

# FALHAS ELETROTÉRMICAS EM BLOCOS CERÂMICOS VARISTORES<sup>1</sup>

José Geraldo de Melo Furtado<sup>2</sup>

Flávio Bittencourt Barbosa<sup>3</sup>

Rodrigo Dias<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho estudou-se o comportamento eletrotérmico de blocos cerâmicos varistores de óxido de zinco utilizados em pára-raios de linhas de distribuição de energia elétrica, relacionando este comportamento às características microestruturais das cerâmicas avaliadas, mediante o levantamento das curvas características tensão-corrente e tensão-capacitância, tensão de referência, tensão residual a impulso atmosférico, testes com ciclos de polarização e despolarização, além de ensaios de degradação induzida. Técnicas de microscopia, difração de raios-X e densimetria foram empregadas na caracterização microestrutural. Os resultados evidenciaram que a técnica de monitoramento da componente resistiva da corrente de fuga é fundamental para avaliação da qualidade dos blocos varistores e que a região do comportamento elétrico dos varistores estudados mais sensível à degradação foi a região linear (pré-ruptura), uma vez que o crescimento da corrente de fuga é o principal problema da atual tecnologia de varistores.

**Palavras-chave:** Caracterização eletrotérmica; Varistores; Para-raios.

## ELECTROTHERMAL FAILURES IN VARISTOR CERAMIC BLOCKS

### Abstract

In this work is studied the electrothermal behavior of varistor ceramic blocks used in high voltage surge arresters of transmission and distribution lines, relating this behavior to microstructural characteristics of the studied varistor ceramics. We studied blocks of zinc oxide varistors with nominal voltage of 4.0 kV, by voltage-current and voltage-capacitance characterization curves, reference voltage test, impulse residual voltage, polarization tests and induced degradation tests. On the other hand, the microstructural characterization was made by scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy. The obtained results allow to correlate the behavior of the resistive component of the leakage current with the microstructural characteristics of the studied varistors, especially in pre-breakdown region

**Key words:** Electrothermal characterization; Varistors; Surge arresters.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *D.Sc., Pesquisador, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, C.P. 68007, 21940-970, Rio de Janeiro, Brasil. furtado@cepel.br*

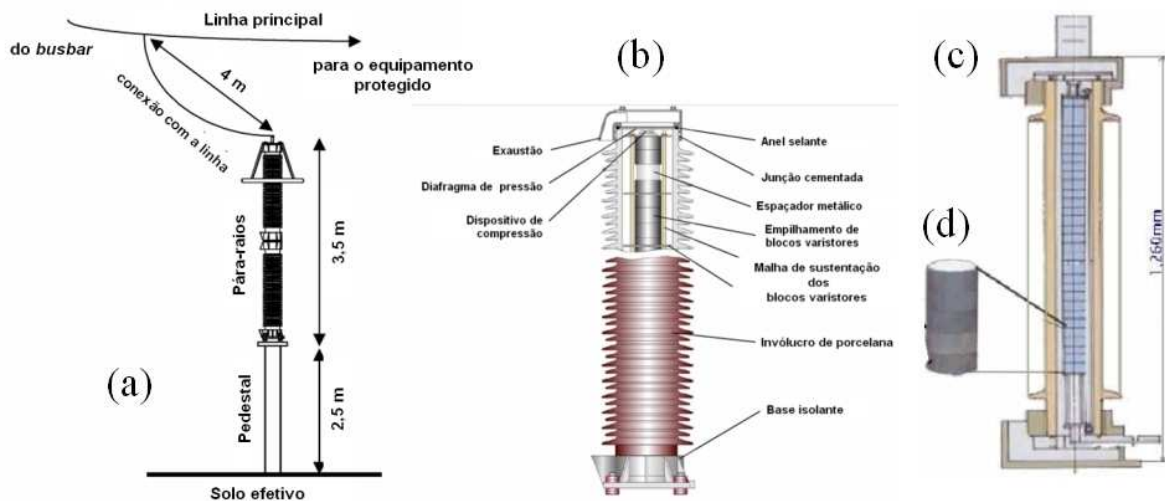
<sup>3</sup> *M.Sc., Pesquisador, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, C.P. 68007, 21940-970, Rio de Janeiro, Brasil. fbb@cepel.br*

<sup>4</sup> *Graduando., Técnico, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, C.P. 68007, 21940-970, Rio de Janeiro, Brasil. rodrigodias@cepel.br*

# 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência estão submetidos invariavelmente a sobretensões de origem externa provocadas por descargas atmosféricas ou de origem interna provenientes de operações de manobra e de ocorrências de curto circuito no sistema.<sup>(1)</sup> O efeito destas sobretensões sobre os equipamentos depende basicamente das suas características construtivas. A falha de isolamento em um transformador, resulta na retirada deste do sistema para reparos. Já em uma linha de transmissão ou distribuição, a falha de isolamento acarreta no desligamento do sistema, podendo provocar vultuosos prejuízos nos mais diversos setores.<sup>(1,2)</sup>

Dentre os dispositivos atualmente utilizados para reduzir o efeito proveniente das sobretensões sobre os equipamentos instalados nas redes elétricas, o pára-raios tem se mostrado como o mais eficaz. O pára-raios tem a importante função de detectar e limitar as elevadas sobretensões transitórias nos terminais dos equipamentos por ele protegidos a níveis pré-estabelecidos, tais que o isolamento destes equipamentos não fique com a sua característica afetada após a ocorrência de uma sobretensão. A operação adequada do pára-raios está intimamente ligada ao compromisso de confiabilidade do sistema.<sup>(1)</sup> A Figura 2 mostra uma configuração típica de ligação de pára-raios no sistema elétrico, bem como esquemas construtivos destes dispositivos, evidenciando a colocação dos blocos varistores, que são os componentes ativos dos pára-raios, essencialmente responsáveis pelo desempenho elétrico destes dispositivos de proteção.



**Figura 1.** (a) Configuração típica de ligação de pára-raios no sistema elétrico; (b) e (c) exemplos de esquemas construtivos de pára-raios; (d) blocos varistores.

Em décadas anteriores, os pára-raios eram na sua totalidade do tipo de carbetto de silício (SiC), constituídos basicamente pelos blocos varistores de SiC conectados 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.<sup>(1-3)</sup> Esta tecnologia de varistores perdurou sem concorrência até o final da década de 1960, quando um novo tipo de dispositivo utilizado para proteção contra sobretensões foi desenvolvido pela Matsushita Electrical Co. Ltd.<sup>(2)</sup> Este dispositivo, formado por varistores cerâmicos à base de óxido de zinco (ZnO) dopado com pequenas quantidades de outros óxidos metálicos, apresentou um alto grau de não-

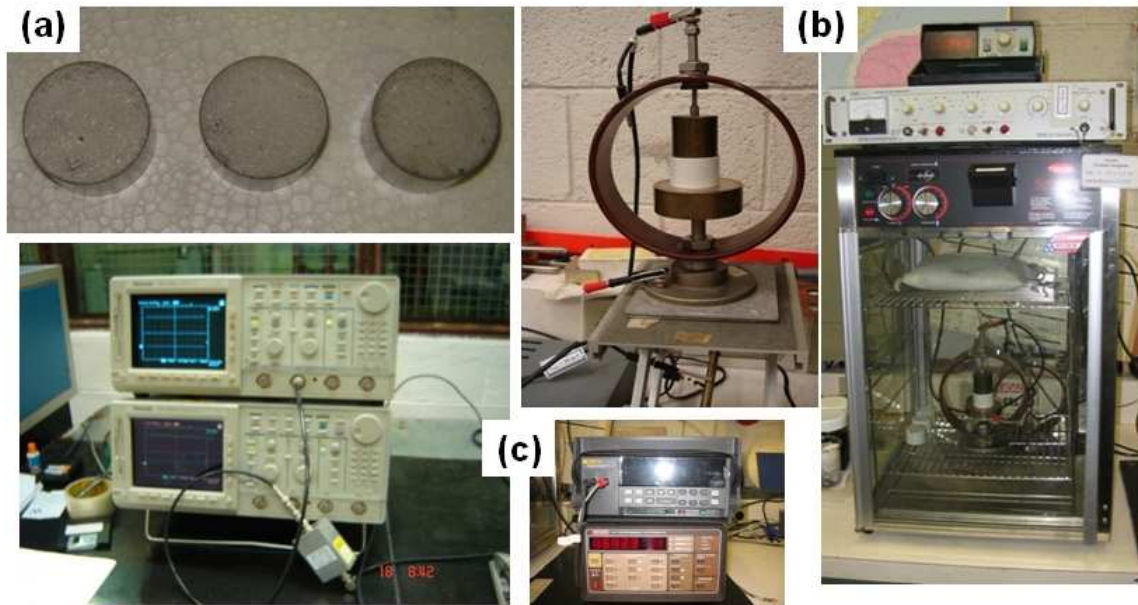
linearidade na sua característica tensão *versus* corrente, proporcionando baixos valores de corrente de fuga na região de operação, associado a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação do sistema. Esses varistores foram produzidos em escala comercial a partir 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 licença da Matsushita, iniciaram estudos visando o desenvolvimento da varistores que pudessem ser utilizados em sistemas elétricos de potência.<sup>(1,2)</sup> Os varistores à base de ZnO 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 elevada tensão.

Desde o desenvolvimento dos primeiros pára-raios para aplicação nos 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. 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.<sup>(1-3)</sup> De fato, os aspectos relacionados a degradação físico-química e eletrotérmica dos varistores têm sido apontados como o principal gargalo da atual tecnologia de varistores.<sup>(4)</sup>

Este trabalho tem por objetivo apresentar alguns resultados acerca da avaliação das características de comportamento eletrotérmico, relacionando-as as características microestruturais de blocos varistores utilizados em pára-raios de altas tensões. Tais características condicionam o desempenho do dispositivo e podem ocasionar as falhas eletrotérmicas que resultam na destruição dos varistores e na desproteção dos sistemas elétricos.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os estudos foram efetuados em blocos varistores com a seguinte especificação: Tensão nominal igual a 4,0 kVef; máxima tensão contínua de operação de 3,4 kV; corrente de descarga nominal igual a 10,0 kA; corrente de referência de 1,0 mA; tensão de referência mínima de 4,2 kVef; classe 1 de descarga de linhas de transmissão; tensão residual média igual a 12,0 kV. O diâmetro nominal das amostras ensaiadas é de  $(42\pm 1)$  mm e a espessura é de  $(28\pm 1)$  mm. O peso das amostras é de  $(215\pm 15)$  g. Para evitar medições incorretas devido ao efeito de umidade, antes de cada etapa de ensaios as amostras foram submetidas a uma etapa de secagem a uma temperatura de  $(60\pm 5)$ °C. A Figura 2 mostra alguns exemplares dos blocos varistores estudados e arranjos experimentais empregados nos ensaios de determinação das características elétricas e dielétricas.



**Figura 2.** (a) Alguns dos blocos varistores estudados; (b) arranjos experimentais e (c) equipamentos de medição utilizados na determinação das características elétricas e dielétricas dos varistores.

Para a execução dos diversos ensaios foram utilizados trinta blocos varistores e os ensaios compreenderam o levantamento das curvas características tensão x corrente e tensão x capacitância, corrente de fuga, tensão de referência e tensão residual a impulso atmosférico e corrente de polarização e despolarização antes dos ensaios de degradação dos varistores. Após os ensaios iniciais os varistores serão separados em três grupos de nove varistores para a realização de ensaios de degradação e os três varistores restantes serão utilizados para as observações microscópicas (MEV). Para a degradação dos varistores serão realizados os seguintes procedimentos: ensaio de corrente de longa duração consistindo na aplicação de 18 impulsos com duração total do impulso de  $2000 \mu\text{s}$ ; <sup>(3)</sup> ensaio de condicionamento consistindo na aplicação de 20 impulsos de corrente com forma  $8/20 \mu\text{s}$  e amplitudes de 1,0 p.u. e 2,0 aplicados com o varistor submetido a uma tensão de frequência industrial, igual a 1,2 vezes a sua máxima tensão contínua de operação; <sup>(3)</sup> ensaio de múltiplas descargas consistindo na aplicação de 4 grupos de impulsos quádruplos de corrente com forma de onda  $8/20 \mu\text{s}$ , crista 1,0 p.u., e com tempo entre descargas de  $20 \mu\text{s}$ - $40 \mu\text{s}$ , aplicados com o varistor submetido a uma tensão de frequência industrial, igual a sua tensão nominal.

Após a realização dos ensaios de degradação, os varistores foram novamente submetidos aos ensaios de tensão residual a impulso atmosférico, tensão de referência e corrente de polarização e despolarização para estudo comparativo com as medições realizadas anteriormente, também foram realizadas observações microscópicas (MEV) e análise química elementar por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) nos varistores degradados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

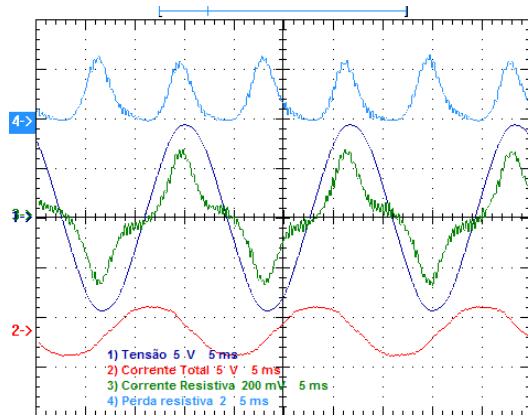
A Figura 3 apresenta alguns oscilogramas obtidos a partir dos ensaios não destrutivos efetuados para caracterizar elétrica e dielectricamente os blocos varistores estudados. Tem-se as curvas características (tensão x corrente total, tensão x corrente resistiva e tensão x perdas resistivas), tensão de referência e

tensão residual das amostras ensaiadas, a partir dos quais foram obtidos os resultados numéricos médios que serão considerados adiante.

As curvas do comportamento elétrico tensão versus corrente elétrica exibidas nas Figura 3(a) e 3(b) evidenciam claramente os valores típicos de tensão de chaveamento da ordem de 4,0 kV. As perdas por efeito Joule (potência dissipada) são compatíveis com os valores comumente apresentados por blocos varistores empregados em pára-raios com valores de tensão de ruptura que tem sido considerada neste trabalho, bem como os comportamentos da tensão de referência na corrente de 1 mA e da tensão residual na corrente de descarga nominal, apresentados respectivamente nas Figuras 3(c) e 3(d). Contudo, os resultados de tensão residual e tensão de referência não apresentaram nenhum aumento significativo em relação às medições antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente, caracterizada por elevada absorção de energia, e também na região altamente não linear. Não foi possível medir a tensão de referência após o ensaio de degradação devido à descarga externa no varistor.<sup>(5)</sup>

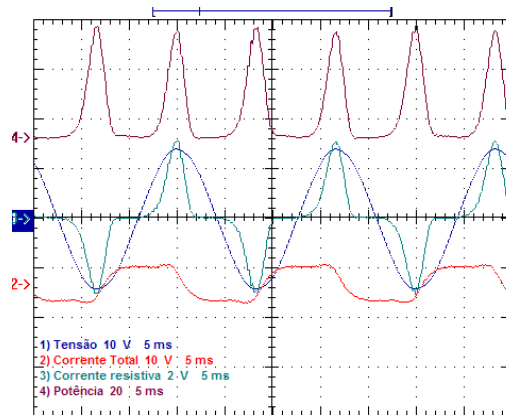
A partir de diversas análises, tais como as apresentadas na Figura 3, pôde-se determinar o comportamento da corrente elétrica de fuga total e sua componente resistiva, antes e após os ensaios de degradação dos dispositivos, conforme é apresentado na Figura 4, para valores médios das amostras estudadas. Nota-se que o incremento da componente resistiva da corrente de fuga é mais pronunciado a partir de aproximadamente 2,5 kV, atingindo um crescimento pós-degradação da ordem de 50% do valor original para tensões próximas a tensão de ruptura dos blocos estudados. Como indicado em vários estudos disponíveis,<sup>(4,6,7)</sup> este fato é pouco notado a partir da análise da corrente total, em função da maior faixa de variação da componente capacitiva devida à carga e descarga do dispositivo. De fato, à medida que a tensão de polarização aumenta é que se torna possível perceber a diferenciação de comportamentos da corrente total, principalmente para valores de tensão superiores a 3,5 kV.

Escala Vertical:  
 Potência: 84 mW → sinal superior  
 Tensão: 2100 V/div. → sinal central  
 Corrente resistiva: 10  $\mu$ A/div. → sinal central  
 Corrente total: 50  $\mu$ A/div. → sinal inferior  
 Escala Horizontal: 5 ms/div.



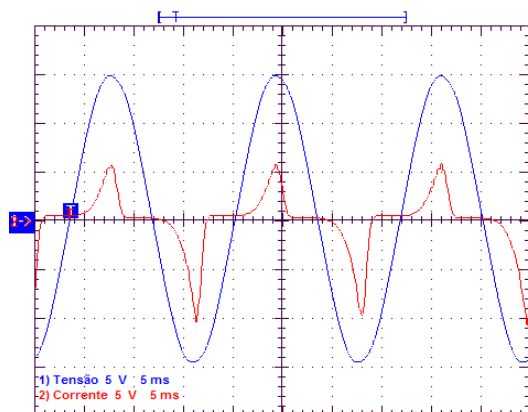
(a)

Escala Vertical:  
 Potência: 84 mW → sinal superior  
 Tensão: 2100 V/div. → sinal central  
 Corrente resistiva: 10  $\mu$ A/div. → sinal central  
 Corrente total: 50  $\mu$ A/div. → sinal inferior  
 Escala Horizontal: 5 ms/div.



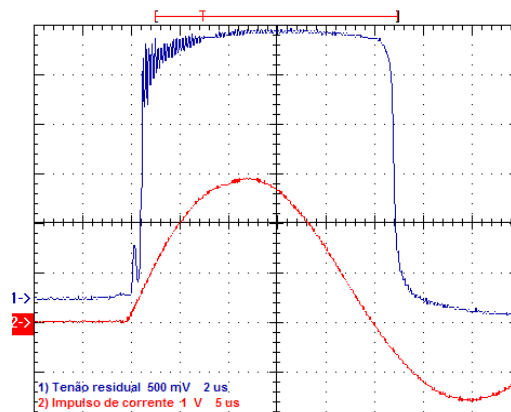
(b)

Escala Vertical:  
 Tensão: 2100 V/div. → sinal central  
 Corrente resistiva: 0,5 mA/div. → sinal central  
 Escala Horizontal: 5 ms/div.



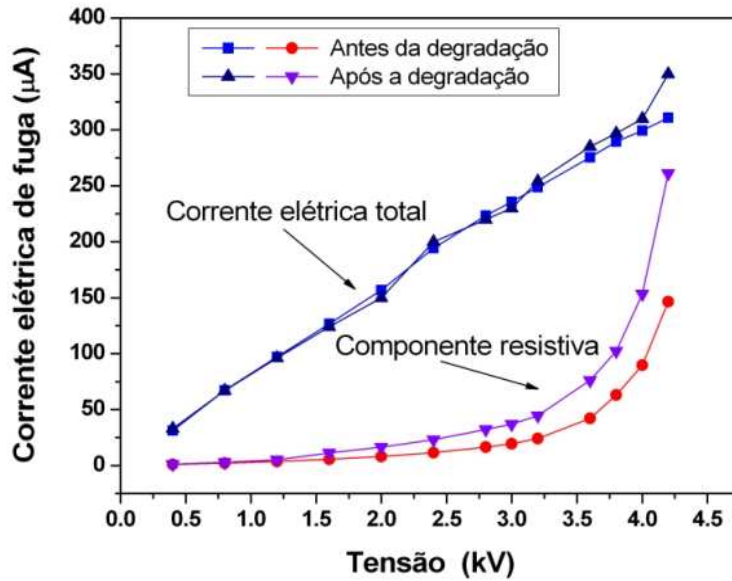
(c)

Escala Vertical:  
 Tensão: 2060 V/div. → sinal superior  
 Corrente : 0,5 mA/div. → sinal inferior  
 Escala Horizontal: 5  $\mu$ s/div.



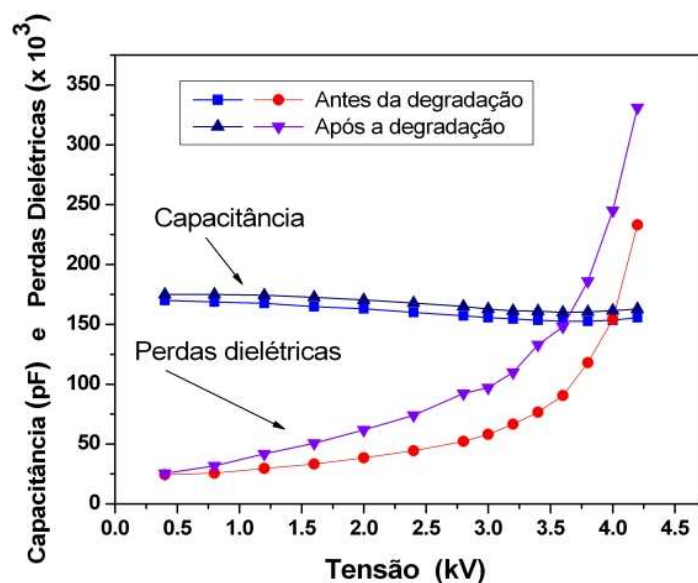
(d)

**Figura 3.** Alguns oscilogramas utilizados para as medições de corrente, tensão e potência. (a) e (b) Oscilograma da curva característica V-I, com os sinais de potência, tensão e correntes total e resistiva, (c) Tensão de referência na corrente de 1 mA, (d) Tensão residual na corrente de descarga nominal.



**Figura 4.** Comportamento médio da corrente de fuga (total e componente resistiva) característico dos blocos varistores estudados.

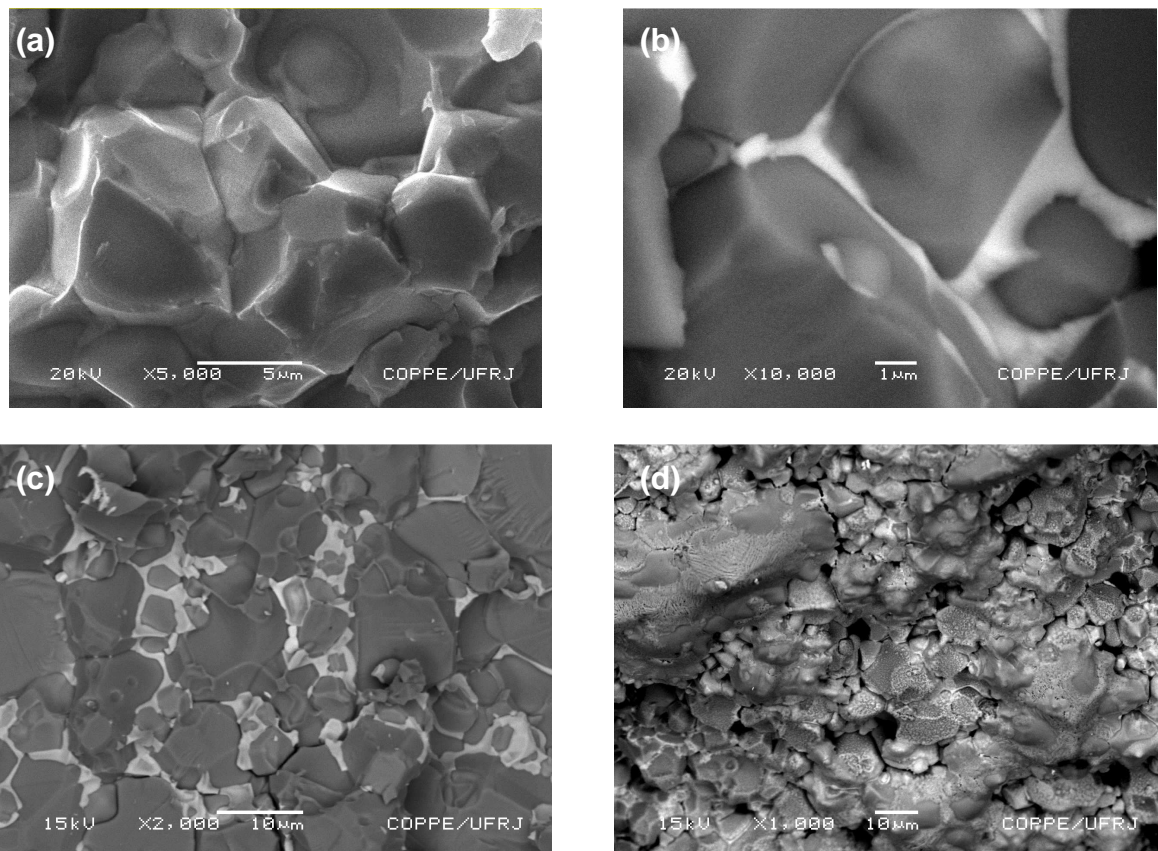
De forma complementar, a Figura 5 apresenta os resultados da caracterização dielétrica, sob as mesmas condições consideradas na análise apresentada na Figura 4. Têm-se os valores de capacitância e de perdas dielétricas (fator de dissipação de calor) em função da faixa de tensão aplicada. Verifica-se neste caso que embora as alterações na capacitância sejam insignificantes, tem-se que as perdas dielétricas são bastante pronunciadas em relação à condição anterior à degradação dos blocos (início dos ensaios). Com efeito, as discrepâncias entre os valores das perdas dielétricas antes e após a degradação são crescentes ao longo de toda a faixa de polarização analisada, chegando a um incremento superior a 60% para tensões mais próximas a tensão de ruptura dos blocos. Corroborando os resultados anteriores (Figura 3), este comportamento evidencia o papel preponderante do comportamento da componente resistiva da corrente de fuga em relação à componente capacitiva.



**Figura 5.** Comportamento dielétrico médio da capacitância e das perdas dielétricas característico dos blocos varistores estudados.

Na Figura 6 são mostradas fotomicrografias obtidas por MEV caracterizando a microestrutura dos blocos varistores analisados (três amostras). Nas Figuras 6(a), (b) e (c) verifica-se um elevado nível de densificação dos corpos cerâmicos, muito embora o caráter heterogêneo seja pronunciado, principalmente no que diz respeito à distribuição de camadas intergranulares e partículas de espinélio. Na Figura 6(d) tem-se a microestrutura de um bloco varistor após a condição de a avalanche térmica induzida, mostrando que está bem definida a área de queima, ou seja, houve uma grande degradação na microestrutura do material. Houve uma grande elevação de temperatura e conseqüentemente a deterioração das camadas intergranulares, com o aparecimento de pseudo-porosidade induzida por efeito eletrotérmico.<sup>(5,8)</sup>

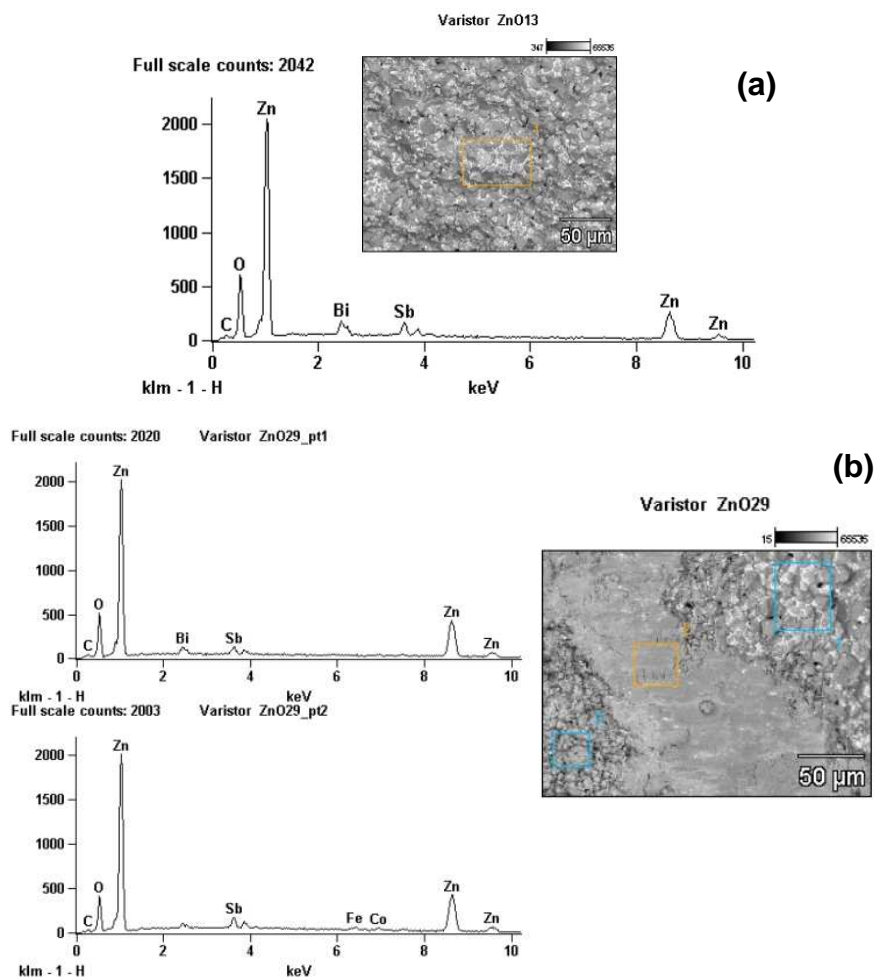
De fato, a vida útil de um varistor está intimamente relacionada com os efeitos eletrotérmicos, principalmente a corrente de fuga. Uma vez que, inexistindo falhas mecânicas e sob condições usuais, a vida útil do varistor será determinada, preponderantemente, pelo valor da componente resistiva da corrente de fuga ( $I_R$ ) e seu comportamento com respeito ao tempo, temperatura e tensão.<sup>(9,10)</sup> Com o aumento de  $I_R$  e a conseqüente produção de calor, se este não for adequadamente dissipado (o que é função das características microestruturais do varistor), a temperatura do dispositivo irá elevar-se rapidamente. Permanecendo nestas condições, o varistor irá alcançar um estado de descontrole térmico, levando ao colapso térmico do material e ao fim de sua vida útil.<sup>(11)</sup> Segundo um modelo proposto por Carlson, Gupta e Sweetana<sup>(12)</sup> um varistor está no fim de sua vida útil quando ele alcança uma densidade limite de potência, definida como o ponto onde a potência gerada excede a potência dissipada.<sup>(12,13)</sup>



**Figura 6.** Fotomicrografias (MEV) características dos blocos varistores estudados.



Na Figura 7 têm-se resultados de análises por EDS das respectivas áreas selecionadas a partir da Figura 6(d), verificando-se que na Figura 7(a) tem-se essencialmente os elementos característicos de uma formulação convencional<sup>(6,14)</sup> para cerâmicas varistoras. Já na Figura 7(b), obtida a partir da microestrutura do bloco varistor eletrotérmicamente degradado, verifica-se que na análise química elementar por EDS os principais elementos que compõem o varistor estão também presentes na análise, porém têm-se a presença de ferro e cobalto. No primeiro caso, provavelmente oriundo da difusão a partir da camada de metalização do varistor ou da degradação físico-química da camada de isolamento do dispositivo em função das elevadas temperaturas alcançadas durante a avalanche eletrotérmica e, no segundo caso, proveniente da análise em área maior, pois o cobalto possui um caráter anfótero quanto à dopagem do óxido de zinco.<sup>(8,9,14)</sup>



**Figura 7.** Análises por EDS características de regiões selecionadas dos blocos varistores estudados.

## 4 CONCLUSÃO

A partir de análises de propriedades dielétricas, como medições de capacitância, de perdas dielétricas, e do monitoramento da componente resistiva da corrente de fuga pôde-se observar que houve alguma degradação dos blocos varistores estudados, visto que estas medições são mais sensíveis a pequenas alterações em níveis inferiores aqueles que podem ser observados numa avaliação microestrutural, através da qual somente foi possível constatar alterações após degradação

irreversível em virtude de colapso eletrotérmico do dispositivo. Sob as condições estudadas constatou-se incrementos da componente resistiva da corrente de fuga e das perdas dielétricas de, respectivamente, 50% e 60% após as condições de degradação induzida empregadas. Dessa forma, verificou-se que a região do comportamento elétrico do varistor mais sensível às condições de degradação estudadas foi a região linear (pré-ruptura), o que corrobora a literatura técnica que aponta o crescimento da corrente de fuga como o principal problema da atual tecnologia de varistores.

## REFERÊNCIAS

- 1 FRANCO, J. L. Estudos das propriedades elétricas dos varistores de ZnO na região de baixas tensões aplicadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Área de Processamento de Energia, Junho de 1993.
- 2 OLIVEIRA, M. J. Avaliação do efeito geográfico-termal na capacidade de absorção de energia em pára-raios de ZnO. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Dezembro de 2004.
- 3 FRANCO, J. L. Curso sobre Pára-raios – Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, pp. 37-51, 2000.
- 4 LAGRANGE, A. Present and Future of Zinc Oxide Varistors. In: STEELE, B. C. H. (Org.) **Electronic Ceramics**, Londres, Elsevier Applied Science, p.1-27, 1991.
- 5 BARBOSA, F. B. Técnicas de diagnóstico e correlação com fenômenos de degradação em varistores de ZnO. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Março de 2007.
- 6 MARDIRA, K. P., T. K. Saha, R. A. Sutton. Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters. **IEEE Communications Magazine**, p. 1070-9878 - 2005.
- 7 SEGAL, D. L. Powders for Electronic Ceramics, In: STEELE, B. C. H. (Org.) **Electronic Ceramics**, Londres, Elsevier Applied Science, p. 1-27, 1991.
- 8 GUPTA, T. K. Application of Zinc Oxide Varistors. **J. Am. Ceram. Soc.**, v.73, n.7, p. 1817-1840, 1990.
- 9 GUPTA, T. K. Microstructural Engineering through donor and acceptor doping in the Grain and Grain Boundary of a Polycrystalline Semiconducting Ceramic. **J. Mater. Res.**, v.7, n.12, p. 3280-3295, 1992.
- 10 VOJTA, A.; CLARKE, D. R. Microstructural Origin of Current Localization and Puncture Failure in Varistor Ceramics. **J. Appl. Phys.**, v.81, n.2, p. 985–993, 1997.
- 11 GUPTA, T. K. Effect of Material and Design Parameters on the Life and Operating Voltage of a ZnO Varistor. **J. Mater. Res.**, v.2, n.2, p. 231-238, 1987.
- 12 CARLSON, W. G., GUPTA, T. K., SWEETANA, A. A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters for AC Application, **IEEE Trans. Power Delivery**, PWRD-1, v.2, p. 67-74, 1986.
- 13 LAWLESS, W. N., CLARK, C.F., PATTON, B. R., KHAN, F. S. Electrical and Thermal Properties of a Varistor at Cryogenic Temperatures. **J. Appl. Phys.**, v.64, n.8, p. 4223-4228, 1998.
- 14 CLARKE, D. R. Varistor Ceramics. **J. Am. Ceram. Soc.**, v.82, n.3, p.485-502, 1999.