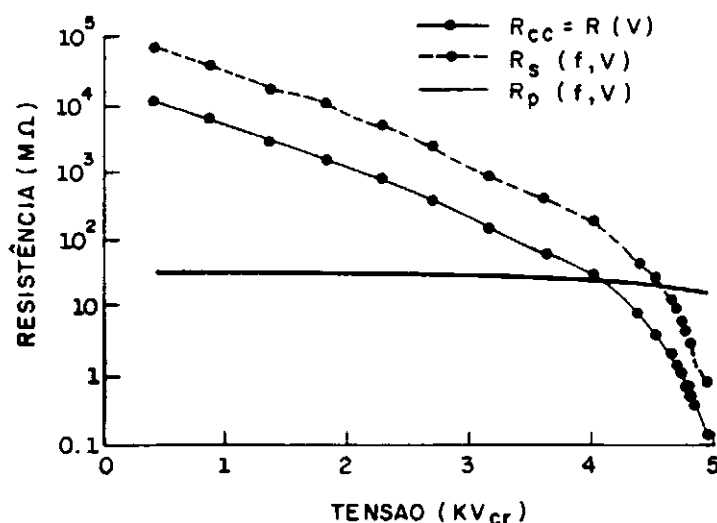


Figura 4.16- Variação das resistências $R(V)$, $R_s(f,V)$ e $R_p(f,V)$ com a tensão aplicada (39)

CAPÍTULO 5 - ESTUDO EXPERIMENTAL

Nos primeiros estudos das propriedades elétricas dos varistores de ZnO, a característica "tensão x corrente" dos mesmos na região de baixas tensões aplicadas era frequentemente reportada nas literaturas sob aplicação de tensões contínuas, devido a simplicidade na medição da corrente resistiva. No entanto, para se verificar a performance elétrica dos varistores utilizados na montagem de pára-raios aplicados a sistemas de tensão alternada, faz-se necessário efetuar medições de corrente sob aplicações de tensões alternadas, uma vez que, conforme descrito em 3.2.1, para esta região a componente resistiva da corrente CA, responsável pelas perdas Joule é maior do que a corrente resistiva CC. Outro aspecto importante é que durante a operação dos pára-raios de ZnO nos sistemas em condição de regime permanente, a corrente que circula por estes é predominantemente devido a componente capacitiva da corrente. Desta forma, para se avaliar a performance elétrica dos varistores de ZnO, a serem utilizados em pára-raios para sistemas de tensão alternada, torna-se necessário conhecer o comportamento da resistividade e da capacitância dos mesmos, sob aplicação de tensões alternadas.

Neste capítulo é realizado um estudo experimental apresentando resultados dos ensaios obtidos sob aplicação de tensões alternadas e contínuas, para um determinado tipo de varistor de ZnO previamente aprovado em todos os ensaios de tipo, fabricado em escala industrial e utilizado na montagem de pára-raios para sistemas de transmissão. Apesar dos resultados apresentados neste capítulo serem específicos a um determinado tipo de varistor, espera-se que os mesmos possam servir de referência para o estudo e avaliação de outros tipos de varistores de ZnO, uma vez conhecidas as suas dimensões e características elétricas principais.

5.1 Corpos de prova

Os varistores utilizados nos ensaios descritos neste capítulo foram produzidos em escala industrial apresentando as seguintes características principais:

Tensão nominal de 3 kV_{ef} ;

Máxima tensão contínua de operação de $2.5 \text{ kV}_{\text{ef}}$;

Corrente de descarga nominal de 10 kA;

Classe 2 de descarga de linhas de transmissão.

O diâmetro nominal das amostras ensaiadas é de 53mm e a espessura de 22mm. A dispersão entre as amostras inerentes ao processo de fabricação é estimada em 8%. A identificação das amostras durante os ensaios foi realizada utilizando-se a própria identificação do fabricante, que consiste em uma identificação de fábrica/ano/lote seguida do número de série.

De forma a se evitar medições incorretas devido ao efeito da umidade, antes do início de cada etapa de ensaios as amostras foram submetidas a uma etapa de secagem a uma temperatura de $60 \pm 15^{\circ}\text{C}$, tomando-se o cuidado de se evitar a permanência das amostras fora da estufa por mais do que 6 horas.

5.2 Estudo do comportamento da característica tensão - corrente" e das propriedades dielétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas

O estudo do levantamento das características dos varistores de óxido de zinco na região de baixas tensões aplicadas foi realizado sob aplicação de tensões alternada a frequência industrial e contínua para amplitudes de tensão variáveis numa faixa desde $0,424 \text{ kV}_{\text{Cr}}$ (ou kV_{CC}) até a tensão nominal das amostras ensaiadas, no caso $4,24 \text{ kV}_{\text{Cr}}$ (ou kV_{CC}), sobre dez amostras de varistores de ZnO novos. O

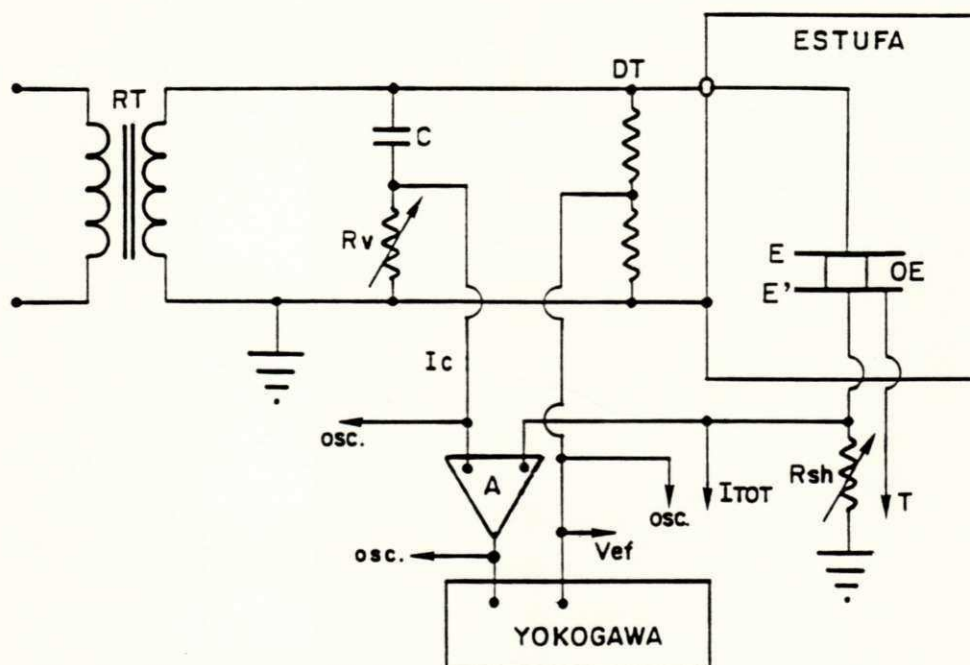
efeito da temperatura sobre as propriedades dos varistores foi investigado para as diferentes solicitações de tensão. Para tal, os varistores foram ensaiados nas temperaturas ambiente, 60°C e 100°C, correspondentes a temperatura ambiente média, a média das máximas temperaturas a que os varistores são submetidos nos sistemas em condição de regime permanente e a uma temperatura próxima a temperatura do ensaio de envelhecimento acelerado, respectivamente. A medição da temperatura dos varistores foi realizada mediante o uso de termopares instalados em uma chapa de cobre de espessura fina, a qual estabelece contato com a parte inferior das amostras ensaiadas. Todas as curvas apresentadas nesta seção, foram obtidas considerando os valores médios da grandeza medida, para cada nível de tensão e temperatura utilizados nos ensaios sobre dez varistores de ZnO. Os valores médios e seus respectivos desvios obtidos são apresentados nas Tabelas A2.1 a A2.9, no anexo B. Este estudo foi dividido em três etapas:

- medição da corrente total, de suas componentes resistiva e capacitiva e da potência, sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial;
- medição da capacitância e da tangente de perdas sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial;
- medição da corrente e potência dos varistores sob aplicação de tensões contínuas, polaridades positiva e negativa.

Antes do início e ao final de cada etapa de ensaios, foram medidas, para uma dada tensão, a corrente total e a sua componente resistiva, a potência, a capacitância e a tangente de perdas das amostras ensaiadas, de forma a se constatar que não ocorreu degradação das mesmas durante as etapas propostas.

5.2.1 Medição da corrente total, de suas componentes resistiva e capacitiva e da potência, sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial:

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 5.1.



- RT - Fonte de tensão CA 0-8 kV, 2,55 MVA
- DT - Divisor de tensão
- OE - Objeto sob ensaio
- C e R_v - Parâmetros do circuito de compensação
- R_{sh} - Derivador para medição da corrente total
- A - Amplificador diferencial
- OSC - Entrada do sinal no osciloscópio
- V_{ef} - Entrada do sinal de medição da tensão eficaz
- T - Termopares para medição da temperatura
- YOKOGAWA - Wattímetro utilizado para medição da potência
- E e E' - Chapas de cobre utilizadas para reduzir a distorção do campo elétrico

Figura 5.1 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição das correntes e potência em varistores de ZnO, sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial

Para a obtenção de formas de onda da corrente total e de suas componentes sem distorções, ou seja, não influenciadas por harmônicos externos àqueles gerados pelos próprios varistores de ZnO, utilizou-se uma fonte de alimentação apresentando baixos níveis de harmônicos.

A tensão de ensaio foi medida através de um divisor de tensão resistivo, próprio para ensaios com tensão alternada. A escolha pelo divisor resistivo deveu-se ao fato da existência de erros de ângulo de fase, verificados quando do acoplamento do medidor de potência ao divisor de tensão capacitivo, utilizado nas medições prévias.

Para a validade da utilização do circuito de compensação para obtenção da componente resistiva da corrente, foram medidos a capacitância e a tangente de perdas do capacitor utilizado, para tensões aplicadas na faixa de 0,8 a 10 kV_{ef}. O capacitor apresentou para os níveis de tensão ensaiados, uma capacitância de 3,975 nF e uma tangente de perdas de $2,27 \times 10^{-3}$.

As amplitudes da corrente total e de suas componentes foram medidas a partir de um osciloscópio digital marca Tektronix modelo 2230, com interface para microcomputador. A componente resistiva da corrente foi obtida a partir da técnica de compensação da componente capacitiva, cuja descrição é apresentada no anexo A. A amplitude da componente capacitiva da corrente, para a região predominantemente capacitiva, foi obtida pela própria amplitude da corrente total. Para regiões próximas a tensão de referência, onde há uma predominância da componente resistiva, a amplitude desta componente foi obtida a partir do circuito de compensação, através da relação entre o sinal de tensão que aparece em R_V e o resistor R_{Sh} de medição do sinal da corrente que circula pelos varistores de ZnO. Os valores eficazes da componente resistiva da corrente e da potência foram obtidos por meio de um wattímetro marca YEW (YOKOGAWA) modelo 2503.

As características "tensão x corrente total", "tensão x componente resistiva da corrente", e "tensão x potência", foram obtidas para amplitudes de tensão de frequência industrial variando desde 0,424 kV_{Cr} a 4,24 kV_{Cr} , sobre 10 amostras de varistores de ZnO de um mesmo lote de produção, para as temperaturas ambiente, 60° e 100° C.

O efeito da temperatura sobre os valores médios da corrente total e de sua componente resistiva, em função da amplitude da tensão aplicada é mostrado na Figura 5.2.

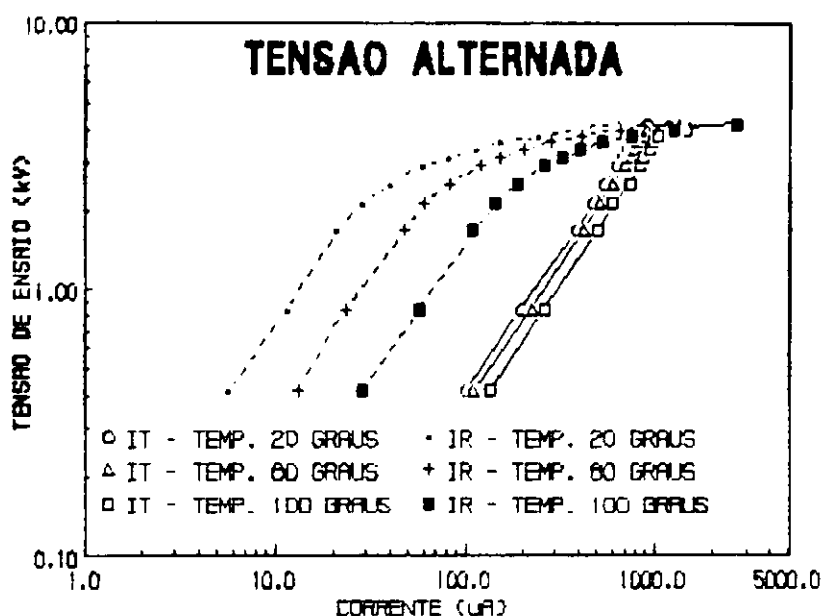


Figura 5.2- Efeito da temperatura sobre a corrente total e a sua componente resistiva sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)

Verifica-se a partir da Figura uma grande dependência da temperatura sobre a componente resistiva da corrente, para a região ensaiada. Para uma mesma tensão

aplicada, um aumento na temperatura acarreta em uma diminuição da resistividade dos varistores. Já para a corrente total, verifica-se uma menor dependência desta com a temperatura, se comparada com a componente resistiva. Esta menor dependência é explicada pelo fato de existir nesta região uma predominância da componente capacitiva sobre a resistiva. Portanto, apesar da grande variação verificada na componente resistiva da corrente, esta por ser de menor amplitude não acarreta em uma grande variação na corrente total. Por outro lado, o efeito da temperatura sobre a capacitância, descrito na seção 5.2.2, não provoca uma grande variação na componente capacitiva da corrente que, conforme descrito acima, predomina para a corrente total, nesta região.

A Figura 5.3, apresenta o efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre os valores médios de potência medidos sobre os varistores de ZnO.

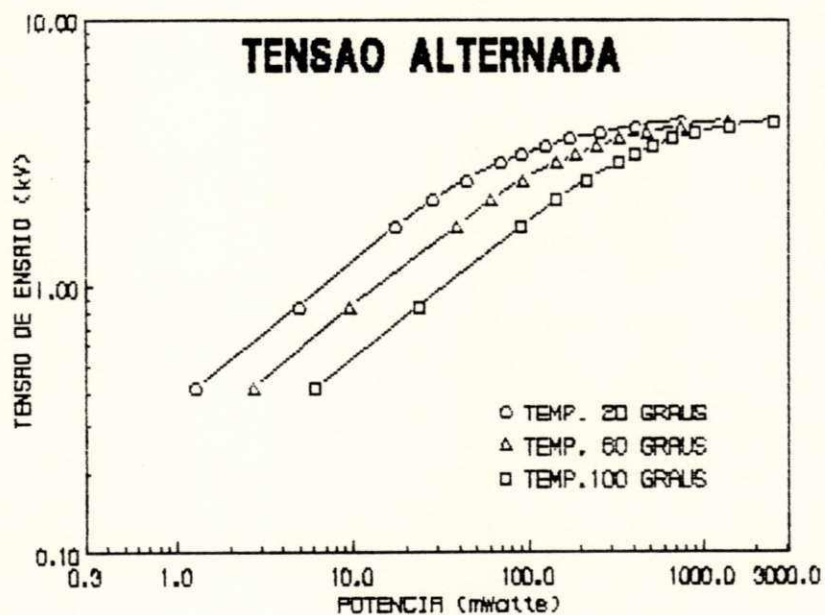
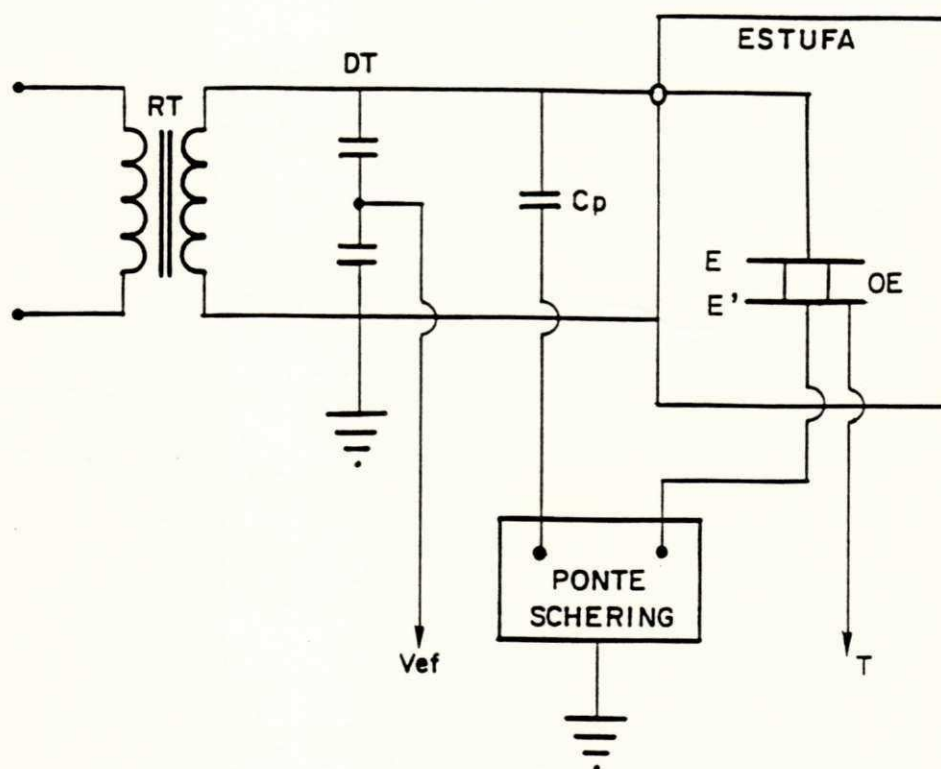


Figura 5.3- Efeito da temperatura sobre a potência dos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)

5.2.2 Medição da capacitância e da tangente de perdas sob aplicação de tensões alternadas de frequência industrial:

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado para a medição da capacitância e da tangente de perdas é mostrado na Figura 5.4.



RT - Fonte de tensão 0-8 kV; 2,55 MVA DT - Divisor de tensão
 C_p - Capacitor padrão OE - Objeto sob ensaio
 V_{ef} - Entrada do sinal de medição da tensão eficaz
 T - Termopares para medição da temperatura
 E e E' - Chapas de cobre utilizadas para reduzir a distorção do campo elétrico

Figura 5.4 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição da capacitância e da tangente de perdas nos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial

Para a medição da capacitância e da tangente de perdas utilizou-se uma ponte Schering marca TETTEX modelo 2801. As medições foram efetuadas para amplitudes de tensão de frequência industrial variando desde 0,424 kV a 4,24 kV, sobre 10 amostras de varistores de ZnO, previamente ensaiados conforme descrito em 5.2.1, para as temperaturas ambiente, 60° e 100° C.

O efeito da temperatura e da amplitude da tensão aplicada sobre os valores médios da capacitância é mostrado na Figura 5.5.

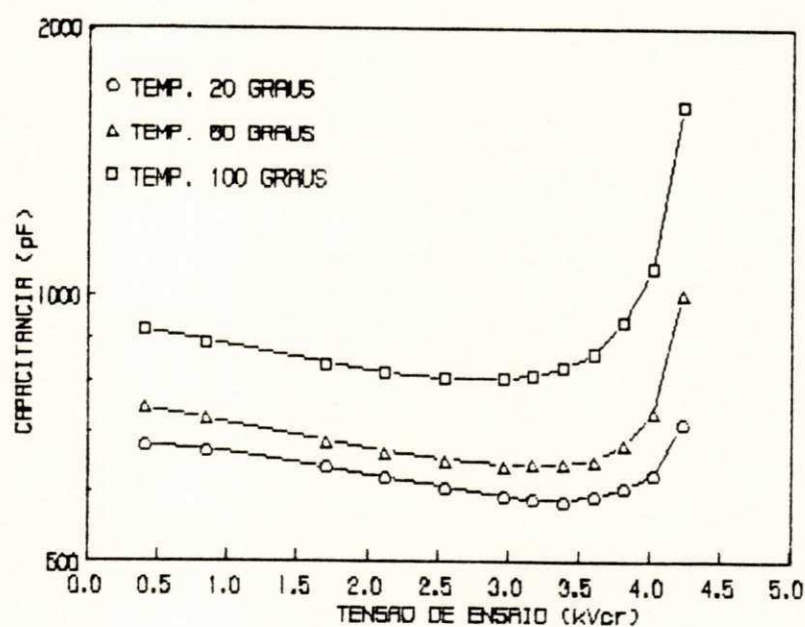


Figura 5.5- Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a capacitância sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)

Verifica-se a partir da Figura 5.5 que para uma mesma tensão aplicada, a capacitância das amostras aumenta com o aumento da temperatura. Com relação aos pontos obtidos para uma mesma temperatura, verifica-se até um certo nível de tensão uma pequena diminuição da capacitância com o aumento da tensão aplicada. Após este nível de tensão ser alcançado, a capacitância medida aumenta com o aumento da tensão aplicada. Para amplitudes de tensão próximas a tensão de referência, a capacitância se eleva bruscamente.

Uma ressalva deve ser feita com relação a validade da medição da capacitância. Conforme descrito em 3.3, a utilização da teoria dos dielétricos é válida para sistemas lineares, podendo ser aplicada para varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas. No entanto, para tensões próximas a tensão de referência dos varistores, onde a corrente total apresenta uma forma de onda não-senoidal, os valores obtidos para a capacitância e tangente de perdas devem ser apenas orientativos.

A Figura 5.6 apresenta o efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre os valores médios da tangente de perdas obtidos para os varistores de ZnO. Para uma mesma tensão aplicada, a tangente de perdas aumenta com o aumento da temperatura, enquanto que para uma mesma temperatura, a tangente de perdas aumenta com o aumento da tensão aplicada. O aumento da tangente de perdas com o aumento da temperatura e/ou da tensão aplicada pode ser explicado pela diminuição da resistividade do varistor. Da mesma forma que o exposto para a capacitância, os valores obtidos para a tangente de perdas na região próxima a tensão de referência, não devem ser considerados para fins de estudo.

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, apresentam a variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão aplicada para cada temperatura de ensaio, considerando para cada grandeza os valores médios obtidos dos ensaios.

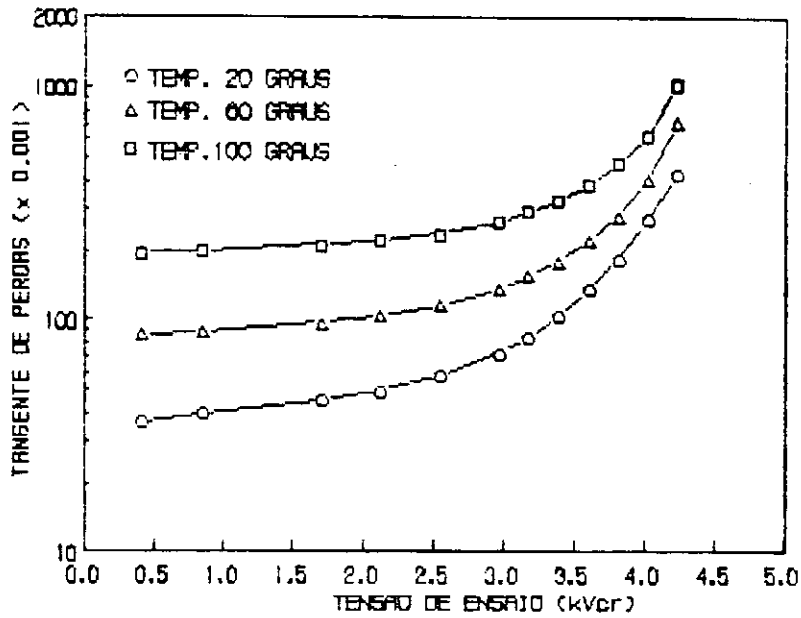


Figura 5.6- Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a tangente de perdas dos varistores de ZnO sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial (valores médios)

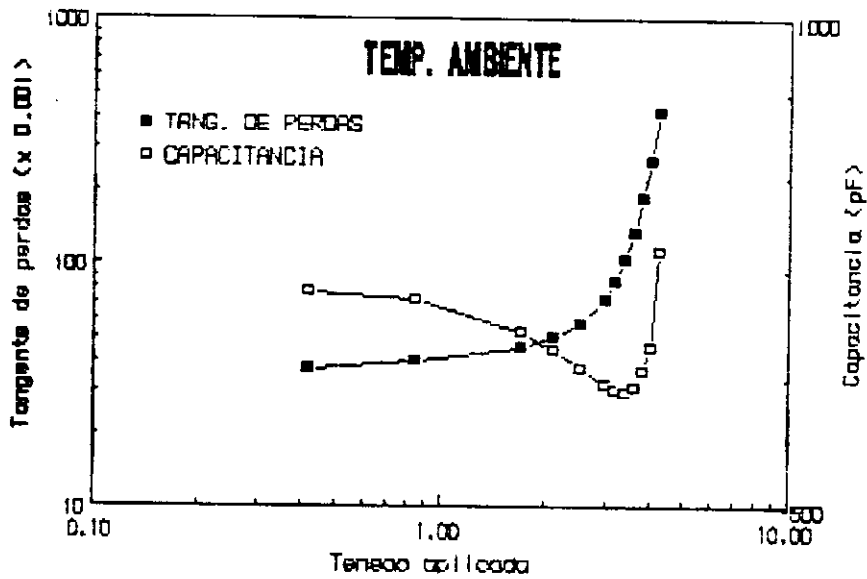


Figura 5.7- Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura ambiente

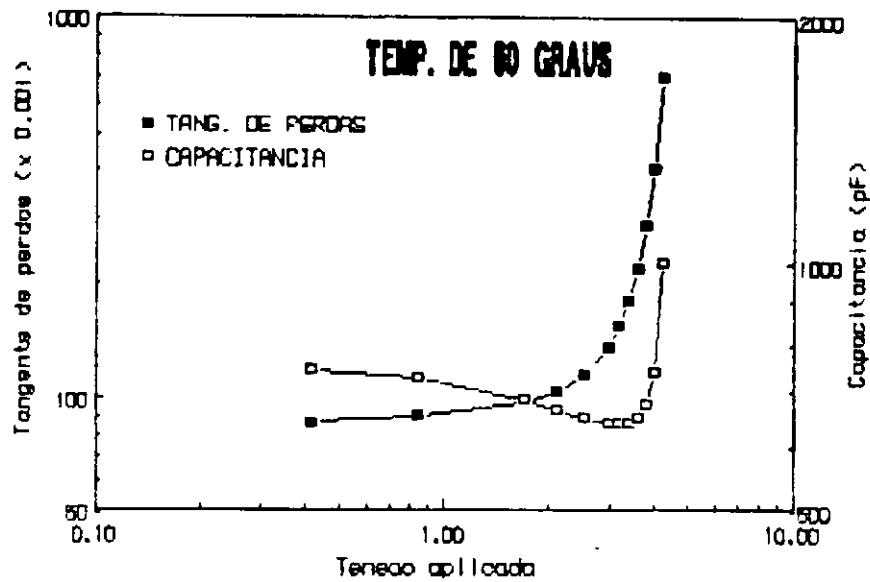


Figura 5.8- Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura de 60°C

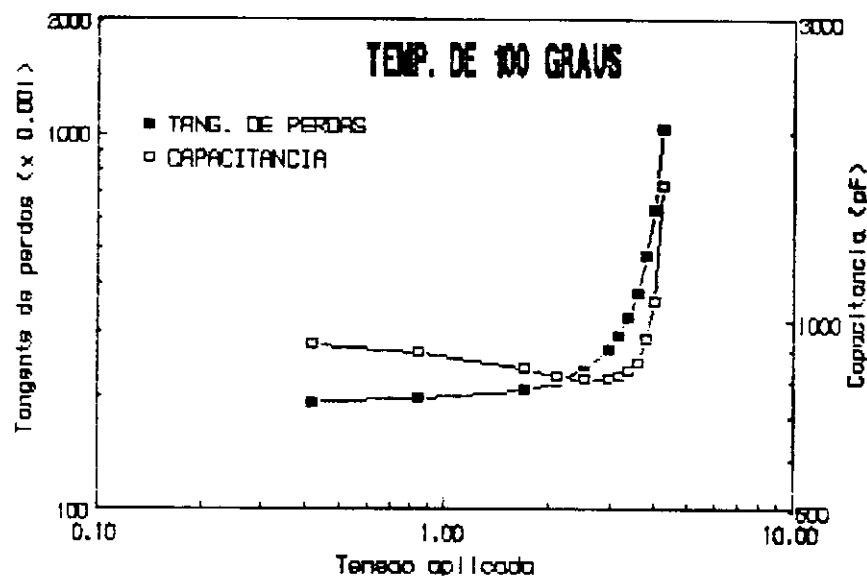
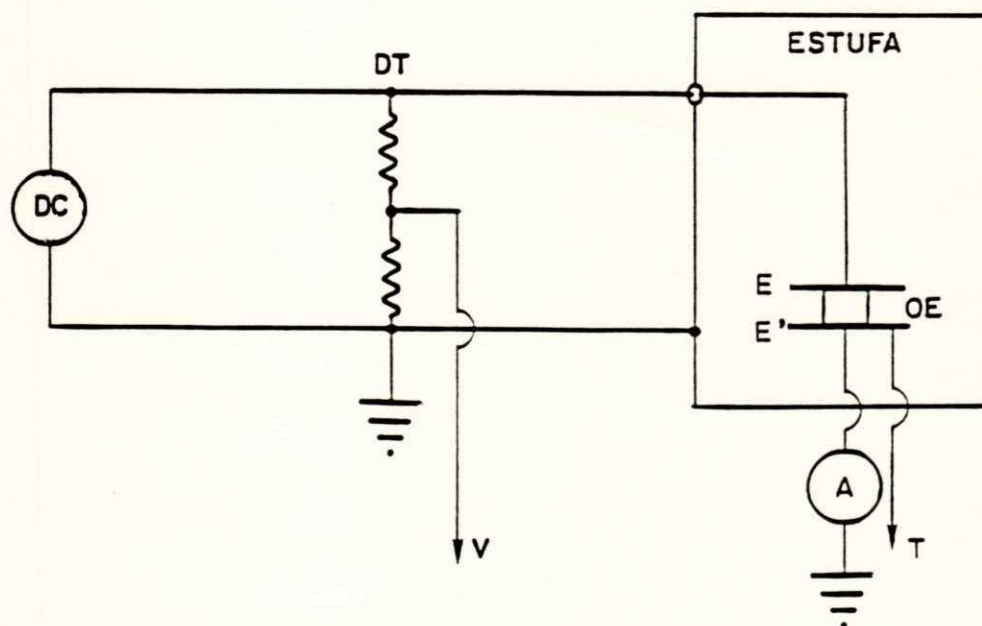


Figura 5.9- Variação da capacitância e da tangente de perdas com a tensão para a temperatura de 100°C

Os resultados obtidos para a capacitância e tangente de perdas, apresentados nas Figuras 5.5 a 5.9, estão consistentes com as informações descritas em 3.3.

5.2.3 Medição da corrente e potência dos varistores de ZnO sob aplicação de tensões contínuas, polaridades positiva e negativa:

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado para a medição de corrente nos varistores de ZnO, sob aplicação de tensões contínuas é mostrado na Figura 5.10.



DC - Fonte de tensão CC, 0-12 kV, 100 mA

DT - Divisor de tensão

OE - Objeto sob ensaio

V - Entrada do sinal de medição da tensão CC

A - Electrometer para medição da corrente CC

T - Termopares para medição da temperatura

E e E' - Chapas de cobre utilizadas para reduzir a distorção do campo elétrico

Figura 5.10- Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para medição da corrente em varistores de ZnO, sob aplicação de tensão contínua

Um filtro de capacitores de 20 μF foi utilizado para reduzir o efeito do ripple verificado na tensão contínua. A medição da corrente foi realizada por meio de um electrometer marca KEITHLEY INSTRUMENTS modelo 610 C. Medições de corrente foram efetuadas em ambas as polaridades, para amplitudes de tensão contínua variando desde 0,424 kV_{CC} a 4,24 kV_{CC} , sobre 10 amostras de varistores de ZnO previamente ensaiados conforme descrito nas seções 5.2.1 e 5.2.2, para as temperaturas ambiente, 60° e 100° C. A potência sobre os varistores foi calculada, para cada nível de tensão, pelo produto da tensão aplicada com a corrente média obtida a partir das medições efetuadas sobre as amostras ensaiadas.

De forma a reduzir o efeito de polarização nos varistores de ZnO ensaiados devido a aplicação de tensões contínuas, antes da troca de polaridade todas as amostras ensaiadas foram submetidas a aplicação por aproximadamente 30 minutos da máxima tensão contínua de operação sob frequência industrial, ou seja, 2,5 kV_{ef} .

Os efeitos da aplicação de tensão contínua e da temperatura sobre os valores médios de corrente nos varistores de ZnO, para ambas as polaridades são apresentados na Figura 5.11. Observa-se da Figura 5.11, um aumento na corrente com o aumento da temperatura, para uma mesma tensão aplicada. Por outro lado, o aumento da amplitude da tensão acarreta em um aumento na corrente, para uma mesma temperatura. Comparativamente, pode-se verificar que as curvas apresentadas na Figura 5.11 apresentam um comportamento similar àquelas apresentadas na Figura 5.2, seção 5.2.1, diferindo no entanto com relação as grandezas verificadas pelos efeitos da temperatura e da tensão sobre as correntes medidas.

Com relação ao efeito da polaridade, observa-se que para temperaturas ambiente e de 60°C, existe uma pequena predominância das correntes para a polaridade negativa. Já para temperaturas de 100°C, todos os varistores ensaiados apresentaram uma predominância para a polaridade positiva até uma faixa de tensão intermediária, a partir da qual prevelece novamente a polaridade negativa.

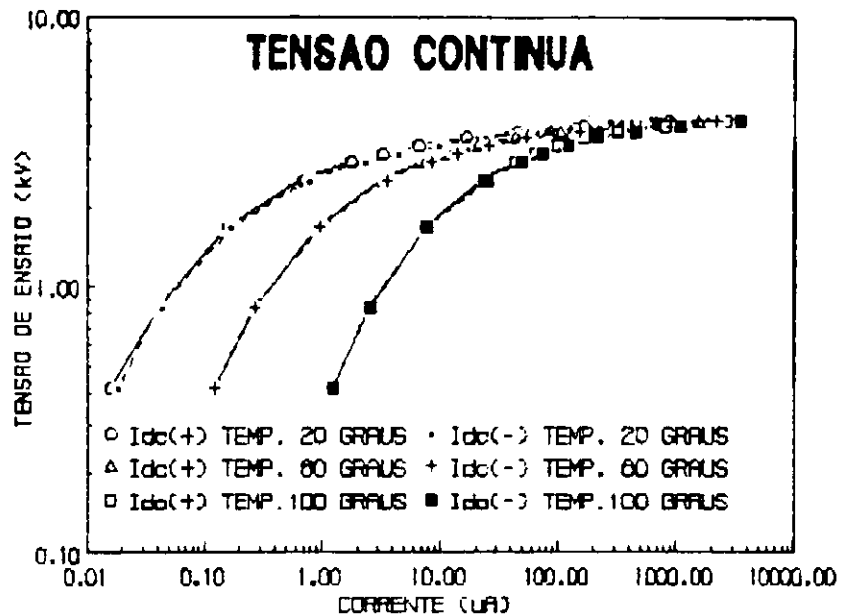


Figura 5.11- Efeito da temperatura sobre a corrente sob aplicação de tensão contínua (valores médios)

A variação da potência devido aos efeitos da tensão e temperatura, para as polaridades positiva e negativa é mostrada na Figura 5.12.

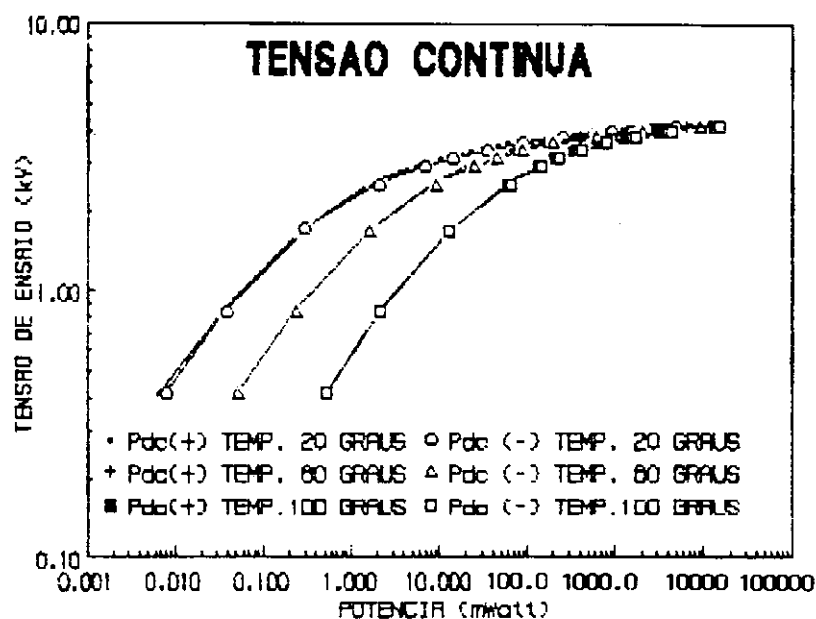


Figura 5.12- Efeito da temperatura sobre a potência dos varistores sob aplicação de tensão contínua (valores médios)

5.3 Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente nos varistores de ZnO

Um estudo mais detalhado da dependência da corrente com a temperatura na região de baixas correntes foi realizado a partir da aplicação de tensões contínuas e alternadas de frequência industrial, para faixas de temperatura variando desde a temperatura ambiente até 100°C. Para melhor compreensão e ordenação dos resultados, este estudo foi dividido em duas etapas:

- estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão contínua;
- estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão alternada de frequência industrial.

5.3.1 Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão contínua:

O circuito utilizado para a verificação da dependência da corrente com a temperatura, para tensões contínuas, bem como os procedimentos utilizados para medição e obtenção dos parâmetros foram os mesmos utilizados em 5.2.3.

Este estudo foi realizado sobre cinco amostras de varistores de ZnO novos, para uma faixa de temperatura variando desde a temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) até 100°C, em degraus de 10°C, para os níveis de tensão de 2,97kV, 3,40kV, 3,61kV e 4,24kV, este último a tensão nominal dos varistores ensaiados. As medições de corrente foram realizadas em ambas as polaridades. De forma a se obter valores de corrente estabilizados para cada faixa de temperatura e níveis de tensão aplicados, os varistores ensaiados foram mantidos energizados por cinco minutos. Uma exceção a metodologia empregada foi feita para o nível de tensão de 4,24kV com temperaturas superiores a 60°C, onde de forma a evitar uma variação na característica dos varistores ensaiados, fez-se a medição instantânea da corrente. Para cada degrau de temperatura ensaiado, foram realizadas medições de corrente para os quatro níveis de tensão. Durante a variação dos degraus de temperatura, os varistores ensaiados foram mantidos desenergizados.

De forma a reduzir o efeito de polarização dos varistores de ZnO devido a aplicação de tensão contínua, antes da troca de polaridade, os varistores ensaiados foram submetidos a aplicação por aproximadamente 30 minutos da máxima tensão contínua de operação de frequência industrial. No entanto, uma pequena assimetria entre as amplitudes dos semi-ciclos positivo e negativo da corrente ainda foi constatada.

Os resultados obtidos para um dado varistor são apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

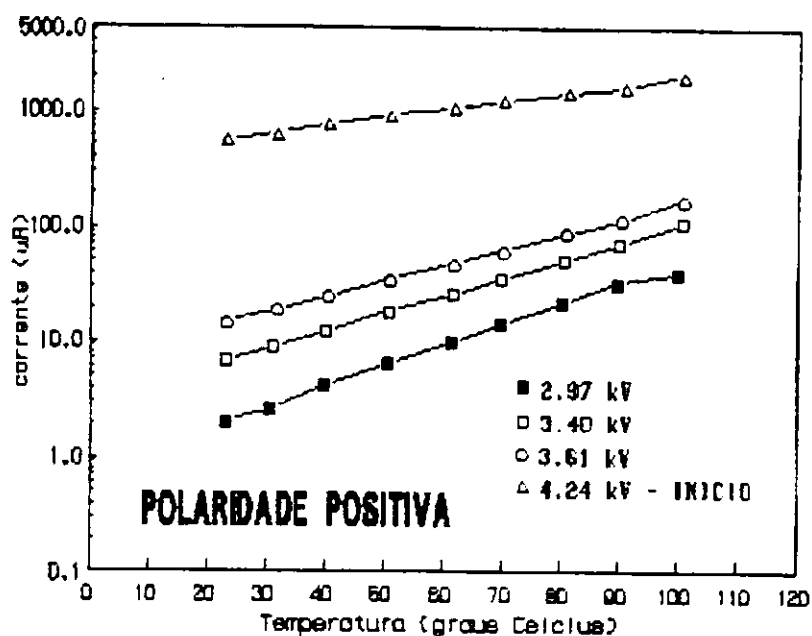


Figura 5.13- Variação da corrente com a temperatura sob aplicação de tensão contínua polaridade (+)

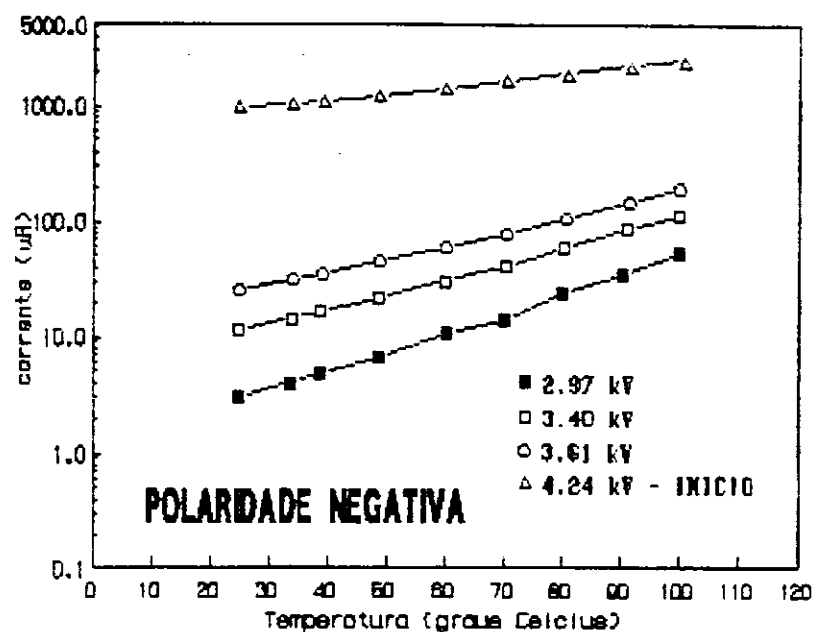


Figura 5.14- Variação da corrente com a temperatura sob aplicação de tensão contínua polaridade (-)

Dos resultados apresentados, pode-se constatar para ambas as polaridades uma dependência aproximadamente exponencial da corrente com a temperatura. Em todos os varistores ensaiados, observou-se uma tendência das correntes com polaridade negativa (Figura 5.14) serem ligeiramente superiores às correntes obtidas utilizando-se polaridade positiva (Figura 5.13). Esta diferença devido a polaridade, aumenta com o aumento do nível de tensão aplicado, e diminui com o aumento da temperatura.

5.3.2 Estudo do efeito da temperatura sobre a corrente para solicitações de tensão alternada de frequência industrial;

O circuito elétrico utilizado para a verificação da dependência da corrente total, de suas componentes resistiva e capacitiva e da potência com a temperatura, bem como os procedimentos de medição, foram os mesmos utilizados em 5.2.1.

O estudo foi realizado sobre quatro amostras de varistores de ZnO, para uma faixa de temperatura variando desde a temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) até 100°C, em degraus de 20°C. Para cada degrau de temperatura, foram realizadas medições para quatro níveis de tensão, com amplitudes de 2,55kV, 3,40kV, 3,61kV e 4,24kV, os dois últimos correspondentes a máxima tensão contínua de operação e a tensão nominal dos varistores ensaiados, respectivamente. Das quatro amostras utilizadas, duas foram submetidas aos ensaios descritos em 5.3.1, enquanto que as duas restantes não foram submetidas a quaisquer ensaios anteriores, além dos normalmente realizados pelo fabricante. A partir da escolha de duas diferentes condições para as amostras ensaiadas, foi possível verificar, através de comparação dos resultados obtidos,

que as duas amostras submetidas ao ensaio descrito em 5.3.1, não sofreram qualquer tipo de degradação.

As variações da corrente total e de sua componente resistiva com a temperatura, para uma dada amostra, são apresentadas nas Figuras 5.15 e 5.16 respectivamente, para os quatro níveis de tensão ensaiados.

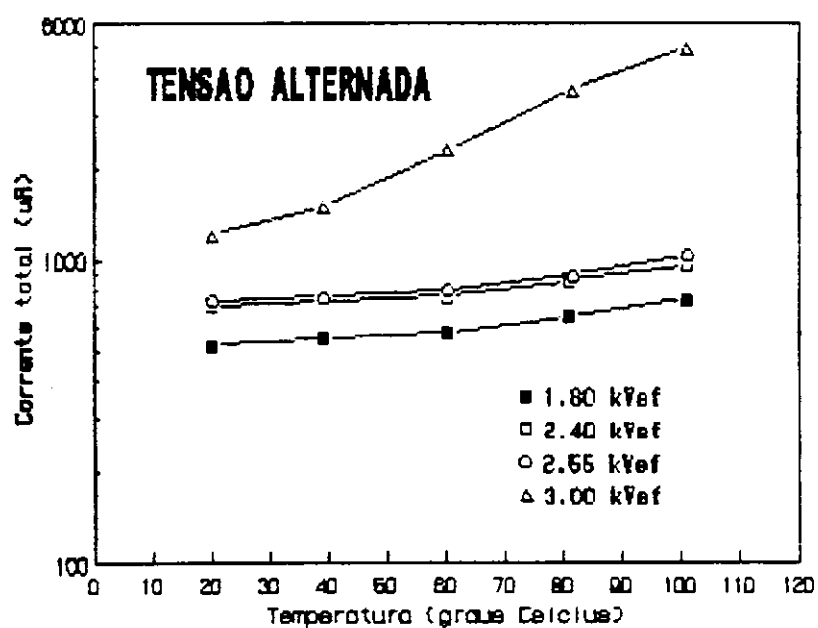


Figura 5.15- Variação da corrente total com a temperatura sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial

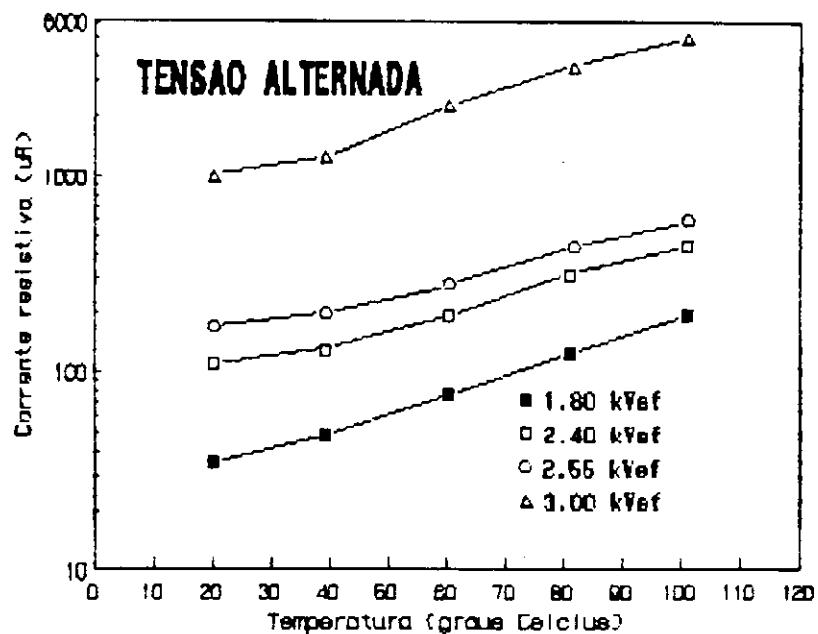


Figura 5.16- Variação da componente resistiva da corrente total com a temperatura sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial

Verifica-se a partir das Figuras uma variação aproximadamente exponencial para a corrente total e sua componente resistiva com a temperatura, sendo verificada uma maior dependência da componente resistiva da corrente com a temperatura para níveis de tensão até 3,61 kV, quando comparada à corrente total, confirmando o descrito anteriormente em 5.2.1. Para o nível de tensão de 4,24 kV, verifica-se para a corrente total uma dependência com a temperatura semelhante a verificada para a sua componente resistiva. Esta observação é facilmente explicável pelo fato de que nesta região existe a predominância da componente resistiva da corrente na composição da corrente total. Nesta faixa de tensão, para temperaturas de 80°C e acima foi verificado para todas as amostras ensaiadas amplitudes idênticas para a corrente total e sua componente resistiva.

É importante ser salientado que durante as medições na tensão de 4,24 kV, foi constatado o efeito da polarização na corrente total e sua componente, para todas as amostras ensaiadas, com predominância para o semi-ciclo negativo das correntes. Nestes casos, foi considerado para o traçado das curvas o valor da corrente que apresentou o semi-ciclo com a maior amplitude.

5.4 Efeito da frequência e temperatura sobre a capacitância, condutância e tangente de perdas dos varistores de ZnO

Os efeitos da variação da capacitância, da condutância e tangente de perdas nos varistores de ZnO com a frequência e temperatura foi verificado através de medições realizadas com um analisador de impedâncias modelo HP tipo 4192 A LF de 5 Hz a 13MHz. As medições foram realizadas sobre dez amostras de varistores de ZnO, na faixa de frequência de 60Hz a 3×10^6 Hz, sob aplicação de tensão alternada de 1 V_{ef} . O efeito da temperatura foi investigado através da medição dos parâmetros acima para temperaturas ambiente, 60° e 100° Celcius. Todas as curvas apresentadas nesta seção, foram obtidas considerando os valores médios da grandeza medida, para cada nível de tensão e temperatura utilizados nos ensaios. Os valores médios e seus respectivos desvios obtidos a partir das medições são apresentados nas Tabelas A2.10 a A2.12, no anexo B. Para medições com temperaturas de 60°C e 100°C, os varistores foram inseridos dentro de um modelo térmico e o conjunto (varistor de ZnO + modelo térmico) foi colocado em uma estufa e mantido até a estabilização da temperatura desejada. A temperatura do conjunto foi medida por meio de um termopar instalado em uma chapa de cobre, de espessura fina, conectada ao terminal inferior das amostras

ensaiadas. Ao atingir a temperatura desejada, o conjunto foi retirado da estufa, iniciando-se as medições. Durante as medições, a temperatura do conjunto não variou em mais do que - 3% da temperatura inicial.

De forma a verificar os possíveis efeitos do modelo térmico sobre as medições, foram realizadas, nas temperaturas de ensaio, medições de capacitância sobre o modelo térmico em vazio, para a faixa de frequência ensaiada. Também foram realizadas medições de condutância com o modelo térmico curto-circuitado, de forma a verificar o efeito das conexões sobre os valores medidos. Os resultados apresentados para as medições de capacitância sobre o modelo térmico a vazio (sem varistores), comparados com os valores médios obtidos dos ensaios são apresentados na Figura 5.17.

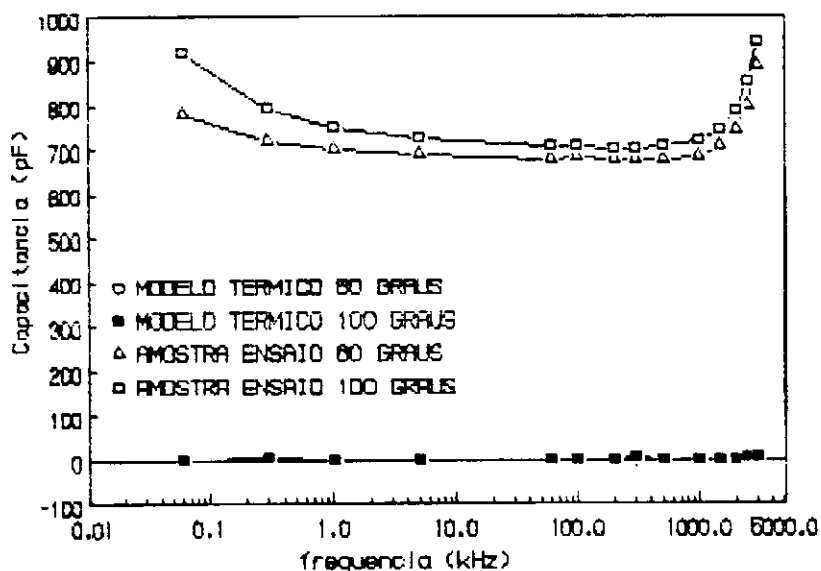


Figura 5.17- Verificação da influência do modelo térmico na medição da capacitância para temperaturas de 60 e 100°C

A partir dos resultados apresentados na Figura, pode-se assegurar que a utilização do modelo térmico não provocou efeitos sobre as medições realizadas.

Os valores médios obtidos para cada nível de frequência são apresentados nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, as quais apresentam as variações da capacitância, da resistência e da tangente de perdas, respectivamente, em função da frequência e temperatura. A tangente de perdas foi determinada pela relação direta, utilizando-se o modelo paralelo.

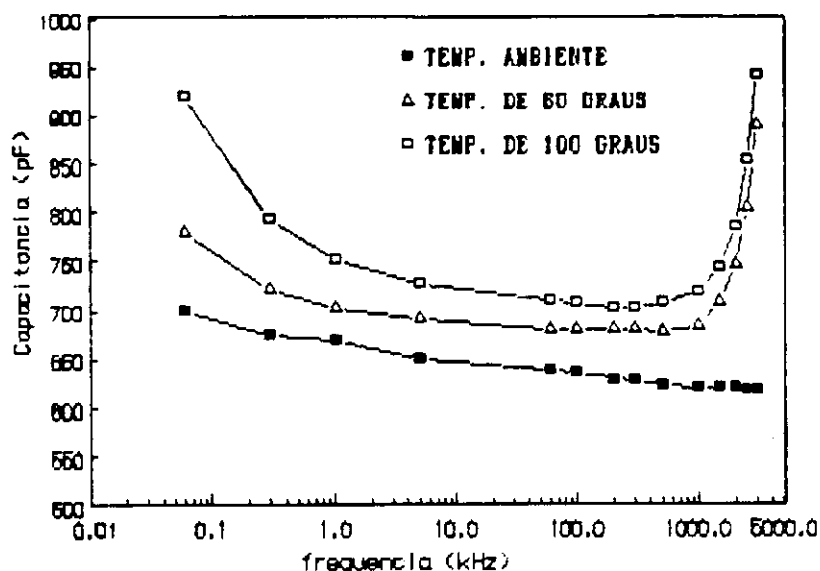


Figura 5.18- Efeito da frequência e da temperatura sobre a capacitância dos varistores de ZnO (valores médios)

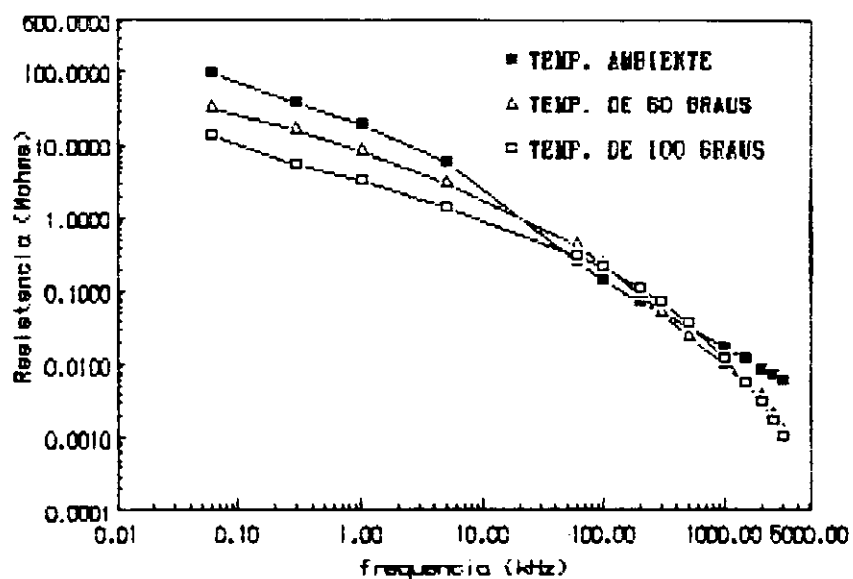


Figura 5.19- Efeito da frequência e da temperatura sobre a resistência dos varistores de ZnO (valores médios)

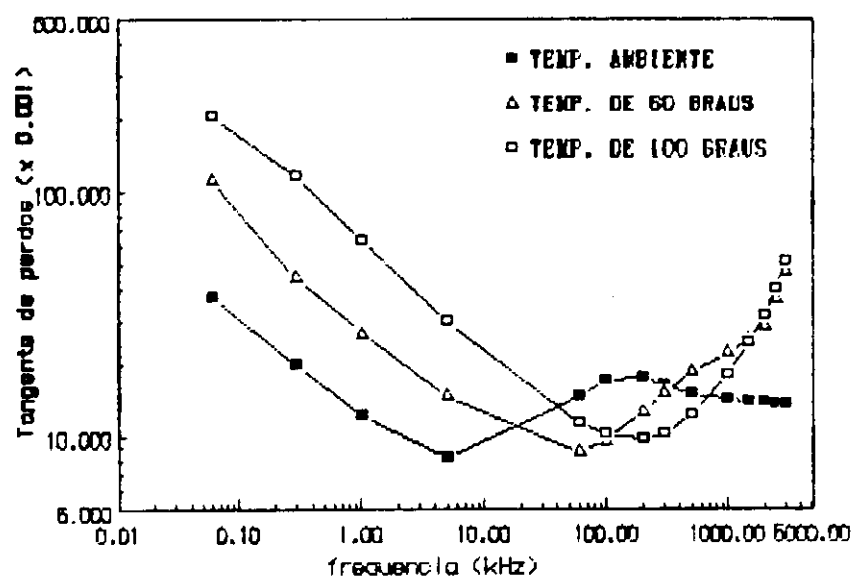


Figura 5.20- Efeito da frequência e da temperatura sobre a tangente de perdas dos varistores de ZnO (valores médios)

Da Figura 5.18, pode-se verificar que para uma dada frequência, a capacitância aumenta com a temperatura. Com relação as curvas obtidas, verifica-se para todas as temperaturas, uma diminuição da capacitância com o aumento da frequência, até uma dada frequência f_1 , a partir da qual a capacitância tende a estabilizar o seu valor, aumentando posteriormente com o aumento da frequência, a partir de uma certa frequência f_2 . Os resultados experimentais apresentaram a frequência f_1 em uma faixa de frequência próxima a 60 kHz, para temperaturas de 60 e 100°C, e na faixa de 1,5 MHz, para a temperatura ambiente. Para temperaturas de 60 e 100°C, verifica-se a partir da faixa entre 500 kHz a 1MHz um aumento da capacitância com o aumento da frequência. Para a temperatura ambiente, este efeito começa a ser verificado a partir de uma faixa de frequência compreendida entre 2 e 3 MHz.

Da Figura 5.19, verifica-se para uma dada frequência uma diminuição da resistência dos varistores com o aumento da temperatura até a frequência de 5 kHz, a partir da qual há uma tendência da resistência ser menor para menores temperaturas. A tendência das curvas verificadas para frequências de até 5 kHz é novamente observada a partir da frequência de aproximadamente 1 MHz. No entanto, verifica-se para estas frequências elevadas, que os valores de resistência obtidos a 60 e 100°C são aproximadamente os mesmos, o que demonstra uma menor dependência das temperaturas mais elevadas para a resistência, na região de altas frequências. Com relação a variação da resistência com a frequência para uma dada temperatura, observa-se uma diminuição da resistência com o aumento da frequência.

Com relação a variação da tangente de perdas com a frequência e temperatura, observa-se a partir da Figura 5.20 que para uma dada temperatura a tangente de perdas dos varistores diminui com o aumento da frequência até uma dada

frequência f_1 , a partir da qual a tangente de perdas aumenta com o aumento da frequência até uma frequência f_2 . Para frequências superiores a f_2 , a tangente de perdas diminui novamente com o aumento da frequência, até uma certa frequência f_3 . Do exposto acima, pode-se constatar que a tangente de perdas apresenta pontos de mínimo e máximo. As frequências f_1 , f_2 , f_3 e etc, correspondentes aos pontos de mínimo e máximo são menores quando os varistores de ZnO são submetidos a temperaturas menores. Para a temperatura ambiente, por exemplo, o primeiro ponto de mínimo foi verificado para uma frequência na faixa de aproximadamente 5 kHz. Já para temperaturas de 60°C e 100°C, estes primeiros pontos de mínimo foram observados para frequências na faixa de aproximadamente 60 kHz e 200 kHz, respectivamente.

Para uma dada frequência, observa-se que até a ocorrência do primeiro ponto de mínimo, as perdas foram menores quando os varistores foram submetidos a menores temperaturas.

Para uma melhor visualização do efeito da temperatura na resposta dos parâmetros dos varistores de ZnO com a frequência, são apresentadas a seguir as Figuras 5.21 a 5.26, nas quais verifica-se os comportamentos dos valores médios da capacitância e tangente de perdas e da resistência e tangente de perdas, em função da frequência, para as temperaturas ambiente, 60°C e 100°C.

Das Figuras apresentadas, o deslocamento do primeiro ponto de mínimo da tangente de perdas em função da temperatura fica bem evidenciado. O aumento da tangente de perdas com o aumento da temperatura até as faixas de frequência nas quais ocorrem os pontos de mínimo também é verificado a partir das Figuras. No entanto, uma relação direta entre o comportamento da tangente de perdas e os pontos de mínimo com a capacitância e resistência, para uma dada temperatura não pode ser verificado.

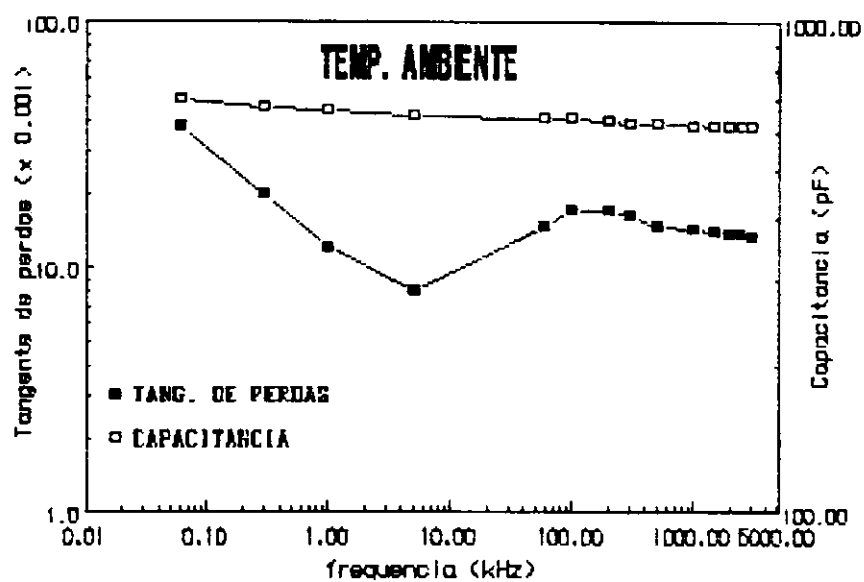


Figura 5.21- Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura ambiente

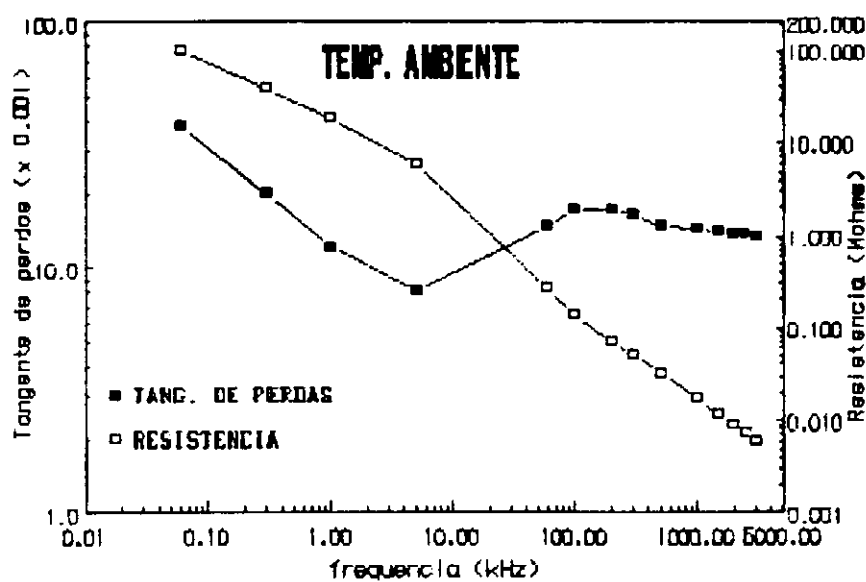


Figura 5.22- Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura ambiente

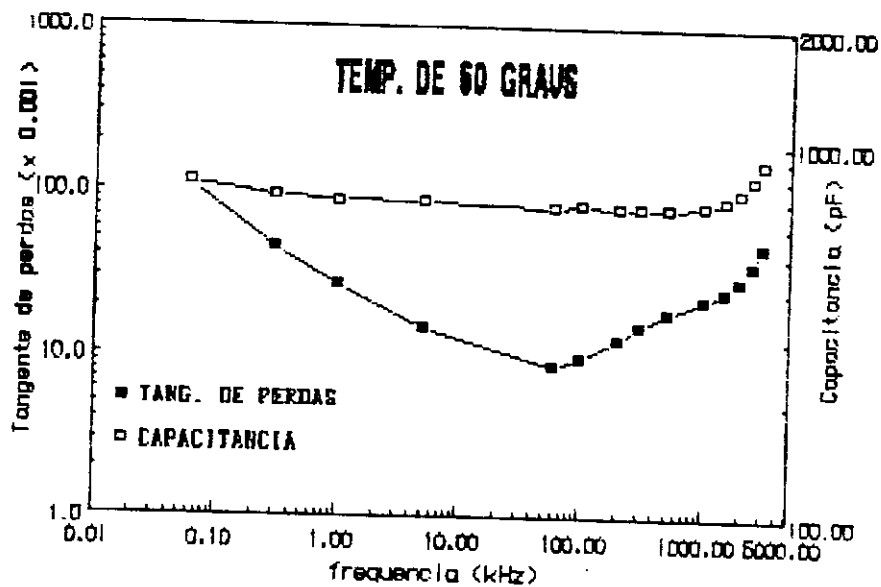


Figura 5.23- Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 60°C

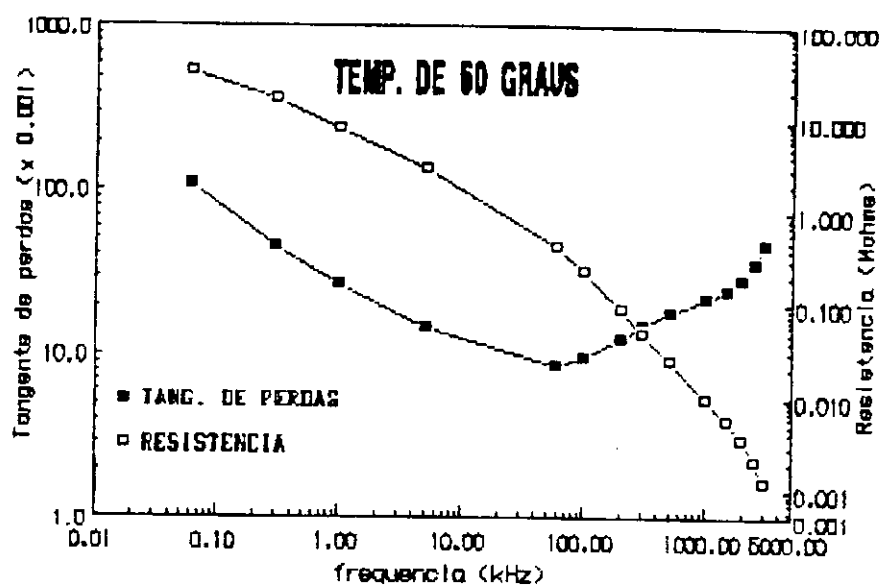


Figura 5.24- Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 60°C

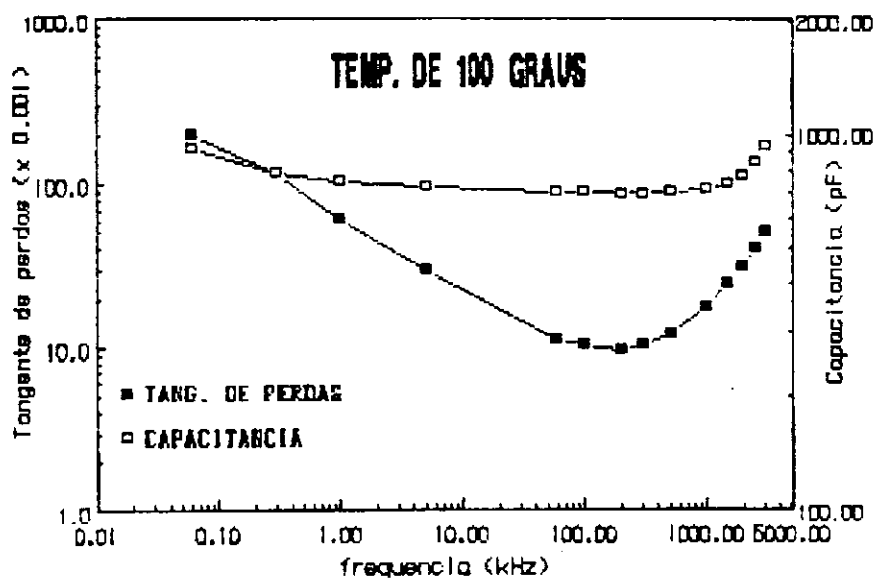


Figura 5.25- Variação da capacitância e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 100°C

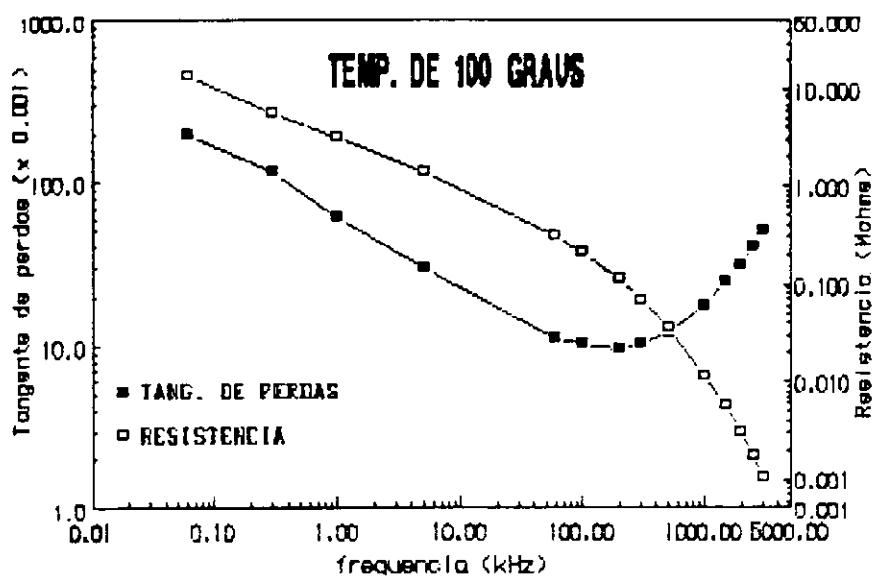


Figura 5.26- Variação da resistência e tangente de perdas com a frequência a temperatura de 100°C

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um dos aspectos importantes no estudo dos varistores de ZnO é entender como a resistividade da fronteira entre os grãos varia com o tipo de solicitação de tensão e temperatura. É sabido que o transporte de corrente pelas fronteiras entre os grãos de ZnO aumenta com o aumento da tensão aplicada ou da temperatura. O aumento da corrente com o aumento da tensão aplicada está relacionado com a redução da altura das barreiras de potencial, também conhecida por energia de ativação. A dependência com a temperatura é devido a excitação térmica. Neste capítulo faz-se uma análise das propriedades elétricas e dielétricas dos varistores de ZnO a partir dos resultados apresentados no capítulo 5, combinado com a teoria descrita no capítulo 3. Para uma melhor ordenação das idéias, este estudo será apresentado em duas seções distintas: a primeira analisando o comportamento dos varistores quando solicitados por tensões contínuas e a segunda para tensões alternadas.

6.1 Análise das propriedades dos varistores de ZnO quando da aplicação de tensão contínua

Conforme apresentado em 4.1, relação entre a tensão e a corrente para os varistores de ZnO quando submetidos a solicitações de tensões contínuas é dada por:

$$Z_{EQ} = R_{CI}(V, T) = \frac{E \cdot h}{J \cdot S} \quad (6.1)$$

onde: E é o campo elétrico aplicado
 J é a densidade de corrente
 h é a espessura do varistor
 S é a área do varistor
 R_{CI} é a resistência da região de fronteira dos grãos, variável com a tensão aplicada e temperatura

O efeito da temperatura sobre a resistência da fronteira entre os grãos (R_{CI}) de um dado varistor para diferentes solicitações de tensão contínua, pode ser verificado a partir dos resultados experimentais apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14, seção 5.3.1. Verifica-se destas Figuras, para ambas as polaridades uma relação exponencial entre a corrente e a temperatura. Uma vez que a resistência CC é obtida pela relação entre a tensão e a corrente, ou seja, é proporcional a corrente, verifica-se a existência de uma relação exponencial da resistência com a temperatura, descrita por Matsuoka e apresentada na equação (3.1). Baseado nesta equação, a altura da barreira de potencial ϕ pode ser obtida a partir da inclinação da curva $\ln R \times 1/T$, através da relação:

$$B = \frac{\ln(R_2/R_1)}{1/T_2 - 1/T_1} \quad (6.2)$$

$$B = \frac{\phi \cdot q}{K} \quad \rightarrow \quad \phi = \frac{K \cdot B}{q} \quad (6.3)$$

A partir da determinação de ϕ , a constante R_0 pode ser obtida por:

$$R_{CI} = R_0 \exp(q\phi/KT)$$

$$\ln R_{CI} = \ln R_0 + \frac{q\phi}{KT} \rightarrow R_0 = \exp(\ln(R_{CI}) - q\phi/KT) \quad (6.4)$$

R_0 em Ω

O efeito do campo elétrico aplicado sobre a resistência CC do varistor para as polaridades positiva e negativa é mostrado nas Figuras 6.1 e 6.2, respectivamente, para diferentes temperaturas. As curvas foram obtidas a partir dos valores médios de corrente, para cada nível de tensão e temperatura, sobre os dez varistores ensaiados.

Observa-se das Figuras 6.1 e 6.2, para ambas as polaridades, uma redução de resistência do varistor com aumento da tensão aplicada para uma mesma temperatura, evidenciando uma variação da altura das barreiras de potencial ϕ com a tensão aplicada. Desta forma, pode-se constatar que um aumento na tensão aplicada acarreta em uma redução na altura das barreiras de potencial.

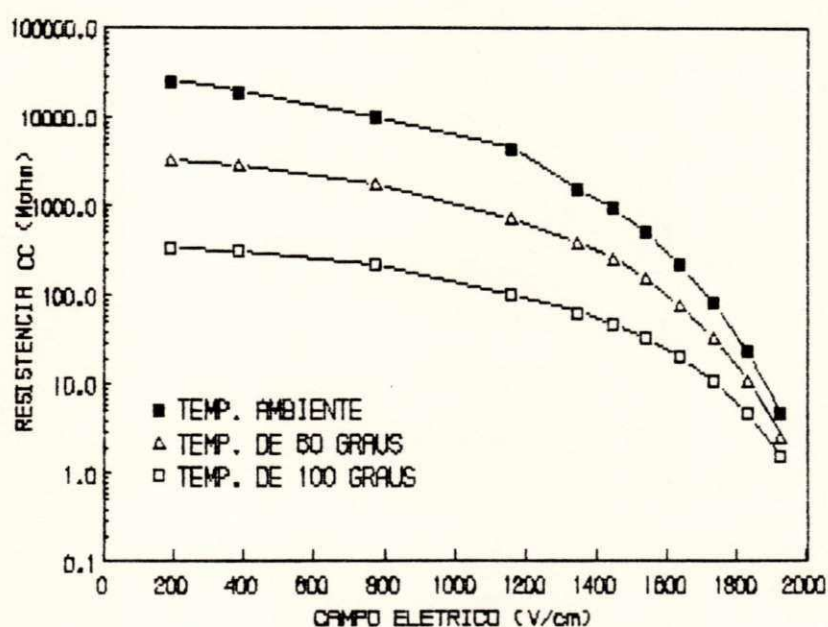


Figura 6.1 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a resistência CC, polaridade positiva

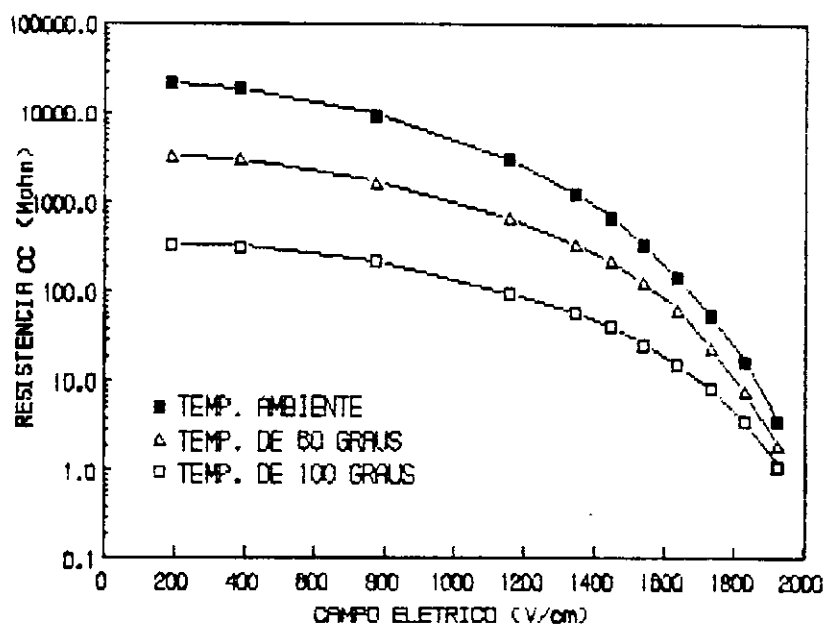


Figura 6.2 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a resistência CC, polaridade negativa

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2, a altura da barreira de potencial e a constante R_0 , podem ser determinadas utilizando-se as equações 6.2 a 6.4.

O efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura da barreira de potencial dos varistores de ZnO, para tensões contínuas, é apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. Estas Figuras apresentam a curva média, obtida a partir dos valores médios e as curvas mínimas e máximas, obtidas a partir do desvio-padrão de R para cada nível de tensão e temperatura, considerando um intervalo de confiança estatístico de 99%.

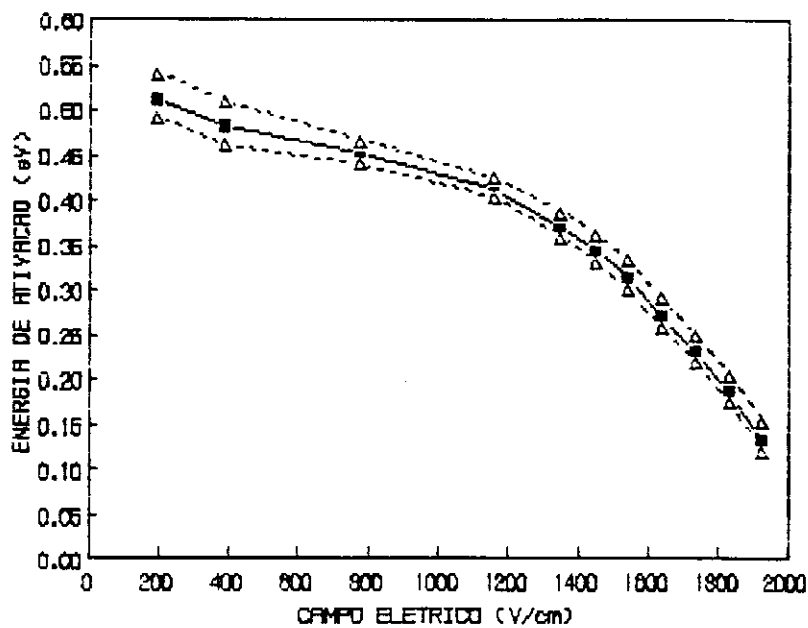


Figura 6.3 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura da barreira de potencial do varistor de ZnO, polaridade positiva

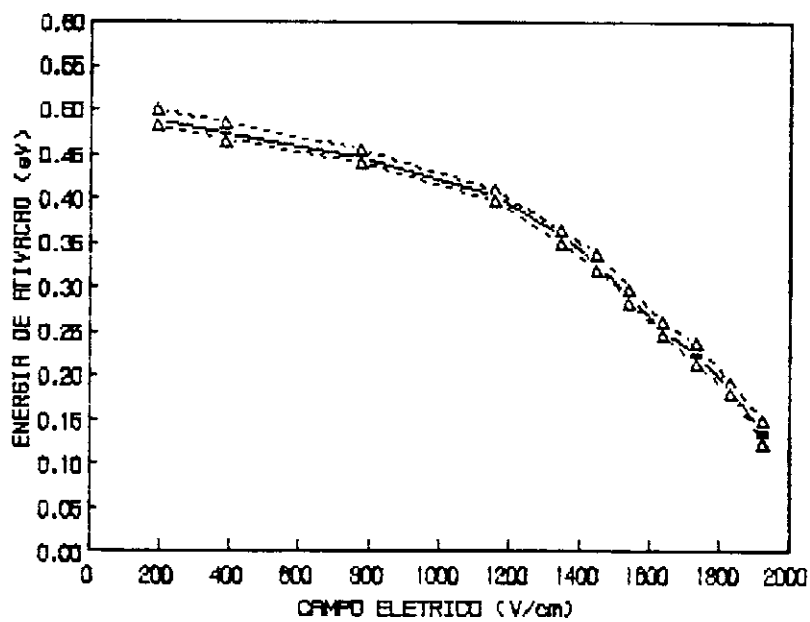


Figura 6.4 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura da barreira de potencial do varistor de ZnO, polaridade negativa

A partir destas Figuras, verifica-se a dependência da altura das barreiras de potencial com o campo elétrico aplicado, na qual um aumento do campo elétrico acarreta em uma redução na altura da barreira de potencial. Por outro lado, a dependência da temperatura com a altura da barreira de potencial é muito pequena, podendo ser desprezada.

A Figura 6.5, apresenta os valores médios da altura das barreiras de potencial em função do campo elétrico E , obtidos para ambas as polaridades.

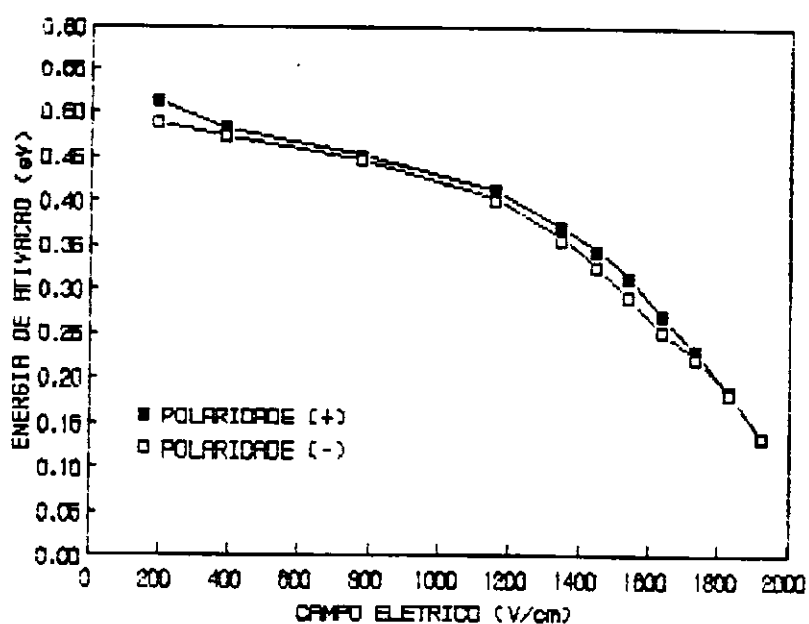


Figura 6.5 - Efeito do campo elétrico aplicado sobre a altura das barreiras de potencial

Observa-se desta Figura uma maior energia de ativação para a polaridade positiva até as proximidades do campo elétrico equivalente à tensão de referência, fato que explica maiores correntes para a polaridade negativa quando comparada com os valores obtidos para polaridade positiva.

O efeito do campo elétrico aplicado sobre a constante R_0 , obtido para cada temperatura e o seu valor médio, são apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7, para ambas as polaridades. Verifica-se das Figuras, que o efeito da temperatura sobre R_0 é pequeno, podendo ser desprezado. A comparação entre os valores médios para as duas polaridades, apresenta menores valores de R_0 para a polaridade positiva, até as proximidades da tensão de referência.

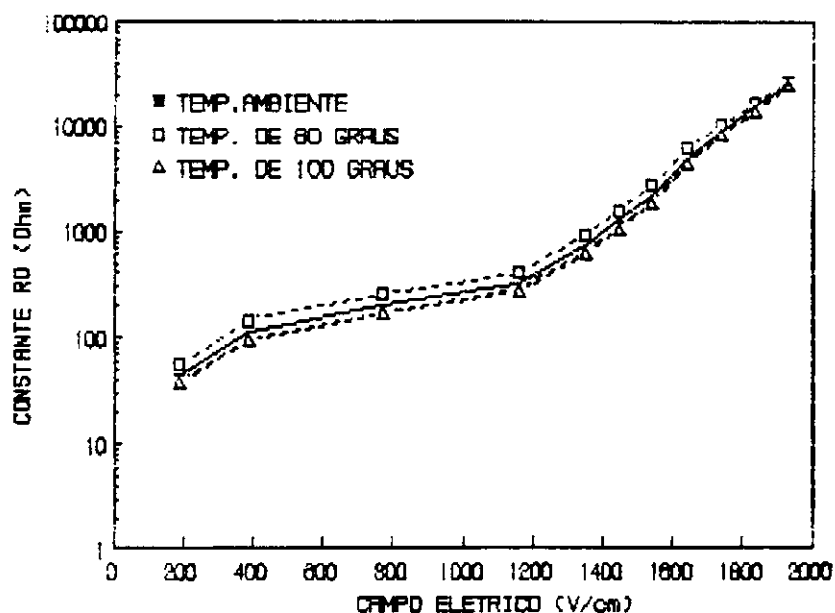


Figura 6.6 - Efeito do campo elétrico CC aplicado sobre a constante R_0 , polaridade positiva

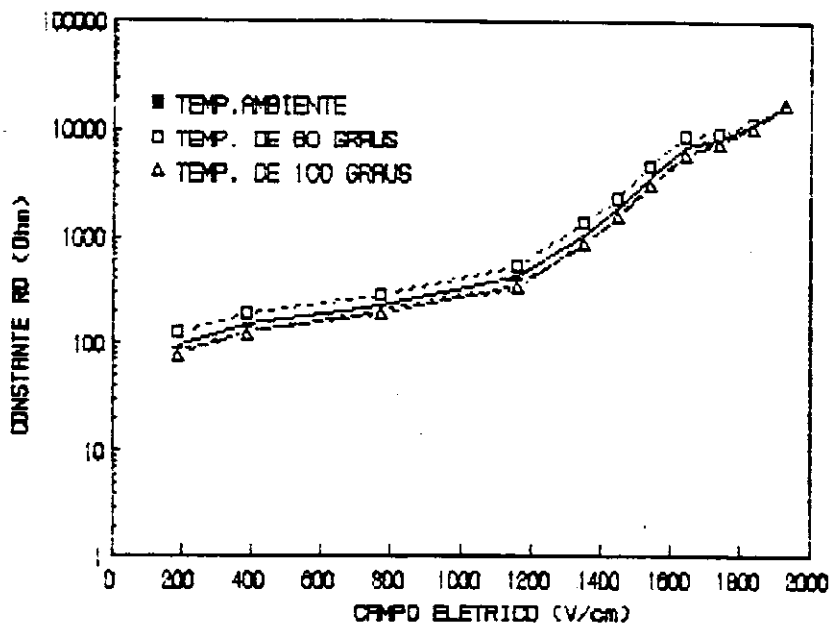


Figura 6.7 - Efeito do campo elétrico CC aplicado sobre a constante R_0 , polaridade negativa

Uma vez conhecida a dependência do campo elétrico aplicado com altura das barreiras de potencial e com a constante R_0 , para um determinado tipo de varistor, é possível obter-se a variação da resistividade com a temperatura e com o campo elétrico, para uma dada solicitação de tensão contínua, na região de baixas tensões aplicadas.

Desta forma, a densidade de corrente pode ser obtida diretamente pela relação:

$$J(V, T) = \frac{V}{R_{CI}(V, T) \cdot S}$$

$$J(V, T) = \frac{V}{R_0(V) \cdot \exp(q\phi/KT) \cdot S}$$

$$J(V,T) = \frac{V}{R_0(V).S} \cdot \exp(-q\phi/KT) = J_0(V) \cdot \exp(-q\phi/KT) \quad (6.5),$$

onde $J_0(V) = V/R_0(V).S$ é a constante para a densidade de corrente (A/cm^2), $R_0(V)$ é a constante para a resistência (Ω) e V é a tensão CC aplicada. S é a área efetiva do varistor.

Da mesma forma, a potência dissipada pelo varistor pode ser calculada por:

$$P(V,T) = V.I(V,T) = V.J(V,T).S$$

$$P(V,T) = V.S.J_0(V)\exp(-q\phi/KT) = \frac{V^2}{R_0(V)} \exp(-q\phi/KT) \quad (6.6)$$

Com base nas equações (6.5) e (6.6), pode-se constatar a validade da obtenção dos parâmetros elétricos dos varistores de ZnO, sobre toda a região de baixas tensões aplicadas quando solicitados por tensões contínuas, uma vez conhecida a dependência da altura das barreiras de potencial com o campo elétrico aplicado. A dependência da constante R_0 , ou J_0 , com o campo elétrico aplicado pode ser obtida através de alguns poucos resultados experimentais.

6.2 - Análise das propriedades dos varistores de ZnO quando da aplicação de tensão alternada

De forma similar a solicitações de tensão contínua, a resistência do varistor de ZnO, no instante da crista da tensão, sob aplicação de tensões alternadas pode ser obtida por:

$$R_{CI}(V, T, f) = \frac{V_{CA}}{I_{RES}(V, T, f)} \quad (6.7)$$

onde V_{CA} é o valor de crista da tensão alternada e I_{RES} é o valor de crista da componente resistiva da corrente, dependente da tensão aplicada, temperatura e frequência.

De forma similar ao verificado para solicitações de tensão contínua, a Figura 5.16 apresentada em 5.3.2, retrata com uma boa aproximação a dependência exponencial da componente resistiva da corrente com a temperatura, para diferentes solicitações de tensão alternada. Uma vez que R_{CI} é proporcional a I_{RES} , a resistência também apresenta uma dependência exponencial com a temperatura.

A dependência do campo elétrico aplicado sobre a altura das barreiras de potencial e a constante R_0 , para solicitações de tensão alternada de frequência industrial é apresentada nas Figuras 6.8 e 6.9. Estas curvas foram obtidas utilizando-se os mesmos procedimentos descritos em 6.1, a partir dos resultados experimentais apresentados na Figura 5.2, seção 5.2.1. Da Figura 6.8, verifica-se que os níveis de altura das barreiras de potencial quando da aplicação de um campo elétrico CA, são bem menores do que os obtidos para campos elétricos CC, apresentados nas Figuras 6.5 a 6.7, o que evidencia um mecanismo de condução de corrente diferente para solicitações de tensões CA e CC. Analogamente à seção anterior, ϕ e R_0 foram considerados como sendo parâmetros independentes da temperatura.

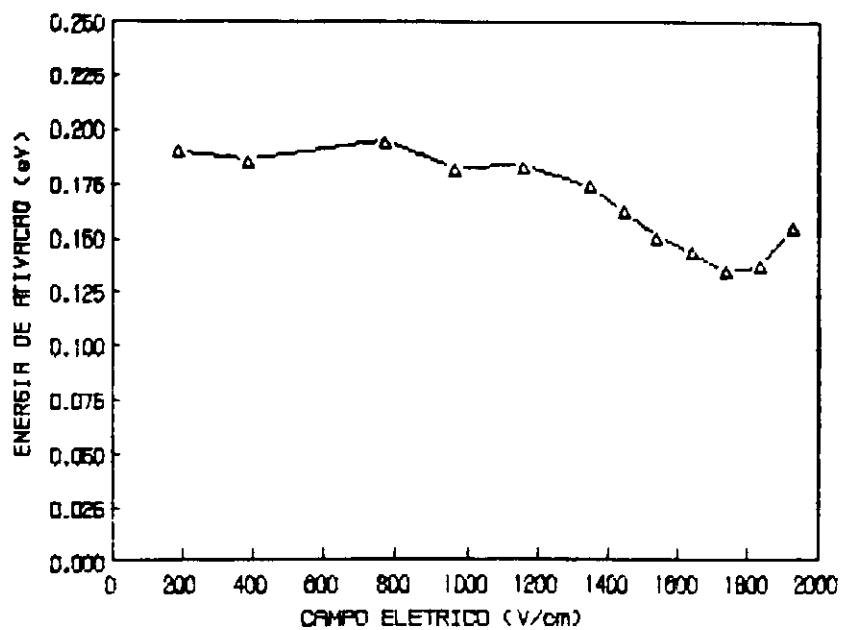


Figura 6.8 - Efeito do campo elétrico sobre a altura da barreira de potencial para solicitações de tensão alternada de frequência industrial

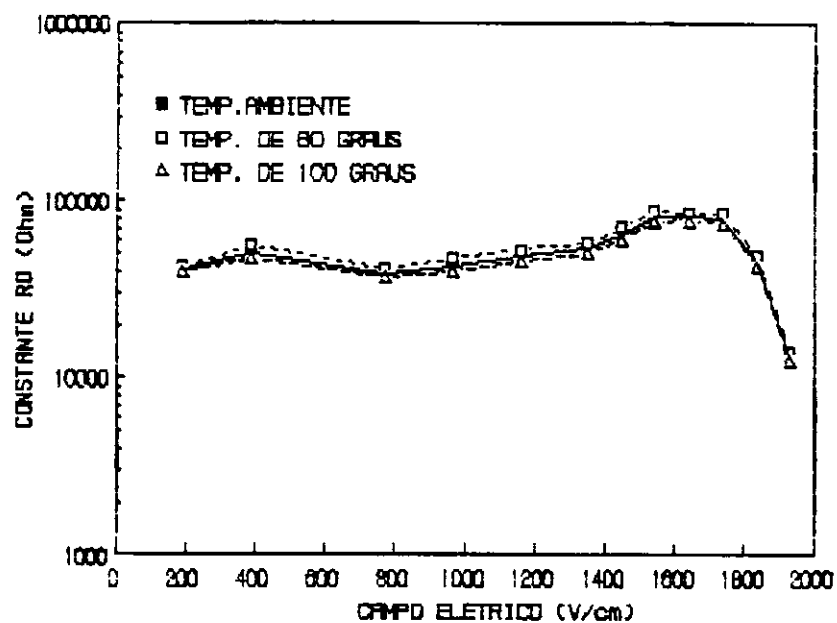


Figura 6.9 - Efeito do campo elétrico sobre a constante R_0 para solicitações de tensão alternada de frequência industrial

Um aspecto importante a ser destacado com relação ao comportamento dos varistores de ZnO nesta região de operação, é que a resistência destes varistores quando da aplicação de tensões alternadas de frequência industrial é menor do que a resistência CC, para uma mesma intensidade de campo elétrico aplicado. De forma a se verificar as diferentes propriedades dos varistores de ZnO quando submetidos a aplicação de tensões alternadas e contínuas, são apresentadas curvas obtidas a partir dos ensaios realizados, cujos resultados estão apresentados nas seções 5.2.1 e 5.2.3. Para fins de comparação dos parâmetros obtidos, foi tomado como base de referência para a tensão, valores de crista. As Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 mostram comparativamente o comportamento dos valores médios das correntes CC e da componente resistiva da corrente em frequência industrial, obtidos sobre dez amostras de varistores de ZnO, para diferentes amplitudes de tensão as temperaturas ambiente, 60°C e 100°C, respectivamente.

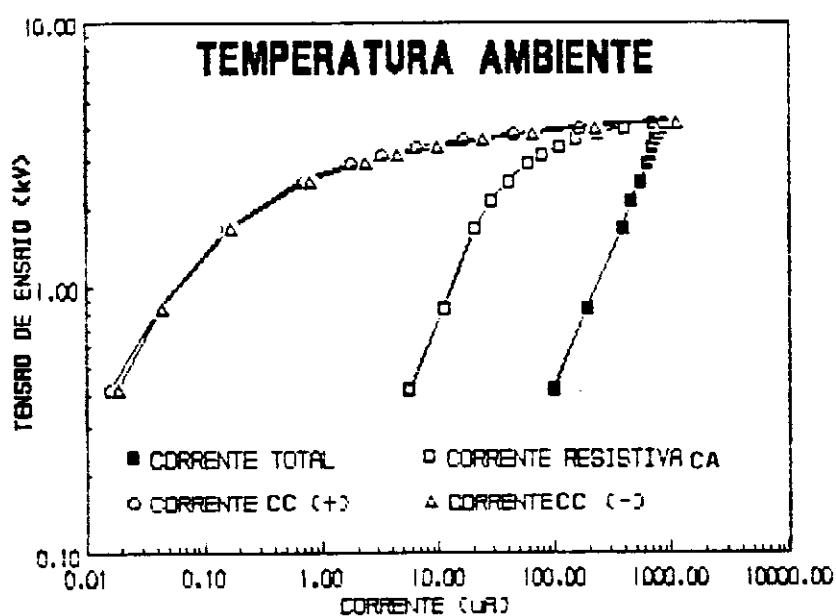


Figura 6.10- Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura ambiente.

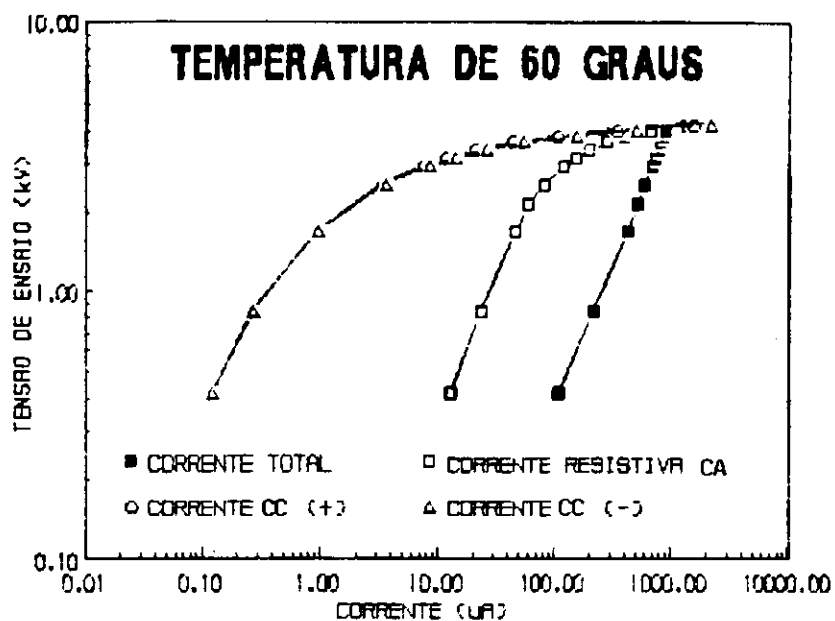


Figura 6.11- Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura de 60°C

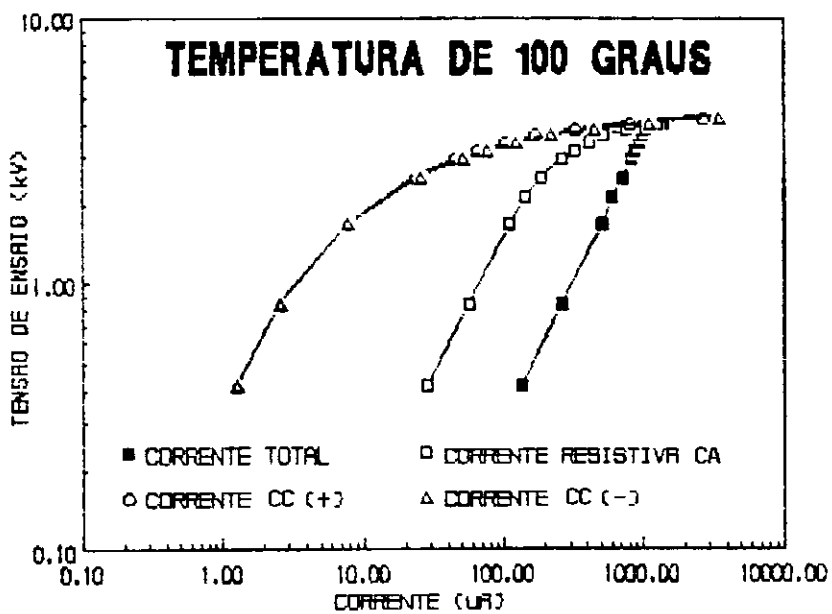


Figura 6.12- Variação da componente resistiva da corrente CA e da corrente CC, em função da tensão aplicada para a temperatura de 100°C

Esta predominância da componente resistiva da corrente CA sobre a corrente resistiva CC, para uma mesma intensidade de campo elétrico, explicada como sendo devido a predominância do efeito de polarização do varistor sobre o efeito de condução quando da aplicação de tensões alternadas, não pode ser observado explicitamente no modelo proposto por Levinson & Philipp (27), apresentado em 4.1, sendo descrito nos modelos apresentados em 4.4, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11. A polarização dos varistores de ZnO pode ser causada pela migração de íons na região da fronteira entre os grãos.

Uma síntese dos resultados apresentados nas Figuras 6.10 a 6.12, é apresentada na Figura 6.13. Para uma melhor visualização desta Figura, para tensão contínua foram considerados somente os resultados obtidos para a polaridade positiva.

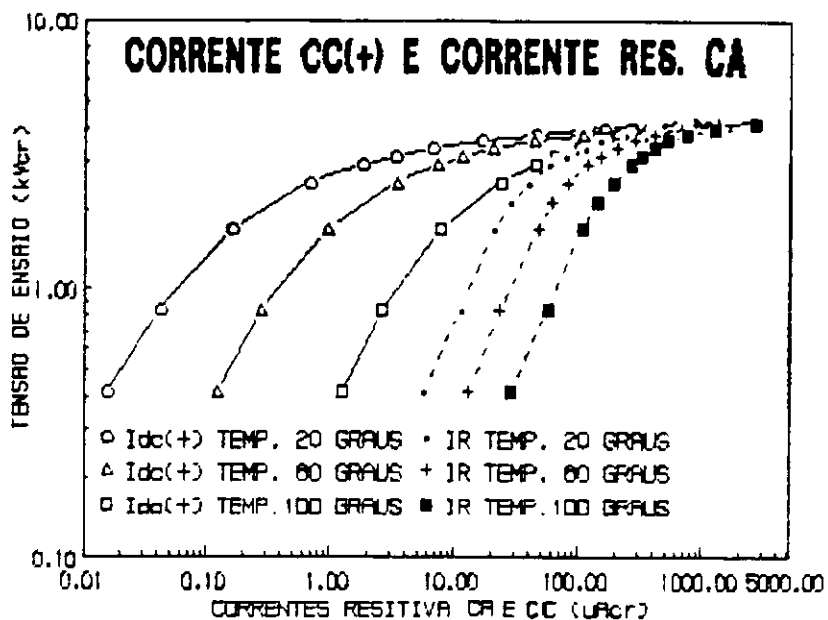


Figura 6.13- Efeito da temperatura sobre a componente resistiva da corrente CA e corrente CC polaridade positiva

Da Figura 6.13, pode ser verificado que para pequenas amplitudes de tensão, até aproximadamente $1,70 \text{ kV}_{Cr}$, os varistores de ZnO apresentam um comportamento aproximadamente linear, para solicitações alternadas e contínuas. Observa-se também nesta região, que para uma mesma temperatura, a componente resistiva da corrente de frequência industrial é muito maior do que a corrente CC, evidenciando a teoria descrita por Liang Yu-Jin et alii (37) e Zheng et alii (38), apresentada em 3.2.1. Com o aumento da amplitude de tensão, verifica-se uma maior não-linearidade para valores de corrente contínua. Para a região próxima a tensão de referência dos varistores, os valores de corrente para solicitações de tensão contínua apresentam amplitudes superiores àquelas obtidas para solicitações de tensão alternada de frequência industrial, para uma mesma amplitude de tensão. O efeito da temperatura é bem visualizado na Figura 6.13. Verifica-se para todas as amplitudes de tensão uma maior dependência da corrente com a temperatura, quando de aplicação de tensões contínuas. Por exemplo, na região de comportamento aproximadamente linear, a variação da temperatura da ambiente para 100°C provoca um aumento na amplitude da corrente CC de aproximadamente 50 vezes, enquanto que para a componente resistiva da corrente de frequência industrial, este aumento é da ordem de 6 a 7 vezes.

Outro parâmetro importante para a verificação da performance CA dos varistores de ZnO é a sua potência dissipada que, de forma similar a componente resistiva da corrente, serve de base para a avaliação da estabilidade térmica, bem como do estado de degradação dos varistores de ZnO.

A potência dissipada pelo varistor pode ser obtida experimentalmente, a partir de uma instrumentação apropriada, ou analiticamente, conhecidas a forma de onda

de tensão e corrente total, a partir de uma determinação numérica dos coeficientes da série Fourier. Neste caso, a equação geral para o cálculo da potência dissipada pelo varistor é dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (6.8)$$

onde $v(t)$ é a tensão aplicada em função do tempo e $i(t)$ é a corrente total em função do tempo que circula pelo varistor.

$$i(t) = I_{c1} \cos wt + I_{c3} \cos 3wt + I_{c5} \cos 5wt + \dots + I_{s1} \sin wt + I_{s3} \sin 3wt + I_{s5} \sin 5wt + \dots \quad (6.9)$$

$I_{c1}, I_{c3} \dots I_{cn}$ são os coeficientes da série em cosseno

$I_{s1}, I_{s3} \dots I_{sn}$ são os coeficientes da série em seno.

Considerando $v(t) = V_{CA} \cdot \cos wt$ e desenvolvendo a equação, a potência dissipada pelos varistores sob aplicação de tensões alternadas pode ser dada por:

$$P = \frac{1}{2} V_{CA} \cdot I_{c1} \quad \text{ou} \quad P = V_{ef} \cdot I_{c1ef} \quad (6.10)$$

onde I_{c1} representa a componente fundamental da componente resistiva da corrente.

Para a obtenção da potência através de resultados experimentais, torna-se necessário que seja utilizada a componente resistiva da corrente e não a corrente total, devido ao fato que por ser predominantemente capacitiva na

região considerada, esta corrente total apresenta um baixo fator de potência, o que acarreta em erros consideráveis no valor de potência obtido.

A componente resistiva da corrente pode ser obtida por alguns diferentes métodos (57), no entanto, o que aparece como mais confiável é a técnica de compensação da componente capacitiva da corrente através da utilização de um amplificador diferencial, descrita no anexo A.

Verifica-se experimentalmente que a potência dissipada pelo varistor apresenta uma grande dependência com a tensão aplicada, temperatura e freqüência, este último devido ao efeito de polarização que se verifica no varistor sob aplicação de tensões alternadas. O efeito da tensão aplicada sobre os valores médios de potência obtidos sobre dez varistores solicitados por tensões alternadas e contínuas, para diferentes temperaturas é apresentado na Figura 6.14.

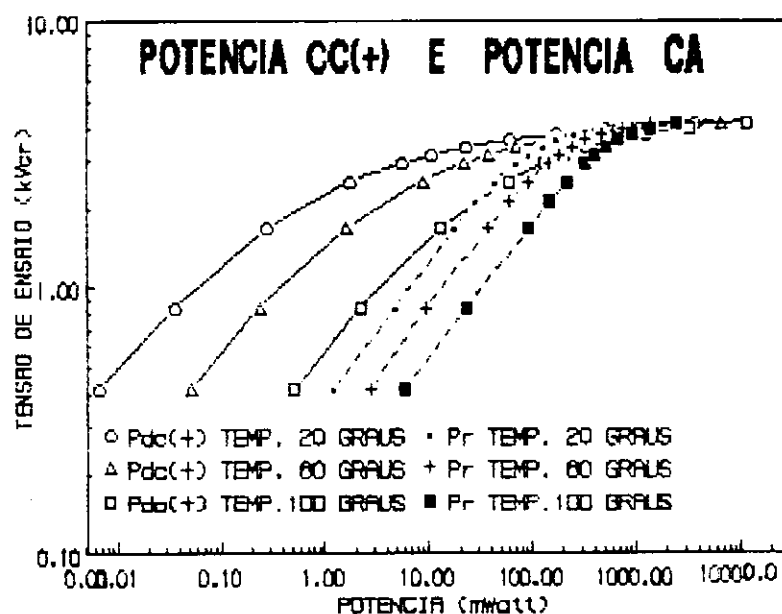


Figura 6.14- Efeito da tensão aplicada sobre as potências CA e CC, polaridade positiva, para diferentes temperaturas (valores médios)

O efeito da temperatura sobre a potência dissipada pelos varistores, para diferentes níveis de tensão, pode ser melhor visualizado a partir da Figura 6.15, na qual são apresentadas curvas de potência em função da temperatura, para um dado varistor, para tensões de crista de 3,61 kV e 4,24 kV, as quais representam a máxima tensão contínua de operação e a tensão nominal do varistor, respectivamente.

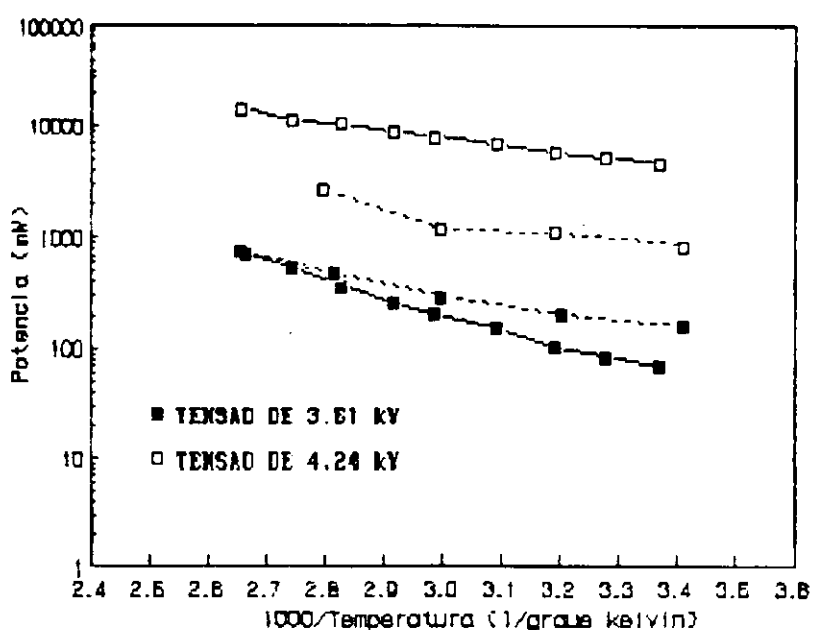


Figura 6.15 - Efeito da temperatura e da tensão aplicada sobre a potência dissipada pelos varistores de ZnO.

As curvas pontilhadas representam a potência dissipada sob aplicação de tensão alternada. Verifica-se da Figura 6.15 uma predominância da potência CA sobre a CC para tensão de 3,61 kV, para uma faixa de temperatura de até aproximadamente 90°C, a partir da qual a potência CC começa a predominar. Já para a tensão de 4,24 kV, a potência medida em CC é muito maior do que a medida em CA, o que significa uma predominância da potência devido ao efeito de condução.

A análise dos resultados experimentais, descritos no capítulo 5, mostrou que a potência dissipada pelos varistores de ZnO pode ser determinada para a região de comportamento linear (até aproximadamente 1,2 a 1,5 kV_{ef}) e para temperaturas menores do que 60°C, com uma boa aproximação pelas perdas dielétricas obtidas através da medição de capacitância e tangente de perdas. Desta forma,

$$P = V_{ef}^2 \cdot w \cdot C \cdot \tan \delta \quad (6.11)$$

Com relação as propriedades dielétricas, verifica-se uma redução da capacitância com o aumento do campo elétrico aplicado, até um certo nível de tensão, a partir do qual se verifica um aumento na capacitância do varistor, atingindo uma elevação brusca nas proximidades da tensão de referência.

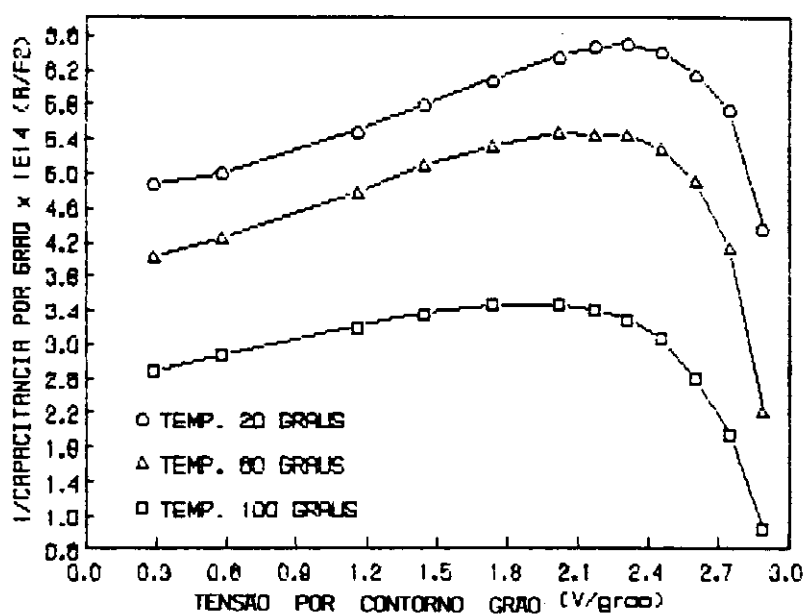
A variação da capacitância com a tensão aplicada pode ser explicada pela variação da espessura da camada de depleção, através da relação $C \sim 1/X$, onde X é a largura das barreiras de potencial (ou camada de depleção).

A largura da camada de depleção, por sua vez, está relacionada com a densidade de estados superficiais (N_s) e com a densidade de portadores de carga (N_d), que devem, portanto, serem variáveis com o campo elétrico aplicado. Desta forma, conhecendo-se a dependência do campo elétrico aplicado com as densidades de portadores de carga e estados superficiais, é possível estimar-se a capacitância do varistor na região de baixos campos elétricos.

O efeito da tensão por grão sobre o inverso do quadrado da capacitância por área por contorno de grão é mostrado na Figura 6.16, para as temperaturas ambiente, 60°C e 100°C, sendo a capacitância por unidade de área por contorno de grão (C_A) determinada por:

$$C_A = C_n \cdot \frac{N_g}{S} \quad (6.12)$$

Onde C_n é a capacitância obtida a partir das medições efetuadas, N_g é o número de grãos e S a área efetiva do varistor. O tamanho médio dos grãos dos varistores ensaiados é da ordem de 15 μm , desta forma, o número de contornos de grãos existentes no interior de varistor foi estimado em 1467.



6.16 - Efeito da tensão por grão sobre o inverso do quadrado da capacitância por área por contorno de grão ($V_g \times 1/C_A^2$)

Verifica-se da Figura 6.16 que $V_g \approx 1/C_A^2$ até um certo nível de tensão, sendo esta relação atribuída a presença das barreiras de Schottky na região de contorno dos grãos. Os valores de capacitância por unidade de área por contorno de grão (C_{A0}) para $V = 0$ foram obtidas para as diferentes temperaturas. A partir destes valores,

capacitâncias para o varistor de 706,3 pF, 776,0 pF e 945,7 pF foram obtidos para $V = 0$, para as temperaturas ambiente 60°C e 100°C. Estes valores de C_0 , obtidos a partir da Figura 6.16 acima, apresentaram uma boa concordância com os valores medidos com a ponte Schering a 1 V_{ef} , na frequência de 60 Hz. Para $V_g < KT/q$ a capacitância é praticamente independente de V_g . Outro aspecto importante com relação as propriedades dielétricas é a variação da capacitância com a frequência, apresentada na Figura 5.18, seção 5.4.

Para a região de baixas tensões aplicadas onde existe a predominância da componente capacitiva da corrente, a capacitância dos varistores de ZnO pode ser obtida pela relação:

$$I_c = C \frac{dV}{dt} \quad (6.13)$$

A taxa de variação dV/dt é máxima quando $dV/dt = wV_{CA}$, onde V_{CA} é o valor de crista da tensão alternada de frequência industrial e $w = 2\pi f$. O valor de I_c pode ser obtido no instante em que $V = 0$.

Desta forma, a componente capacitiva da corrente pode ser dada por:

$$I_c = C \cdot w \cdot V_{CA} \quad \text{--->} \quad C = \frac{I_c}{w \cdot V_{CA}} \quad (6.14)$$

A equação (6.14) permite estimar a capacitância do varistor com uma precisão aceitável, até as proximidades da tensão de referência. Uma comparação dos resultados obtidos para a capacitância em função da tensão aplicada, pela medição com a ponte Schering e através da utilização da equação (6.14), é apresentada na Figura 6.17.

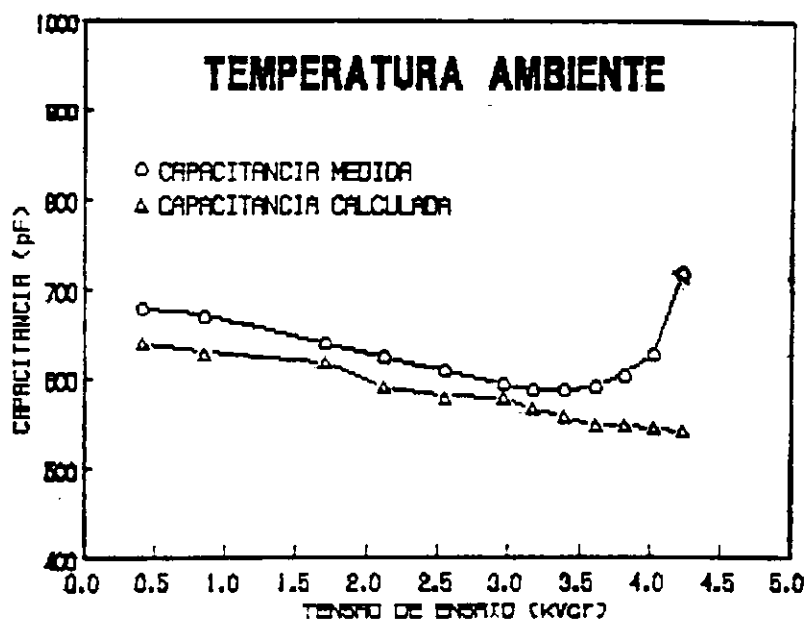


Figura 6.17 - Comparação dos valores obtidos para a capacitância em função da tensão aplicada, utilizando-se a ponte Schering e a equação (6.14)

6.3 - Determinação das densidades de portadores de carga N_d e estados superficiais N_s a partir dos resultados experimentais

Dos resultados apresentados no capítulo 5 e discutidos neste capítulo, pode-se constatar a dependência dos parâmetros elétricos com a microestrutura do varistor e com seus parâmetros físicos, tais como a altura e largura das barreiras de potencial, formadas no contorno entre os grãos. Por outro lado, a magnitude da altura destas barreiras depende basicamente das densidades de portadores de carga (N_d) e de estados superficiais (N_s). Desta forma, conhecendo-se a dependência destes parâmetros com a tensão aplicada por contorno, é possível obter-se as propriedades elétricas necessárias para estudar o desempenho dos varistores de ZnO.

Nesta seção, é realizado um processo inverso ou seja, as densidades de portadores de carga e de estados superficiais são determinadas a partir dos resultados experimentais obtidos para solicitações de tensão alternada de frequência industrial, baseado nas equações descritas por Hower & Gupta (35) apresentadas a seguir:

$$N_s(E) = \frac{C_A \cdot J}{g_A \cdot KT} \quad (6.15)$$

$$X(E) = \frac{\epsilon(qN_s(E) - C_A)}{q N_s(E) \cdot C_A} \quad (6.16)$$

$$N_d(E) = \frac{N_s(E)}{2X(E)} \quad (6.17)$$

- $N_s(E)$ - densidade de estados superficiais ($1/\text{cm}^2\text{V}$)
 $X(E)$ - largura da barreira de depleção (cm)
 $N_d(E)$ - densidade de portadores de carga ($1/\text{cm}^3$)
 J - densidade de corrente (A/cm^2)
 K - constante de Boltzman ($1,380662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
 T - temperatura do varistor (graus kelvin)
 q - carga do elétron ($1,6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$)
 ϵ - constante dielétrica do grão de ZnO ($8,5 \times 10^{-2} \cdot \epsilon_0 \text{ (F/cm)}$)
 C_A - capacitância por unidade de área por contorno de grão (F/cm^2)
 g_A - condutância por unidade de área por contorno de grão ($1/\Omega \cdot \text{cm}^2$)

$$C_A = \frac{C_N \cdot N_g}{S}, \quad g_A = g_N \cdot \frac{N_g}{S}, \quad N_g = \frac{h}{d}$$

- C_N - capacitância medida através da ponte Schering
 g_N - condutância medida
 N_g - número estimado de grãos contidos no varistor
 d - diâmetro médio estimado para o grão
 S - área efetiva do varistor (cm²)
 h - altura do varistor (cm)

Os valores obtidos para N_g e N_d em função da tensão por contorno de grão estão sintetizadas nas Figuras 6.18 e 6.19, respectivamente.

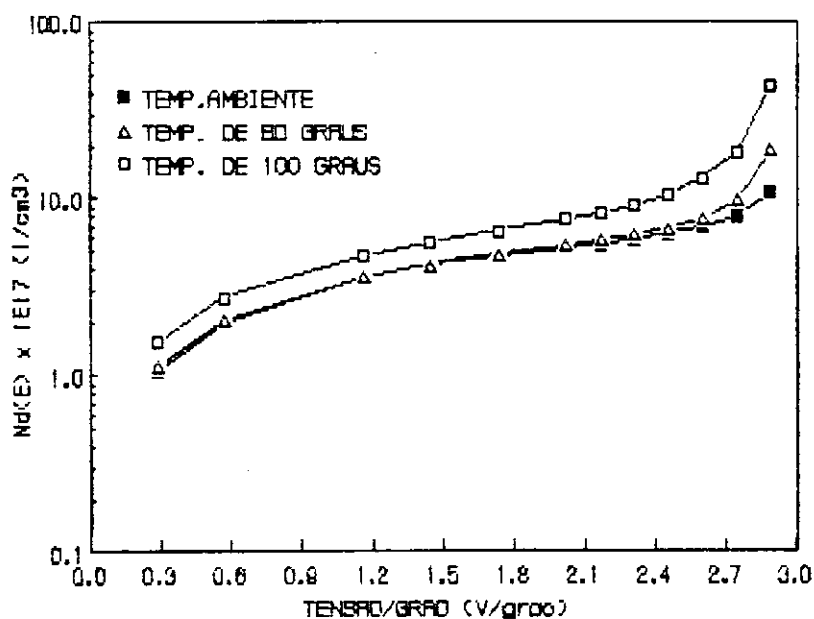


Figura 6.18 - Dependência da densidade de portadores de carga com a tensão aplicada por grão.

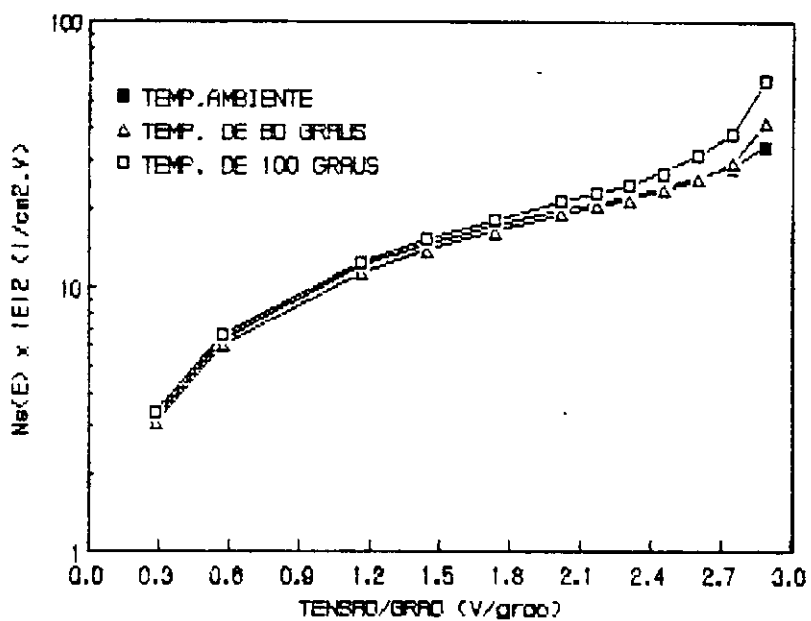


Figura 6.19 - Dependência da densidade de estados superficiais com a tensão aplicada por grão

Os valores calculados pelas equações acima, são apresentados nas tabelas 6.1 a 6.3, para temperaturas ambiente, 60°C e 100°C, respectivamente.

Tabela 6.1 - Valores obtidos para $N_g(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura ambiente

TENSAO DE ENSAIO (kV _{cr})	TENSAO DO GRAO (V/GRAO)	DENSIDADE DE CORRENTE (μ A/cm ²)	CAPACITANCIA DO GRAO (nF/cm ²)	CONDUTANCIA DO GRAO (1/Mohm.cm ²)
0.424	0.28927	0.25836	45.24264	0.89316
0.849	0.57854	0.52353	44.76465	0.90491
1.697	1.15708	0.95504	42.69620	0.82539
2.121	1.44635	1.29726	41.59582	0.89692
2.546	1.73563	1.81717	40.57569	1.04698
2.970	2.02490	2.72552	39.66904	1.34601
3.182	2.16953	3.66697	39.29509	1.69021
3.394	2.31417	5.16775	39.20780	2.23309
3.606	2.45880	7.03432	39.48037	2.86087
3.818	2.60344	11.08611	40.33782	4.25826
4.031	2.74807	18.10819	41.83169	6.58941
4.243	2.89271	32.86349	47.83795	11.36080

ENERGIA DE IONIZACAO (eV)	DENSIDADE DE ESTADO SUPERFICIAL (1/cm ² .V) x 1E+12	LARGURA DA BARREIRA DE POTENCIAL (cm) x 1E-6	DENSIDADE DE PORTADORES DE CARGA (1/cm ³) x 1E17
0.18986	3.23341	15.18213	1.06487
0.18555	6.39850	16.07837	1.98978
0.19426	12.20568	17.24215	3.53949
0.18999	14.86389	17.77728	4.18059
0.18272	17.39923	18.27823	4.75955
0.17358	19.84552	18.73543	5.29625
0.16275	21.06262	18.92966	5.56339
0.15025	22.41688	18.98577	5.90360
0.14337	23.98351	18.86693	6.35596
0.13437	25.94584	18.47653	7.02129
0.13739	28.40153	17.82590	7.96637
0.15431	34.18891	15.59501	10.96149

Tabela 6.2.- Valores obtidos para $N_b(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura de 60°C

TENSAO DE ENSAIO (kV _{cr})	TENSAO DO GRAO (V/GRAO)	DENSIDADE DE CORRENTE (μ A/cm ²)	CAPACITANCIA DO GRAO (nF/cm ²)	CONDUTANCIA DO GRAO (1/Mohm.cm ²)
0.424	0.28927	0.59832	49.76014	2.06837
0.849	0.57854	1.06020	48.52295	1.83254
1.697	1.15708	2.15259	45.70820	1.86035
2.121	1.44635	2.75045	44.35600	1.90164
2.546	1.73563	3.73224	43.41996	2.15037
2.970	2.02490	5.45104	42.79638	2.69201
3.182	2.16953	6.99080	42.90940	3.22226
3.394	2.31417	9.36368	42.90740	4.04624
3.606	2.45880	12.87381	43.47314	5.23581
3.818	2.60344	18.74413	45.15508	7.19976
4.031	2.74807	30.67243	49.26154	11.16143
4.243	2.89271	62.07144	66.97442	21.45789

ERGIA DE TIVACAO (eV)	DENSIDADE DE ESTADO SUPERFICIAL (1/cm ² .V) x 1E+12	LARGURA DA BARREIRA DE POTENCIAL (cm) x 1E-6	DENSIDADE DE PORTADORI DE CARGA (1/cm ³) x 1E17
0.18986	3.12929	13.62358	1.14848
0.18555	6.10298	14.74063	2.07012
0.18426	11.49790	16.05691	3.58036
0.18999	13.94720	16.63061	4.19323
0.18272	16.38345	17.04647	4.80553
0.17358	18.83951	17.33641	5.43351
0.16275	20.23850	17.30732	5.84680
0.15025	21.58673	17.32263	6.23079
0.14337	23.23831	17.10984	6.79092
0.13437	25.55723	16.48334	7.75244
0.13739	29.43040	15.11815	9.73346
0.15431	42.11856	11.12569	18.92852

Tabela 6.3.- Valores obtidos para $N_s(E)$, $N_d(E)$ e $X(E)$ a temperatura de 100°C

TENSAO DE ENSAIO (kV _{cr})	TENSAO DO GRAO (V/GRAO)	DENSIDADE DE CORRENTE (μ A/cm ²)	CAPACITANCIA DO GRAO (nF/cm ²)	CONDUTANCIA DO GRAO (1/Mohm.cm ²)
0.424	0.28927	1.30089	60.91146	4.49713
0.849	0.57854	2.56552	59.07795	4.43445
1.697	1.15708	5.01137	55.82709	4.33103
2.121	1.44635	6.58603	54.57860	4.55354
2.546	1.73563	8.67561	53.78682	4.99855
2.970	2.02490	12.02167	53.75225	5.93693
3.182	2.16953	14.74945	54.18504	6.79845
3.394	2.31417	18.67932	55.14767	8.07172
3.606	2.45880	24.17297	57.19857	9.83119
3.818	2.60344	35.00615	62.12739	13.44612
4.031	2.74807	58.58533	71.56952	21.31869
4.243	2.89271	122.73460	108.73440	42.42894

ENERGIA DE ATIVACAO (eV)	DENSIDADE DE ESTADO SUPERFICIAL (1/cm ² .V) x 1E+12	LARGURA DA BARREIRA DE POTENCIAL (cm) x 1E-6	DENSIDADE DE PORTADOR DE CARGA (1/cm ³) x 1E17
0.18986	3.41996	10.98222	1.55704
0.18555	6.63403	12.03113	2.75703
0.19426	12.53797	13.10637	4.78316
0.18999	15.32197	13.48282	5.68204
0.18272	18.11964	13.73315	6.59705
0.17358	21.12599	13.77904	7.66599
0.16275	22.81723	13.68369	8.33739
0.15025	24.77076	13.45747	9.20335
0.14337	27.29773	12.98570	10.51069
0.13437	31.39409	11.96429	13.11991
0.13739	38.17456	10.39268	18.36607
0.15431	61.05050	6.84457	44.59778

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho pode-se constatar que:

- O mecanismo de condução de corrente pelos varistores de ZnO ainda não está completamente entendido. Dentre as várias teorias apresentadas, a que parece ser mais consistente para a região de baixas tensões aplicadas é baseada na existência das duplas barreiras de Schottky na interface dos grãos. Estas barreiras podem ser identificadas, segundo a literatura, pela dependência da tensão aplicada com o inverso do quadrado da capacitância. Por outro lado, o processo de condução de corrente pelos varistores de ZnO é diferente quando da aplicação de tensões alternadas e contínuas.
- Diversos modelos elétricos têm sido propostos para representar as propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas. No entanto, a maior parte destes modelos não retrata com total clareza os diversos fenômenos que podem ser observados nos varistores nesta faixa de tensão, quando da aplicação de tensões contínuas e alternadas. Um estudo mais detalhado destes modelos apresentados pode ser realizado a partir da análise mais profunda dos resultados experimentais realizados neste trabalho.
- A corrente resistiva CC e a componente resistiva da corrente CA, responsáveis pelas perdas por efeito Joule nos varistores são fortemente dependentes da tensão aplicada, frequência (para tensões CA) e temperatura. Verifica-se uma dependência exponencial destas correntes com a temperatura, com os varistores apresentando um coeficiente de temperatura negativo para a resistência, ou seja, um aumento na temperatura provoca uma diminuição da resistência do varistor para uma mesma intensidade de campo elétrico. Uma maior

dependência da resistência com a temperatura, na faixa de tensão estudada, é verificada para as correntes CC. Uma dependência da componente capacitiva da corrente CA, com estes parâmetros também é verificada, porém em menores proporções.

- A resistência elétrica dos varistores de ZnO apresenta uma dependência com o tipo de solicitação de tensão aplicada. Verifica-se que para uma mesma intensidade de campo elétrico E, a resistência sob aplicação de tensões CC é maior do que para tensões CA, para a faixa de tensão estudada. Este fenômeno, segundo diversas literaturas, é atribuído à predominância do efeito de polarização sobre a condução, nesta região de estudo. Esta polarização pode ser causada pela migração de íons nas interfaces das fronteiras entre os grãos. No entanto, para um melhor entendimento deste efeito, estudos adicionais devem ser realizados. Com relação a tensão contínua, verifica-se uma pequena predominância da corrente para a polaridade negativa. Verifica-se experimentalmente que esta predominância da corrente para a polaridade negativa aumenta com o aumento da amplitude da tensão e diminui com o aumento da temperatura. No entanto, o entendimento físico deste fenômeno carece de maiores estudos.

- A capacitância do varistor medida com a ponte Schering apresenta uma dependência com a tensão aplicada e temperatura. Esta dependência está diretamente relacionada à dependência da largura das barreiras de potencial com estes parâmetros, ou seja, a variação na largura das barreiras de potencial provoca uma variação na capacitância. Verifica-se experimentalmente que a capacitância decresce inicialmente com o aumento da tensão aplicada até um certo valor, acima do qual aumenta com a tensão aplicada, atingindo uma elevação brusca nas proximidades da tensão de referência. Com

relação à temperatura, verifica-se que para um mesmo nível de tensão a capacitância aumenta com o aumento da temperatura.

- A potência dissipada pelos varistores de ZnO é um parâmetro importante para se avaliar o desempenho destes, podendo ser obtida experimentalmente ou analiticamente por meio da série de Fourier, uma vez conhecida as formas de onda de tensão e corrente total. Para a obtenção da potência experimentalmente, cuidados devem ser tomados com relação a medição, devido ao baixo fator de potência verificado para os varistores na região de baixas tensões aplicadas. De forma aproximada, a potência dissipada pelos varistores de ZnO nesta região é equivalente às perdas dielétricas obtidas a partir da medição de capacitância e tangente de perdas.

- As propriedades elétricas e dielétricas dos varistores de ZnO para toda a faixa compreendida na região de baixas tensões aplicadas, podem ser determinadas conhecendo-se a dependência da altura e da largura das barreiras de potencial com o campo elétrico aplicado. Estas dependências podem ser obtidas experimentalmente a partir de alguns poucos experimentos laboratoriais, ou teoricamente, uma vez conhecida a dependência das densidades de portadores de carga e de estados interfaciais com o campo elétrico aplicado. É sabido que a redução dos valores de resistência CA e CC dos varistores com o aumento da tensão para a região de baixas tensões aplicadas é atribuída à redução da altura das barreiras de potencial.

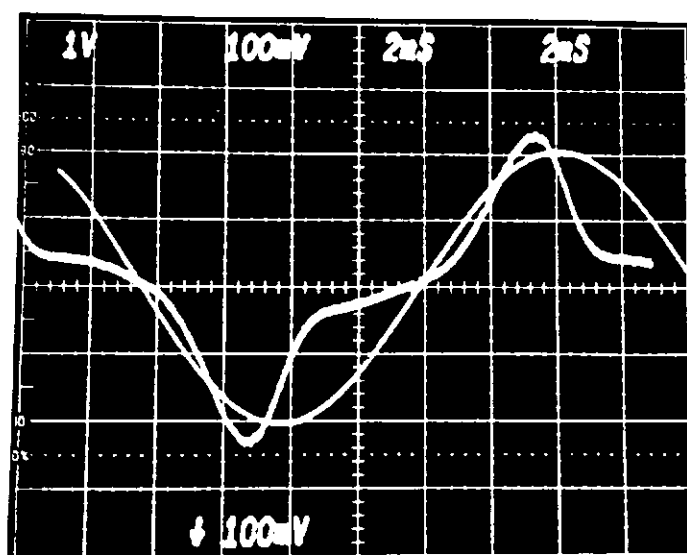
ANEXO A

TÉCNICA UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DA COMPONENTE RESISTIVA
DA CORRENTE EM VARISTORES DE ZnO

O circuito utilizado para obtenção da componente resistiva da corrente que circula pelos pára-raios é mostrado na Figura 5.1. Uma corrente predominantemente capacitiva I_C circula pelo braço $R_V C$ do circuito de compensação, produzindo uma queda de tensão V_1 sobre o resistor R_V . Pelo corpo de prova (no caso o varistor de ZnO), circula uma corrente que contém duas componentes: uma capacitiva e a outra resistiva, sendo esta última responsável pelas perdas por efeito Joule. Esta corrente provoca uma queda de tensão V_2 nos terminais de R_{Sh} . Os sinais de tensão medidos V_1 e V_2 são ligados a um amplificador diferencial (A), onde V_1 é defasada de 180 graus elétricos. Ajusta-se então R_V até que ocorra um equilíbrio no circuito de compensação, ou seja, a corrente capacitiva I_C seja equivalente em módulo e fase à componente capacitiva da corrente que circula pelos varistores de ZnO. Desta forma, obtém-se na saída do amplificador diferencial uma corrente I_R supostamente resistiva. Para obtenção de uma boa compensação, é imprescindível que $1/j\omega C \gg R_V$ e que $1/j\omega C_{CI} \gg R_{Sh}$. Além disso o capacitor C deve apresentar baixos valores de tangente de perdas. (57-59).

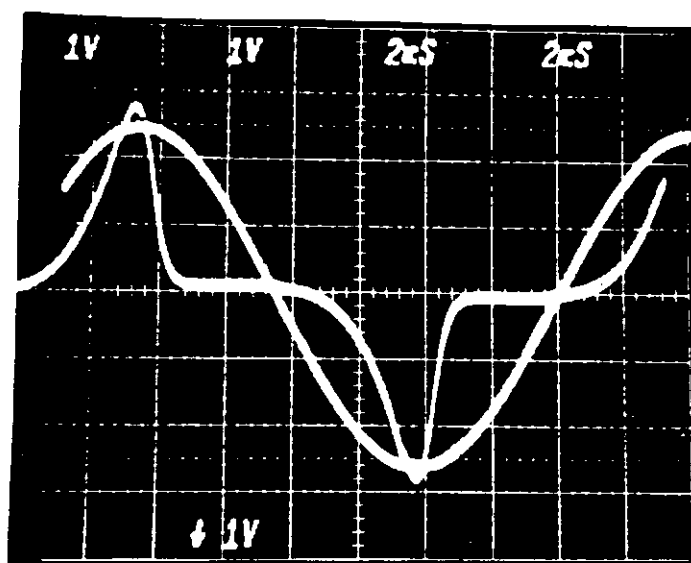
As figuras A1 e A2, apresentam as componentes resistivas da corrente obtidas por este método para um varistor de 3 kV com corrente de referência de 3 mA. Quando da utilização desta técnica, verifica-se experimentalmente que para baixos valores de tensão aplicada e temperatura o valor de crista da corrente resultante da compensação (componente resistiva da corrente) não coincide em fase com o valor de crista da tensão, figura A.1.

Isto deve-se provavelmente a não-linearidade da capacitância do varistor, associada aos harmônicos existentes na corrente total. Uma vez que a fonte utilizada contém baixas distorções harmônicas, a corrente I_C também apresenta baixas distorções. Por outro lado, a componente capacitiva da corrente que circula pelo varistor apresenta uma grande variedade de harmônicos. Isto nos leva a crer que a subtração das correntes se faz no harmônico fundamental (60 Hz), mas não por toda a onda, o que significa dizer que a corrente resultante não é uma corrente resistiva pura, mas sim apresentando uma pequena componente capacitiva. Isto é reforçado pelo fato de que aumentando a frequência de ensaio, aumenta a defasagem entre o valor de crista de tensão e da componente resistiva da corrente, para uma mesma condição de tensão e temperatura.



3250 V/div
100 μ A/div

Figura A1 - Obtenção da componente resistiva da corrente para 2,40 kVef



3250 V/div
1 mA/div

Figura A2 - Obtenção da componente resistiva da corrente para 2,98 kVef

Este fenômeno se atenua a medida que a tensão aplicada se aproxima da tensão de referência (Figura A2), ou para temperaturas mais elevadas. Isto ocorre devido ao aumento da componente resistiva da corrente, em relação a componente capacitiva, reforçando ainda mais a provável causa do fenômeno acima descrito.

Na prática esta compensação é satisfeita variando-se R_V até que os zeros da tensão coincidam com os zeros da corrente na saída do amplificador. A crista da tensão deve

estar o mais próximo possível da crista da corrente. Em uma primeira aproximação, o valor do ajuste de R_V deve ser tal que $R_V.C = R_{Sh} . C_{CI}$.

A corrente resistiva obtida é inserida no medidor de potência W , aproximadamente em fase com o sinal de tensão proveniente do divisor de tensão DT , fornecendo a potência correspondente as perdas Joule.

O circuito utilizado para obtenção da componente resistiva é mostrado na foto 1, enquanto que o sistema de medição da corrente resistiva/potência dissipada é apresentado na foto 2.

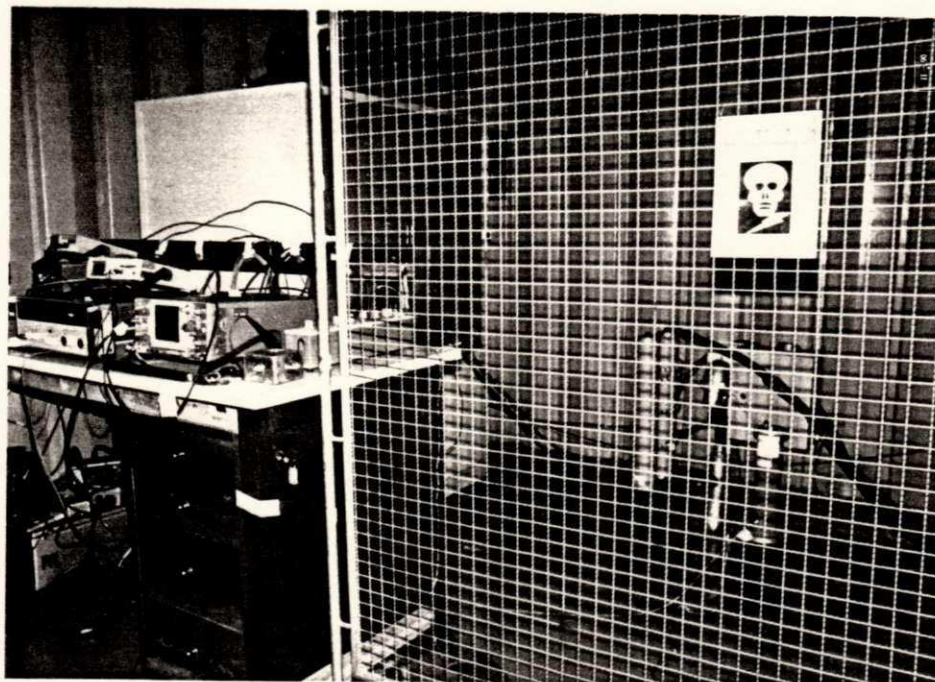


Foto 1 - Arranjo do circuito para obtenção da componente resistiva da corrente

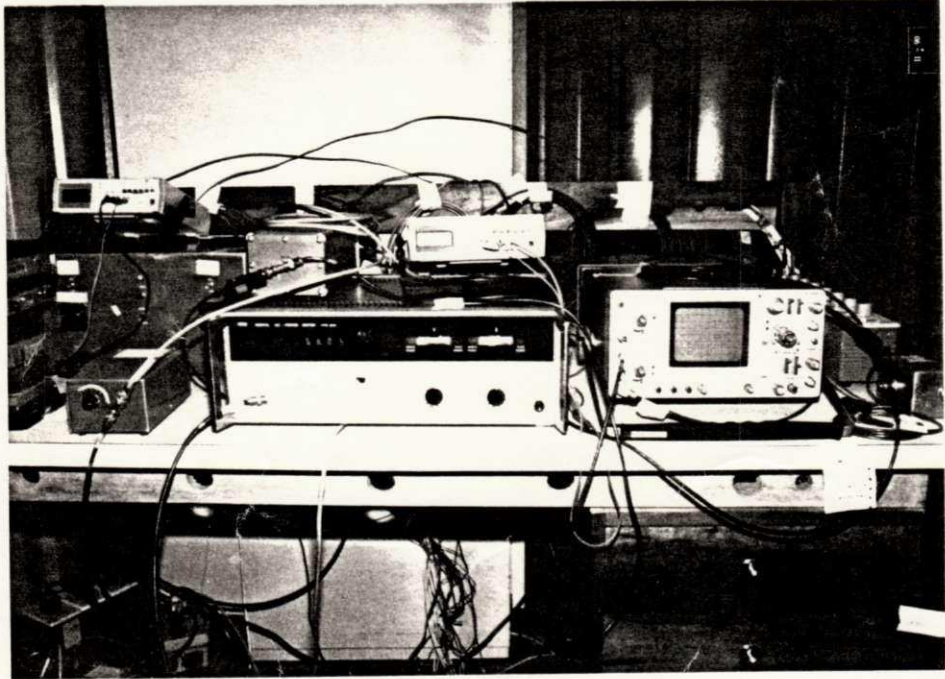


Foto 2 - Circuito de medição

ANEXO B - VALORES DAS GRANDEZAS OBTIDOS DOS ENSAIOS

TABELA A2.1 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CORRENTE TOTAL (μ Acr)		COMPONENTE RESISTIVA (μ Acr)		POTÊNCIA (mWatts)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	100,2	1,42	5,7	0,42	1,25	0,07
0,60	196,3	4,45	11,6	0,71	4,91	0,23
1,20	392,4	8,26	21,1	0,94	17,43	0,78
1,50	472,5	11,79	28,6	1,80	28,22	1,45
1,80	552,1	10,50	40,1	2,21	44,65	2,19
2,10	643,3	13,02	60,1	3,04	69,13	3,47
2,25	682,1	11,39	80,9	5,25	92,15	4,27
2,40	714,6	10,89	114,0	7,22	127,25	7,53
2,55	746,2	10,36	155,2	11,91	173,50	10,10
2,70	802,7	14,68	244,6	21,89	258,42	18,19
2,85	837,4	9,30	399,5	30,79	415,52	33,52
3,00	930,4	84,58	725,0	47,00	753,09	82,56

TABELA A2.2 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CORRENTE TOTAL (μ Acr)		COMPONENTE RESISTIVA (μ Acr)		POTÊNCIA (mWatts)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	110,9	5,27	13,2	1,36	2,76	0,19
0,60	226,6	5,17	23,4	1,45	9,70	0,46
1,20	427,3	12,00	47,5	1,30	38,65	0,98
1,50	518,5	16,59	60,7	2,91	60,87	2,44
1,80	612,8	16,06	82,3	4,60	93,82	3,25
2,10	699,6	16,06	120,3	4,15	146,31	5,41
2,25	747,6	28,13	154,2	7,38	187,12	6,50
2,40	794,4	25,08	206,6	7,61	244,92	9,26
2,55	819,6	31,68	284,0	22,07	331,47	17,13
2,70	874,1	24,15	413,5	28,20	477,40	27,71
2,85	928,6	37,78	676,7	71,33	752,58	63,49
3,00	1493,4	210,00	1369,4	222,16	1392,61	173,05

TABELA A2.3 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas da corrente total, componente resistiva da corrente e potência, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CORRENTE TOTAL (μ Acr)		COMPONENTE RESISTIVA (μ Acr)		POTÊNCIA (mWatts)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	137,0	3,10	28,7	1,74	6,09	0,34
0,60	265,5	4,15	56,6	3,29	23,60	0,85
1,20	511,0	11,52	110,6	4,52	91,89	3,32
1,50	612,9	15,98	145,3	6,10	145,40	5,26
1,80	743,4	14,98	191,4	9,38	219,89	8,20
2,10	846,3	16,41	265,2	13,16	332,47	14,01
2,25	893,7	27,96	325,4	14,69	411,11	19,62
2,40	950,4	18,33	412,1	23,16	522,02	24,57
2,55	997,3	23,91	533,3	30,74	675,23	30,50
2,70	1055,7	28,37	772,3	66,87	920,85	53,14
2,85	1450,6	91,62	1292,5	108,62	1404,50	97,24
3,00	2707,8	351,76	2707,8	351,76	2509,30	286,38

TABELA A2.4 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CAPACITÂNCIA (pF)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	680,6	13,61	37,1	1,92
0,60	673,4	14,00	40,0	1,11
1,20	642,2	10,93	45,6	1,33
1,50	625,7	9,45	50,2	1,70
1,80	610,4	9,27	57,5	2,29
2,10	596,7	8,45	72,3	3,88
2,25	591,1	9,32	84,8	5,48
2,40	589,8	9,10	105,0	8,12
2,55	593,9	9,53	135,6	11,65
2,70	606,8	14,35	186,2	22,68
2,85	629,2	17,76	271,9	50,84
3,00	719,6	64,85	426,0	100,40

TABELA A2.5 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CAPACITÂNCIA (pF)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	748,5	11,32	87,0	5,10
0,60	729,9	11,05	90,0	3,57
1,20	687,6	10,49	97,8	2,95
1,50	667,2	8,86	104,2	3,42
1,80	653,1	8,44	115,4	4,20
2,10	643,8	9,67	136,1	7,01
2,25	645,5	8,33	155,5	6,86
2,40	645,4	9,84	180,5	7,72
2,55	653,9	11,04	221,1	11,84
2,70	679,2	14,28	285,2	16,00
2,85	741,0	20,96	404,4	30,95
3,00	1007,4	145,73	710,7	125,45

TABELA A2.6 - Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância e tangente de perdas, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA

TENSÃO CA (kVef)	CAPACITÂNCIA (pF)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,30	916,2	16,82	195,3	5,69
0,60	888,7	15,00	200,0	2,12
1,20	839,8	14,22	210,7	2,47
1,50	821,0	14,69	221,2	2,15
1,80	809,1	14,94	237,3	3,29
2,10	808,6	15,77	267,0	9,98
2,25	815,1	16,81	293,4	6,31
2,40	829,5	19,28	328,8	7,85
2,55	860,4	22,92	382,3	12,96
2,70	934,5	24,58	476,2	21,54
2,85	1076,6	52,67	631,3	36,35
3,00	1635,6	197,30	1035,3	102,48

TABELA A2.7 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura ambiente obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TENSÃO CC (KVDC)	CORRENTE RESIS- TIVA POL. (+) (μ ADC)		CORRENTE RESIS- TIVA POL. (-) (μ ADC)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,42	0,016	0,005	0,019	0,004
0,85	0,043	0,012	0,045	0,009
1,70	0,163	0,037	0,169	0,027
2,55	0,698	0,130	0,807	0,114
2,97	1,84	0,39	2,36	0,35
3,18	3,34	0,76	4,49	0,71
3,39	6,76	1,62	10,1	1,63
3,61	16,6	4,26	24,7	4,19
3,82	45,6	11,48	67,1	15,02
4,03	165,0	49,90	229,8	52,07
4,24	875,5	305,75	1147,0	360,42

TABELA A2.8 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura de 60°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TENSÃO CC (KVDC)	CORRENTE RESIS- TIVA POL. (+) (μADC)		CORRENTE RESIS- TIVA POL. (-) (μADC)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,42	0,12	0,019	0,12	0,024
0,85	0,28	0,042	0,28	0,058
1,70	0,95	0,130	0,97	0,177
2,55	3,43	0,45	3,63	0,67
2,97	7,50	0,94	8,47	1,37
3,18	11,8	1,46	14,3	2,55
3,39	21,1	2,86	26,5	5,56
3,61	44,1	8,43	54,9	11,64
3,82	107,9	20,29	160,0	34,40
4,03	345,6	67,75	515,0	109,91
4,24	1545,5	400,59	2165,3	622,32

TABELA A2.9 - Valores médios e desvio-padrão da grandeza corrente, a temperatura de 100°C obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CC, em ambas as polaridades

TENSÃO CC (kVDC)	CORRENTE RESIS- TIVA POL. (+) (μ ADC)		CORRENTE RESIS- TIVA POL. (-) (μ ADC)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,42	1,3	0,16	1,3	0,13
0,85	2,7	0,21	2,6	0,27
1,70	7,8	1,00	7,8	0,77
2,55	24,1	2,54	25,6	2,19
2,97	44,6	4,56	50,6	4,13
3,18	64,5	6,53	75,6	6,48
3,39	100,9	10,83	124,0	11,10
3,61	171,4	21,32	221,9	22,81
3,82	335,1	47,83	458,4	57,20
4,03	820,1	148,96	1124,6	198,04
4,24	2717,0	627,74	3593,0	734,94

TABELA A2.10- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura ambiente, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

FREQUÊN- CIA (KHZ)	CAPACITÂNCIA (pF)		RESISTÊNCIA (MΩ)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,06	700,0	-	100,00	-	37,89	-
0,30	677,0	10,05	40,00	8,17	20,37	3,81
1,00	670,3	11,23	19,15	0,67	12,42	0,43
5,00	649,8	12,47	5,93	0,25	8,28	0,37
60,00	641,1	12,16	0,276	0,007	15,02	0,39
100,00	637,0	12,26	0,145	0,003	17,22	0,43
200,00	630,9	12,27	0,072	0,002	17,54	0,48
300,00	627,7	12,33	0,051	0,001	16,49	0,47
500,00	624,5	12,55	0,034	0,001	15,14	0,48
1000,00	621,6	12,18	0,018	0,0003	14,47	0,33
1500,00	619,8	12,36	0,012	0,0002	14,16	0,30
2000,00	621,2	18,20	0,009	0,0002	14,00	0,44
2500,00	619,5	12,20	0,008	0,0001	13,76	0,29
3000,00	619,6	12,83	0,006	0,0002	13,61	0,25

TABELA A2.11- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura de 60°C, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

FREQUÊN- CIA (KHZ)	CAPACITÂNCIA (pF)		RESISTÊNCIA (MΩ)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,06	780,0	40,00	34,00	9,52	110,84	41,36
0,30	722,0	11,66	16,80	3,50	45,49	8,69
1,00	704,0	11,14	8,41	0,27	26,90	0,76
5,00	693,0	14,18	3,15	0,10	14,61	0,47
60,00	681,1	9,94	0,44	0,013	8,83	0,26
100,00	682,0	12,49	0,24	0,006	9,78	0,26
200,00	680,0	12,65	0,092	0,004	12,74	0,57
300,00	680,0	12,65	0,052	0,002	15,16	0,65
500,00	677,8	12,27	0,025	0,0006	18,63	0,52
1000,00	685,0	10,25	0,011	0,0003	22,17	0,64
1500,00	707,5	14,79	0,006	0,0001	25,35	0,55
2000,00	746,7	15,64	0,004	0,0001	28,97	0,63
2500,00	803,3	17,00	0,002	0,0001	36,78	0,91
3000,00	889,0	19,21	0,001	0,0001	47,12	1,74

TABELA A2.12- Valores médios e desvio-padrão das grandezas capacitância, resistência e tangente de perdas a temperatura de 100°C, obtidos a partir de ensaios sobre dez varistores de ZnO, para tensão CA de 1 Vef

FREQUÊN- CIA (KHZ)	CAPACITANCIA (pF)		RESISTÊNCIA (MΩ)		TANGENTE DE PERDAS (x 0,001)	
	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO
0,06	920,0	40,00	14,13	1,77	206,90	19,59
0,30	795,0	15,81	5,73	0,68	118,35	16,03
1,00	752,5	13,92	3,34	0,22	63,69	4,03
5,00	727,5	14,79	1,46	0,08	30,01	1,24
60,00	711,4	13,55	0,32	0,008	11,56	0,08
100,00	708,6	11,25	0,22	0,005	10,30	0,11
200,00	702,9	14,85	0,12	0,003	9,87	0,20
300,00	702,9	14,85	0,07	0,002	10,48	0,37
500,00	707,1	12,78	0,04	0,0006	12,29	0,28
1000,00	720,0	14,14	0,012	0,0003	18,16	0,49
1500,00	744,3	16,78	0,006	0,0001	24,69	0,44
2000,00	785,7	17,61	0,003	0,0001	31,86	0,39
2500,00	855,0	18,03	0,002	<0,0001	40,83	0,38
3000,00	941,4	21,00	0,001	<0,0001	52,97	0,48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - Matsuoka, M. "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", Jap. J. Appl. Phy., Vol. 10, n^o 6, pp 737-746, Jun.1971
- (2) - Sakshaug, E.C. et alli. "New Concept in Station Arrester Design", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, n^o 2, pp 647-656, Mar./Apr. 1977.
- (3) - Kobayashi, M. et alli. "Development of Zinc-Oxide non Linear Resistors and their Applications to Gapless Surge Arresters", IEEE Trans. on P.A.S., Vol. PAS-97, n^o 4, pp 1149-1158, Jul./Aug. 1978.
- (4) - Tominaga, S. et alli. "Reliability and Application of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, n^o 3, pp 805-816, May./Jun. 1979.
- (5) - Axelsson, B. "A New Arresters Technology for Reduced Voltage Protective Levels", Cigre, paper O 33-01, p 9, Aug./Sept. 1980.
- (6) - Mc Graw-Edison Company. "Development of a New Type of Nonlinear Resistance Valve Block for Surge Arresters", EPRI Final Report EL - 1647, Dec. 1980
- (7) - Potter, M.E. & Sokoly, T.O. "Development of Metal Oxide Varistors for Gas-Insulated Surge Arresters", IEEE Trans. on P.A.S., Vol. PAS-101, n^o 7, pp 2217-2220, July 1982.
- (8) - Westinghouse Electric Corporation. "Gapless Surge Arresters for Power Systems Applications - Volume 1:

Development of 500 and 1200 kV Arresters", EPRI Final Report EL - 3166, Sep. 1983.

- (9) - Nakano, K. & Ozawa, J. "Recent Aspects of Zinc Oxide Lightning Arresters", Hitachi Review, Vol. 33, n^o 3, pp 157-160, 1984.
- (10)- Philipp, H.R. et alli. "Advanced Metal Oxide Varistor Concepts", ORNL - Oak Ridge National Laboratory- Final Report prepared by General Electric Company, July/84
- (11)- Makae, K. et alli. "Zinc Oxide - Praseodymium Oxide Elements for Surge Arresters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.-3, no 2, pp 591-606, Apr. 1988.
- (12)- Vicaud, A. et alli. "Knowledge and Application of Zinc Oxide Surge Arresters Effect on Insulation coordination", Cigre, paper T 33-10, p 10, Aug./Sep. 1986.
- (13)- Bargigia, A. et alli. "Study of the Performance of Metal Oxide Arresters for High Voltage Systems", Cigre paper O 33-14, p 12, Aug./Sept. 1986.
- (14)- Kresge, J.S. & Sakshaug, E.C. "Zinc Oxide Arresters Experience and Application at HVDC Stations", IEEE Trans. on P.A.S., Vol. PAS-65, n^o 70, pp 65-71, July 1980.
- (15)- Chiou, Bi-S. & Jih, F.W. "Electrical Properties and Degradation Phenomena of Glass-Dopped ZnO Varistors", Bt. Ceram. Trans. J., Vol. 85, n^o 4, pp 118-122, 1986.
- (16)- Asokan, T. et alii. "Improvement of non-linear

Characteristics of Multicomponent ZnO-Based ceramics containing Nb₂O₅", IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. 23, n^o 2, pp 279-286, Apr. 1988.

- (17)- Miyoshi, T. et alli. "Effects of Dopants on the Characteristics of ZnO Varistors", Advances in Ceramics, Vol 1, pp 309-315, 1981
- (18)- General Electric Company. "Fundamental Research on Metal Oxide Varistor Technology", EPRI Final Report EL-6960, Aug.1990
- (19)- Westinghouse Electric Corporation. "High-Energy Metal Oxide Valve Blocks", EPRI Final Report EL-7155, Feb. 1991.
- (20)- Greuter, F. et alli. "The Metal Oxide Resistor - At the Heart of Modern Surge Arrester", ABB Review, Vol. 1, pp 35-42, 1989.
- (21)- Inada, M. "Formation Mechanism of Nonohmic Zinc Oxide Ceramics", Jap. J. Appl. Phys., Vol. 19, n^o 3, pp 409-419, March 1980.
- (22)- Eda, K. "Electrical Properties of ZnO-Bi₂O₃ Metal Oxide Heterojunction - A Clue of a Role of Intergranular Layers in ZnO Varistors", Grain Boundary in Semiconductors, pp 381-392, 1982.
- (23)- Einzinger, R. "Metal Oxide Varistors", Ann. Rev.Mater. Sci., 17, pp 299-321, 1987.
- (24)- Eda, K. "Zinc Oxide Varistors", IEEE Electrical Ins. Magazine, Vol. 5, n^o 6, pp 28-40, Nov/dec 1989.

- (25)- Brushman, B. et alii. "Electrical and Dielectric Behavior of a Zinc Oxide Compost", J. Appl. Phys., Vol 52, n^o 4, pp 2932-2936, Apr. 1981.
- (26)- CESI. "Pára-raios de Alta Tensão", Seminário para Eng^{OS} da Chesf, Março 1989.
- (27)- Levinson, L.M. & Philipp, H.R. "The Phisics of Metal Oxide Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 46, n^o 3, pp 1332-1341, March 1975.
- (28)- Leite, E. R. "Novo Modelo de Degradação de Varistores de ZnO", U.F.SCar, Tese de Mestrado, São Carlos, 1990.
- (29)- Eda, K. "Conduction Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramics", J. Appl. Phys., Vol. 49, n^o 5, pp 2964-2972, May. 1978.
- (30)- Mahan, G.D. et alii. "Theory of Conduction in ZnO Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 50, n^o 4, pp 2799-2812, April 1979.
- (31)- Emtage, P. R. "The Physics of Zinc Oxide Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 48, n^o 10, pp 4372-4383, Oct. 1977
- (32)- Pike, G.E. "Electronic Properties of ZnO Varistors: A New Model", Mater. Res. Soc. Proc., Vol. 5, pp 369-379 1982
- (33)- Blatter, G. & Greuter, F. "Carrier Transport Through Grain Boundaries in Semiconductors", Physical Review B Vol. 33, n^o 6, pp 3952-3966, March 1986.

- (34)- Blatter, G. & Greuter, F. "Electrical Breakdown at Semiconductor Grain Boundaries", Physical Review B, Vol. 34, n^o 12, pp 8555-8572, Dec. 1986.
- (35)- Hower, P.L. & Gupta, T.K. "A Barrier Model for Zinc Oxide Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 50, n^o 7, pp 4847-4855, July 1979
- (36)- Greuter, F. et alli. "Conduction Mechanism in ZnO-Varistors: An Overview", 1989.
- (37)- Yu-jin, L. et alii. "Survey of Low Current Characteristics of Metal Oxide Varistors", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, paper 82-11, p 3, Braunschweig, Aug. 1987.
- (38)- Hongyan, Z. "Study on the Power Loss Characteristics of ZnO Arresters Elements Used in H.V.D.C Converter Station", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, paper 83-03, p 4, Braunschweig, Aug. 1987
- (39)- Haddad, A. et alli. "Characterization of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages", IEE Proceedings, Vol. 137, Pt A, n^o 5, pp 269-279, Sep.1990.
- (40)- Horiuchi, S. et alii. "Power Dissipation Characteristics of Zinc-Oxide Arresters for HVDC Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, n^o 4, pp 1666-1671, Oct. 1988.
- (41)- Oyama, M. et alli. "Life Performance of Zinc-Oxide

- Elements Under DC Voltage", IEEE Trans. on P.A.S., Vol PAS-101, n^o 6, pp 1363-1368, June 1986.
- (42)- Burger, U. & Knetch, B. "Zinc Oxide Arresters: Principle, Protection Characteristics, Tests and Experience", Cigre, paper O 33-07, p 8, Aug./Sep. 1980
- (43)- Tominaga, S. et alii. "Stability and Long-Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on P.A.S., Vol. PAS-99, n^o 4, pp 1548-1556, Jul./Aug. 1980.
- (44)- Lat, M. V. "Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans on P.A.S., Vol. PAS-104, n^o 10, pp 2665-2674, Oct. 1985.
- (45)- Schmidt, W. et alii. "Behaviour of MO-Surge-Arrester Blocks to Fast Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, n^o 1, pp 292-300, Jan. 1989.
- (46)- Kobayashi, M. et alii. "Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. EI-21, n^o 6, pp 989-996, Dec. 1986.
- (47)- Ritcher, B. et alii. "Measurement of the U-I Characteristics of MO-Resistors at Current Impulses of Different Wave-Shapes and Peak Values", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, paper 82-03, p 4, Braunschweig, Aug. 1987.
- (48)- Levinson, L.M. & Philipp, H.R. "AC Properties of Metal Oxide Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 47, n^o 3, pp 1117-1122, March 1976.

- (49)- Levinson, L.M. & Philipp, H.R. "High Frequency and High Current Studies of Metal Oxide Varistors", J. Appl. Phys., Vol. 47, n^o 7, pp 3116-3121, Jul.1976.
- (50)- Matsuura, M. & Yamaoki, H. "Dielectric Dispersion and Equivalent Circuit in Nonohmic ZnO Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 16, n^o 7, pp 1261-1262, 1977.
- (51)- Elli, E. et alli. "Laboratory Tests to Characterize Metal Oxide Surge Arresters", L' Energia Elettrica", n^o 2, pp 81-88, 1986.
- (52)- Eda, K. "Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Currents", J. Appl. Phys., Vol. 56, n^o 10, pp 2948-2955, 1984.
- (53)- "IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits", ANSI/IEEE C62.11, 1987.
- (54)- Standard of The Japanese Electrotechnical Committee. "Metal Oxide Surge Arresters", JEC - 217, 1984
- (55)- IEC. "Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for AC Systems", IEC 99-4 Part 4, 1991.
- (56)- Tominaga, S. et alii. "Electrical Properties of Zinc Oxide Valve Element for a Surge Arrester", IEEE, paper A 78 595-1
- (57)- Oliveira Filho, O. B. & Da Silva, A. N. "Medição das Perdas Joule em Pára-Raios de ZnO", Relatório Técnico Cepel, n^o 075/85, p18, 1985.

- (58)- Naidu, S. R. & Srivastava, K. D. "The Validity of Circuits for Measuring the Resistive Leakage Current of Zinc Oxide Arresters", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, paper 82-12, p 4, Braunschweig, Aug. 1987
- (59)- Deep, G. S. & Novacki, K. "Measurement of Resistive Leakage Current of Metal Oxide Surge Arresters", Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, paper 64-07, p 3, Athens, Sept. 1983
- (60)- Erven, C.C. "Application of Metal Oxide Surge Arresters on Power Transmission Systems", Presented to Power System Planning and Operation Section - Canadian Electrical Association - Spring Meeting, Toronto, March 1984.
- (61)- Kirkby, P. et alli. "The Long Term Stability of Valve Elements Used in Metal Oxide Arresters", Canadian Electrical Association CEA no 199 T 425, Jul. 1986.
- (62)- Ekstrom, A. "Application Guide for Metal Oxide Arresters Without Gaps for HVDC Converter Stations", Working Group 33/14.05 Cigre.
- (63)- Verdolin, R. T. "Avaliação do Desempenho de Pára-Raios de SiC e ZnO por Meio de Ensaio de Laboratório", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1983