



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO – GSE

CARACTERIZAÇÃO DE ENVELHECIMENTO DE PÁRA-RAIOS COM ENSAIOS ON-LINE E OFF-LINE

**J. L. da Silva Neto^{1*}, R. V. Ribeiro¹, T. A. de Oliveira Silva¹, E. S. Yague¹, F. L. Maciel¹, R. C. da S. B. Allil²,
C. C. de Carvalho, M. Bellar³, M. M. Werneck¹**

**¹LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E FOTÔNICA/PROGRAMA DE ENGENHARIA
ELÉTRICA/COPPE/UFRJ**

**²LABORATÓRIO DE OPTRÔNICA E SENSORES/DIVISÃO BÉLICA/CENTRO TECNOLÓGICO DO
EXÉRCITO/MINISTÉRIO DA DEFESA**

³UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

RESUMO

É sabido que a presença de componentes harmônicas na corrente de fuga de varistores pode ser um indicador do estado desse material [1]. Para impor um envelhecimento acelerado ao material, pastilhas de varistores foram submetidas a aquecimento e a tensão nominal. A metodologia utilizada consiste: *i*) na análise harmônica da corrente de fuga antes e após o envelhecimento acelerado; *ii*) no levantamento da curva V_{xl} antes e após o envelhecimento. O sistema de monitoramento da corrente de fuga consiste de um sensor de corrente conectado a um DSP (*Digital Signal Processor*) realizando cálculo de distorção harmônica.

PALAVRAS-CHAVE

Pára-raios, corrente de fuga, varistor, *phase-locked loop*, monitoramento.

1.0 – INTRODUÇÃO

A primeira geração de pára-raios a óxido de zinco (ZnO) ainda em serviço está chegando, talvez antecipadamente, próximo do seu fim de vida. Portanto, muitos usuários estão de fato interessados em métodos de verificação de desempenho destes equipamentos. Outra razão para esta demanda é o número cada vez crescente de subestações automatizadas, com reduzido efetivo técnico em situ.

Alguns equipamentos mais dispendiosos são usualmente monitorados. Em relação aos pára-raios, que são importantes como dispositivos de proteção, nenhum método padrão foi ainda estabelecido. Uma razão talvez seja o custo dos sistemas de monitoramento realmente confiáveis, que geralmente não se justifica para dispositivos relativamente baratos como os pára-raios. Em alguns casos, no entanto, particularmente em sistemas em altas tensões, é desejável para pára-raios também o diagnóstico ou a monitoração on-line [13].

Embora pára-raios de ZnO não requeiram convencionalmente manutenção, a verificação das condições deste equipamento a intervalos periódicos pode ser desejável do ponto de vista da instalação. Por razões práticas e econômicas é preferível que esta verificação possa ser executada sem a necessidade de desenergização ou desconexão do equipamento, especialmente quando altas tensões são consideradas. Esta restrição, obviamente, reduz o número de métodos disponíveis para avaliar as condições e estado do pára-raios.

Pára-raios com MOV (*metal-oxide varistor*) consistem de elementos de óxido de zinco, e seu circuito equivalente é mostrado na Figura 1.

A corrente total de fuga i fluindo pelo MOV é a combinação da componente capacitiva i_C e da componente resistiva i_R em fase com tensão terminal u . Este modelo é largamente utilizado para fins de monitoramento das condições do MOV e seu diagnóstico.

2.0 - FALHAS E DEGRADAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO METÁLICO

Os varistores de óxido metálico sofrem por degradação. Alguns varistores tornam-se mais condutivos depois de sujeitos a estresses seja por condução contínua ou de surto. Outros não mostram degradação abaixo de certa

* Av. Horácio Macedo nº 2.030 – Cidade Universitária – Centro de Tecnologia
Bloco I – Sala 034 – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ – Brasil - CEP 21941-598
Tel.: 2562-8200 – Fax: 2562-8201
luizneto@lif.coppe.ufrj.br

tensão limiar. A degradação do varistor é dependente da sua composição e fabricação, assim como da sua aplicação em serviço [7].

Os MOVs apresentam alta dissipação de potência em altas temperaturas com tensão fixa, o que pode ocasionar uma avalanche térmica. Se o aumento da dissipação de potência no varistor é mais rápido do que este pode dissipar calor para o ambiente, a sua temperatura aumenta até a destruição do dispositivo. Avalanches térmicas podem ser iniciadas seja por um surto ou série de surtos que depositam grande energia no varistor, seja por uma possível degradação gradual durante exposição a excessivas tensões de regime permanente.

A degradação de pára-raios em serviço pode ser agrupada em três tipos básicos: *i)* degradação sob a influência da tensão de operação; *ii)* degradação por correntes impulsivas; *iii)* degradação devida a reações químicas com a atmosfera circundante [2].

O aumento da corrente de fuga sob tensão de operação era evidente em pára-raios de primeira geração. Equipamentos modernos *state-of-the-art* exibem uma corrente constante ou decrescente sob tensão de serviço, resultando num comportamento estável. Correntes de descarga causadas por sobre-tensões podem produzir uma modificação na característica I_xV ("degradação impulsiva") ou mesmo acarretar a destruição do equipamento. Este último efeito pode acontecer devido a um estresse severo de impulso, o qual não tem relação com degradação prévia.

O comportamento de pára-raios sob corrente de descarga foi investigado no passado, e quase nenhuma degradação pôde ser observada para valores de correntes até a nominal. Correntes mais intensas que as de descarga nominal, no entanto, podem modificar a característica I_xV .

São conhecidos vários métodos de diagnósticos – *on-line* ou *off-line* – para monitoramento de pára-raios com varistores de óxido metálico [4-6][8][10][12][14]. Muitos casos são baseados na medida da corrente de fuga. Outros se baseiam em medidas das características I_xV ou na análise da intensidade do 3º harmônico contido na corrente de fuga. Harmônicos contidos na tensão podem interferir na análise harmônica da corrente de fuga [3][9][11].

Outras abordagens envolvem a medição de perdas de potência onde ambas tensões e correntes devem ser medidas.

3.0 - SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição da distorção harmônica da corrente de fuga que flui através do pára-raios foi desenvolvido tendo-se em conta dois sub-sistemas, que foram integrados posteriormente. Esta abordagem facilita o desenvolvimento do protótipo, permitindo uma melhor avaliação dos dispositivos e algoritmos envolvidos. O primeiro sub-sistema envolve um sensor magnético de corrente. Este sensor é composto de um transformador toroidal ferromagnético e uma placa de condicionamento do sinal. O segundo subsistema corresponde a um DSP com *software* dedicado, com um display LCD anexado para a exibição do THD (*Total Harmonic Distortion*).

3.1 - 1º Sub-sistema

O objetivo da montagem deste subsistema é o de calibrar e analisar a medida do sensor magnético de corrente. O primário do transformador é constituído de um circuito resistivo alimentado por um gerador de sinais. A função do resistor é tão somente reduzir a corrente a frações de μA . Portanto a corrente que passa pelo primário é estabelecida pela relação entre a tensão da fonte e a resistência conhecida. A bobina gera em seus terminais de saída uma tensão alternada, como o sinal de entrada, proporcional à derivada da corrente que atravessa seu primário. Além de derivar o sinal de entrada, ela proporciona uma atenuação de 0.36 V/A entre a corrente que atravessa seu primário e a tensão em seus terminais do secundário.

A placa de condicionamento do sinal filtra a tensão de entrada e aplica um ganho de 11367 V/V, acrescentando também um nível DC de 2.3 V.

O valor de atenuação da bobina de 0.36 V/A é obtido da seguinte forma:

$$V_{saída} = I_{entrada} \cdot Z_{bobina} \cdot A_{placa}$$

Onde $V_{saída}$ é a tensão de saída da placa de condicionamento de sinal, $I_{entrada}$ é a corrente que atravessa o primário da bobina, Z_{bobina} é o ganho total de transimpedância da bobina para 60 Hz e A_{placa} é o ganho de tensão da placa de condicionamento de sinal.

Sendo conhecidos a tensão de saída de 2.86 V, a corrente de entrada de 0.7 mA e o ganho da placa de 11367 V/V, pode-se inferir o ganho total de transimpedância da bobina para 60 Hz de 0.36 V/A.

O sinal condicionado é injetado em uma placa de aquisição de dados e coletado por um modelo de simulação em tempo real concebido no MATLAB/SIMULINK que implementa o cálculo do valor eficaz da corrente.

Primeiramente o sinal passa através de um filtro passa-altas com frequência de corte em 10 Hz que tem como objetivo eliminar o nível DC que havia sido introduzido pela placa de condicionamento de sinal. Em seguida é aplicado um filtro passa-baixas com frequência de corte em 1500 Hz para eliminar ruídos de alta frequência que interfiram nas medidas.

Após essa filtragem, um ganho é aplicado ao o sinal é amplificado para que ele mantenha a correspondência de amplitude com o sinal físico real.

Então ocorre a integração, uma vez que desejamos a corrente original e a bobina havia derivado a corrente primária.

A integração gera uma constante, o que significa nível DC na variável. Para eliminar esse fator indesejado aplica-se novamente um filtro passa-altas com frequência de corte em 10 Hz. A partir desse momento temos reconstruída a corrente. Basta agora calcular seu valor eficaz, seguindo a definição abaixo.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i^2 dt}$$

A Figura 2 exhibe a bobina – sensor magnético do tipo di/dt – e o circuito de condicionamento de sinal. Os fios verdes correspondem aos terminais secundários e os fios amarelo e branco são a saída da placa para conexão com o DSP.

A Figura 3 mostra a tensão do gerador de sinais em azul com 6 V de pico e frequência de 60 Hz. Portanto a corrente que flui pelo primário é de 0.6 mA de pico.

Em rosa está o sinal de saída da placa de condicionamento que é injetado na placa de aquisição e processado pelo MATLAB. Ele tem um nível DC fixo em 5 V, que foi agregado pela placa de condicionamento de sinal. Além disso, o sinal de tensão da bobina está defasado de 90° em relação à tensão imposta porque a bobina deriva a corrente primária.

A corrente primária de 0.6 mA de pico produziu uma tensão de 216 µV na saída da bobina devido à atenuação desta; em seguida foi amplificada pela placa por um fator de 11367 V/V e mediu-se uma amplitude de 2.5 V.

A Figura 4 mostra a corrente calculada pelo modelo MATLAB/SIMULINK a partir do sinal injetado na placa de aquisição de dados, e seu valor eficaz. Note que sua amplitude e frequência correspondem à corrente original medida pela bobina. Ademais, o valor rms (em verde) de aproximadamente 4.2 A, está sendo calculado on-line. Com o intuito de verificar a linearidade do sistema, a corrente no primário da bobina foi variada através de uma giga de corrente, e foram observados os diferentes valores eficazes calculados pelo MATLAB. Os resultados encontram-se na Tabela 1.

A partir dos valores encontrados, obteve-se o gráfico da Figura 5 e foi ajustada uma reta para verificar a linearidade. Pode-se notar que o modelo não está perfeito, pois existe um fator constante somado na equação da reta e sua inclinação é de aproximadamente 45°. Este resultado, contudo, é satisfatório visto que fatores adversos, como ruído de alta frequência, mesmo que atenuados ainda influenciam nas medidas.

3.2 - 2º Sub-sistema

Paralelamente ao sistema descrito no item anterior, foi implementado um sistema baseado no DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320C2812 da Texas Instruments, para o qual foi elaborado um programa para a medição da corrente de fuga do pára-raios e cálculo de sua distorção harmônica.

O DSP digitaliza a tensão produzida pelo circuito de condicionamento do sinal do sensor di/dt processando-o internamente. O programa realiza as seguintes operações com o sinal de entrada:

1. Subtração do nível DC;
2. Integração;
3. Filtragem;
4. Separação do 1º harmônico dos harmônicos superiores.

O conversor analógico-digital de 12 bits do DSP utilizado aceita sinais analógicos de valores entre 0 V e 3.3 V. Portanto, o sinal AC a ser processado apresenta um nível CC que deve ser removido por software.

Na segunda etapa ocorre a integração, com o objetivo de recompor a corrente original, que havia sido derivada pela bobina. Essa integração gera uma constante, que nesse caso significa um valor somado ao sinal alternado. Para eliminar esse fator utiliza-se um filtro passa-altas digital.

Em seguida, para obter-se o 1º harmônico da corrente - o sinal em 60 Hz - um PLL (*Phase-Locked Loop*) digital foi implementado. Este algoritmo tem como finalidade sincronizar com a fase do sinal para o qual o PLL é sintonizado (60 Hz), e rastrear a amplitude deste sinal [15]. Desse modo obtém-se a componente fundamental desejada. Para obter-se o sinal composto pelas outras componentes de frequência o 1º harmônico é subtraído do sinal original.

Para verificar o algoritmo implementado no programa, foi injetado no conversor analógico-digital do DSP um sinal conhecido através da placa de aquisição de dados que é comandada por um modelo MATLAB/SIMULINK. O sinal sintetizado tem apenas duas componentes de frequência, com amplitudes determinadas: uma em 60 Hz e outra em 180 Hz, o que equivale ao 1º e o 3º harmônicos.

Desse modo, pode-se examinar se os cálculos realizados pelo programa estão sendo efetuados de maneira correta. O modelo MATLAB encontra-se na Figura 6.

Após a digitalização e cancelamento do nível DC, o sinal de entrada é exibido no ambiente de desenvolvimento do programa do DSP, como ilustrado pela Figura 7. Pode-se comprovar que o sinal observado corresponde àquele enviado pela placa de aquisição de dados, com uma componente fundamental de 60 Hz somada a uma componente de 180 Hz (3º harmônico) cuja amplitude é de 80% da amplitude do 1º harmônico, produzindo a onda distorcida mostrada. Neste teste a quantidade de 3º harmônico foi propositadamente exagerada, pois após a integração esta componente sofre uma redução considerável (amplitude dividida pela frequência). A Figura 8 refere-se ao sinal de entrada após ser integrado, ou seja, a corrente. Note que devido à integração a parcela de 180 Hz ficou menos expressiva.

O sinal produzido pelo PLL é apresentado na Figura 9. Nota-se que a amplitude da componente em 60 Hz é

maior do que a do sinal do qual essa componente foi extraída, uma vez que a presença da parcela em 180 Hz reduz o tamanho do pico da senóide.

A Figura 10 e a Figura 11 exibem fotos do protótipo com caixa aberta e fechada respectivamente. O equipamento possui entrada para o cabo de alimentação do DSP e para o cabo paralelo, necessário para a embarcação do programa. Também possui um display LCD para a exibição do valor eficaz da corrente e do THD calculados.

4.0 - ENSAIOS REALIZADOS COM VARISTORES

Existem diversos procedimentos para se degradar artificialmente varistores. Ensaio nos quais correntes de valores elevados são aplicadas às amostras, envolvem fornecimento elevado de potência. Pode-se citar a aplicação de pulsos simples ou repetidos de corrente com formato de onda de dupla exponencial com constantes de tempo 8/20 μ s. Para a realização desses procedimentos o custo do aparato necessário seria elevado.

Por outro lado, a norma IEC 60099-4 sugere que deva ser aplicada tensão máxima de operação em amostras de varistores submetidas à temperatura de $115^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$ durante 1000 h. Com base nesta norma e após discussões com especialistas do Programa de Engenharia de Materiais da COPPE/UFRJ, foi decidido aplicar-se $140^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ em tensão máxima de operação e duração de aproximadamente 2500 h. Essas condições são notadamente mais severas do que as sugeridas pela norma.

As amostras de varistores foram fornecidas pela empresa Balestro. Um varistor de tensão normal de operação de 6 kV foi cortado nesta empresa em 6 pastilhas. Cada amostra, portanto, tem tensão normal de operação de aproximadamente 1 kV. Cada uma das amostras foi numerada e teve sua espessura medida (Tabela 2), o diâmetro é o mesmo para todas: de 46.80 ± 0.05 mm.

Nos ensaios de envelhecimento acelerado de varistores três amostras de pastilhas de aproximadamente 1 kV de tensão normal de operação são submetidas a tensão eficaz contínua de 1000 ± 20 V, dentro de estufa com temperatura controlada de $140\pm 1^{\circ}\text{C}$. Durante o ensaio as tensões sobre cada amostra bem como as correntes de fuga são aquisitadas.

No envelhecimento foram utilizadas as amostras 2, 4 e 5 por possuírem valores mais próximos de espessura, correspondendo às correntes i_1 , i_2 e i_3 nos gráficos da Figura 12 e da Figura 13.

Em primeiro lugar foram levantadas as características IxV em temperaturas diferentes para uma das amostras antes da degradação acelerada. O resultado é verificado na Figura 14. Observa-se que de acordo com o esperado a corrente aumenta com a temperatura da pastilha. O que equivale dizer que a resistividade diminui com o aumento da temperatura.

Numa análise *off-line* os valores de THD e valores eficazes totais foram calculados ao longo de aproximadamente quatro meses, até o dia 1º de abril de 2008, como mostram os gráficos da Figura 12 e da Figura 13. As amostras somente foram submetidas constantemente às condições citadas anteriormente, após 15 dias (aproximadamente 350 horas). No período dos 15 dias iniciais a tensão e temperatura previstas só eram aplicadas de 9:00 às 17:00, pois a confiabilidade do sistema ainda estava sendo avaliada.

A forma de onda da corrente de fuga após o envelhecimento de apenas uma amostra pode ser vista na Figura 15. As outras amostras apresentam correntes com formas similares.

Foram aferidas as tensões que produzem correntes na faixa 0.1 mA a 1 mA nas 3 pastilhas que passaram pelo processo de envelhecimento (nº2, nº4 e nº5) e nas outras 3 iniciais (nº1, nº3 e nº6). O resultado é exibido na Figura 16. A corrente de referência do varistor utilizado é de 0.6 mA.

5.0 – CONCLUSÕES

Os ensaios de envelhecimento acelerado de varistores tiveram como objetivo principal detectar comportamento característico na corrente de fuga em stand-by que revelasse degradação do dispositivo. Sabe-se que a degradação de pára-raios de ZnO está relacionada com a dissipação de energia pelo equipamento, durante a condução de altas correntes repetidamente durante o período de sua vida útil. Como discutido anteriormente, optou-se por método de envelhecimento no qual energia é fornecida continuamente durante período longo de tempo (requisitando baixa potência), ao contrário de métodos onde uma grande energia é fornecida em curto tempo (requisitando alta potência).

A Figura 13 e a Figura 14 revelam, no entanto, comportamento diferente do esperado. Nota-se um aumento inicial nos THDs e valores eficazes das correntes de fuga. A partir da milésima hora, aproximadamente, esses valores sofreram redução até se estabilizarem (as variações em torno dos patamares atingidos são devidas a variações de ± 20 V na tensão sobre as pastilhas). O comportamento obtido não permite inferir a degradação das amostras. Sendo assim, não foi possível estabelecer uma relação entre THD e degradação dos varistores – pelo menos para o método de envelhecimento escolhido – que seria utilizado em método de avaliação de Pára-Raios enquanto em operação em estações.

Os resultados obtidos, contudo, não invalidam a relação entre THD e degradação. É possível que a relação esperada só seja aparente em condições mais severas, conseguidas com a exposição das amostras a maiores temperaturas, ou através da aplicação de impulsos com alta amplitude de corrente.

Por outro lado, quando se analisa as características IxV até o valor de 1 mA para a corrente de fuga, obtém-se resultados compatíveis com os relatados na literatura [7]. As curvas levantadas são mostradas na Figura 16. Nesta análise eliminam-se as amostras 1 e 2, não envelhecida e envelhecida respectivamente, por apresentarem

comportamento significativamente distinto das demais. As características das amostras não envelhecidas 3 e 6 são muito semelhantes.

O comportamento expressivamente diferente das amostras 4 e 5 ressalta na Figura 16. A disparidade das características dessas amostras em relação as 3 e 6 pôde ser observada em varistores estressados com descargas de corrente acima da corrente nominal [7]. As alterações nas características IxV só são evidentes na região de baixas correntes. Mais expressivamente próximo à tensão de operação contínua. Observa-se que ali a corrente de fuga é até menor do que antes do envelhecimento. A intersecção entre os dois tipos de curva ocorre próximo à corrente de referência.

Neste trabalho desenvolveu-se um protótipo de bancada para medição da corrente de fuga de Pára-Raios. O projeto deste equipamento foi realizado tendo como restrição baixo custo para seus sub-sistemas, mantendo-se alto desempenho. Nesse sentido optou-se por uma plataforma digital (DSP) de ponto fixo. O algoritmo escolhido para análise harmônica não necessita de grande quantidade de memória, ao contrário de métodos baseados em FFT. A implementação digital de um PLL (*Phase-Locked Loop*) sintonizado em 60Hz é capaz de extrair a fase e o módulo do primeiro harmônico contido na corrente de fuga. O THD pode então ser obtido à partir do cálculo dos valores eficazes da corrente total e do primeiro harmônico. Isso propicia cálculo rápido e ao mesmo tempo confiável.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.Lundquist, L.StensTrom, A.Schei, B.Hansen, "New Method for Measurement of the Resistive Leakage Current of Metal-Oxide Surge Arresters in Service", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [2] K.Lahti, K.Kannus, K.Nousiainen, "Diagnostic Methods in Revealing Internal Moisture in Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [3] H.Zhu, M.R.Raghuveer, "Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arresters Diagnostics", IEEE 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [4] T.Zhao, Q.Li, J.Qian, "Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics Metal Oxide Surge Arresters Based on an Accurate Model", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [5] V.Hinrichsen, G.Scholl, M.Schubert, T.Ostertag, "Online Monitoring of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters by Wireless Passive Surface Acoustic Wave (SAW) Temperature Sensors", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999, Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
- [6] S.Shirakawa, F.Endo, H.Kitajima, S.Kobayashi, K.Kurita, K.Goto, M.Sakai, "Maintenance of Surge Arresters by a Portable Arrester Leakage Current Detector", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988.
- [7] C.Heinrich, V.Hinrichsen, "Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage – Comparison of Existing and Newly Developed Procedures", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001.
- [8] T.Klein, W.Kohler, K.Feser, W.Schmidt, R.Bebensee, "A New Monitoring System for Metal-Oxide Surge Arresters", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999, Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
- [9] S.Fernando, M.Raghuveer, "Technique to Examine the Influence of Voltage Harmonics on Leakage Current Based MOSA Diagnostic Indicator", IEEE 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [10] O.Nigol, "Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [11] H.Zhu, M.Raghuveer, "Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arresters Diagnostics", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001.
- [12] K.Kannus, K.Lahti, "Evaluation of the Operational Condition and Reliability of Surge Arresters Used on Medium Voltage Networks", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
- [13] D.Birelli, R.Standler, "Failures of Surge Arresters on Low-Voltage Mains", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993.
- [14] K.Mardira, T.Saha, R.Sutton, "Investigation of Diagnostics Technics for Metal Oxide Surge Arresters", IEEE 2005.
- [15] Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M.R. "A new phase-locked loop (PLL) system," 2001. MWSCAS 2001. Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 1, pgs. 421-424.

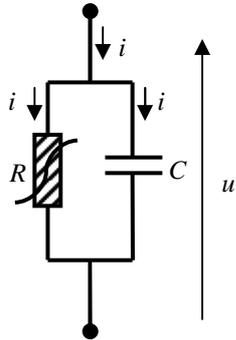


FIGURA 1 - Modelo simplificado do MOV.

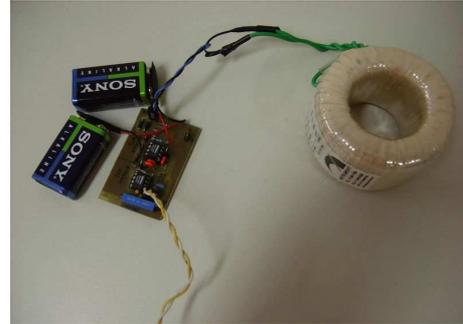


FIGURA 2 - Bobina e placa de condicionamento de sinal.

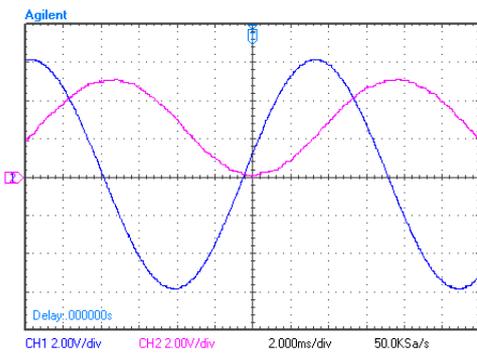


FIGURA 3 - Sinal do gerador (azul) e saída da placa de condicionamento (rosa).

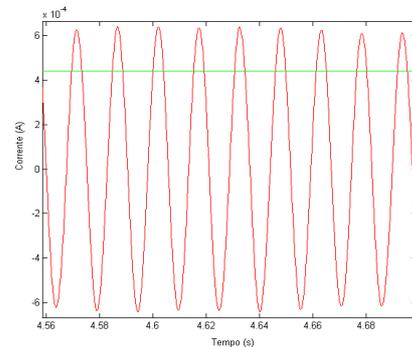


FIGURA 4 - Corrente calculada pelo MATLAB, em vermelho, e seu valor rms, em verde

TABELA 1
Verificação da linearidade da medição de corrente

Número da amostra	Espessura (mm) ±0.05
1	8,10
2	8,15
3	7,15
4	8,15
5	8,15
6	8,10

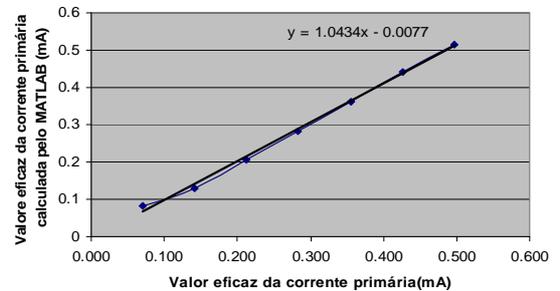


FIGURA 5 - Resposta da medição de corrente e ajuste de reta.

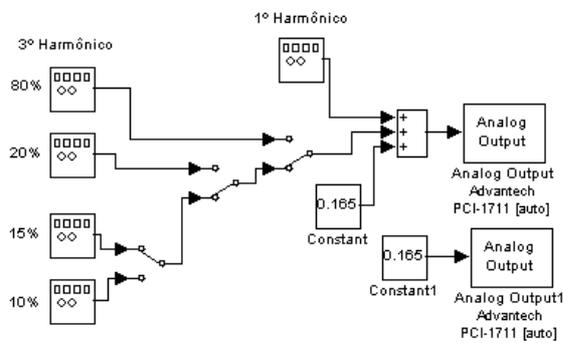


FIGURA 6 - Modelo de simulação no SIMULINK/MATLAB utilizado para testar os algoritmos embarcados no DSP.

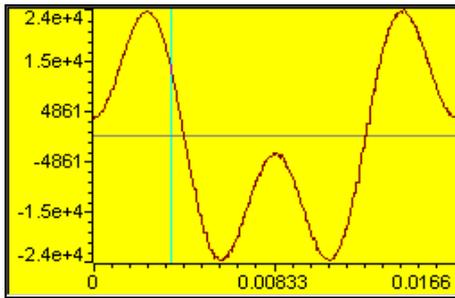


FIGURA 7 - Sinal de entrada.

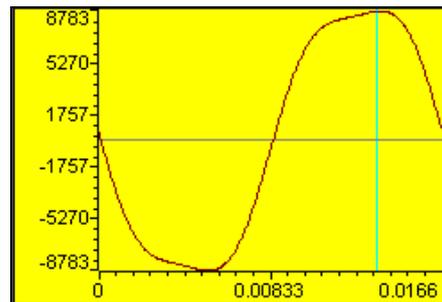


FIGURA 8 - Sinal de entrada integrado.

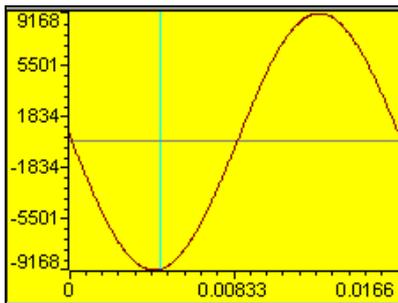


FIGURA 9 - 1º harmônico de corrente.

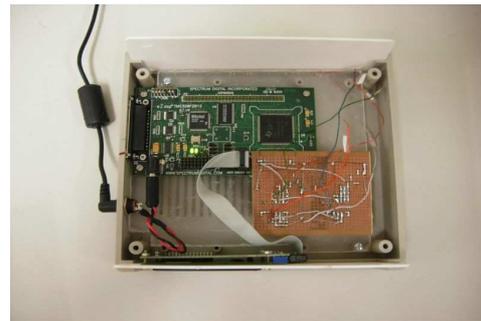


FIGURA 10 - DSP com display LCD.



FIGURA 11 - Protótipo em caixa fechada.

TABELA 2. Espessuras das amostras de varistores

Número da amostra	Espessura (mm) ± 0.05
1	8,10
2	8,15
3	7,15
4	8,15
5	8,15
6	8,10

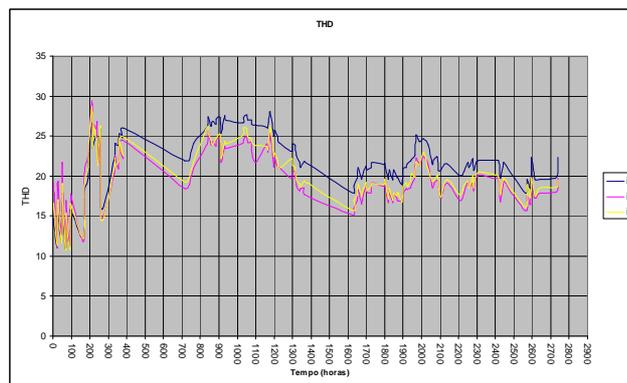


FIGURA 12. THDs (%) calculados das correntes de fuga.

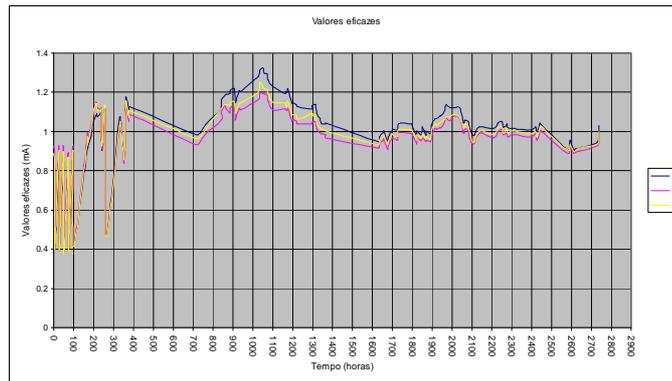


FIGURA 13. Valores eficazes totais das correntes de fuga.

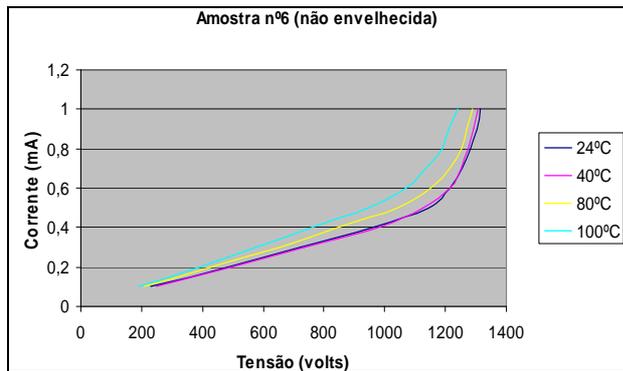


FIGURA 14 - Características IxV parametrizadas pela temperatura.

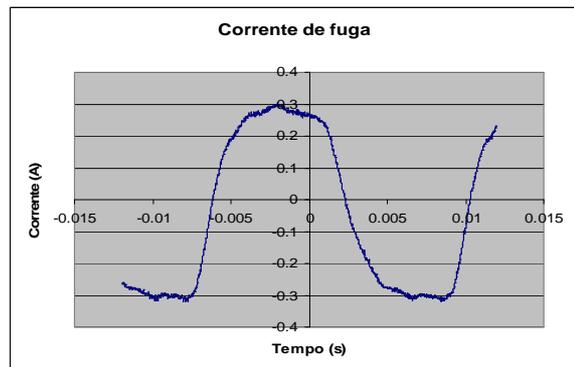


FIGURA 15 - Corrente de fuga em uma amostra após envelhecimento.

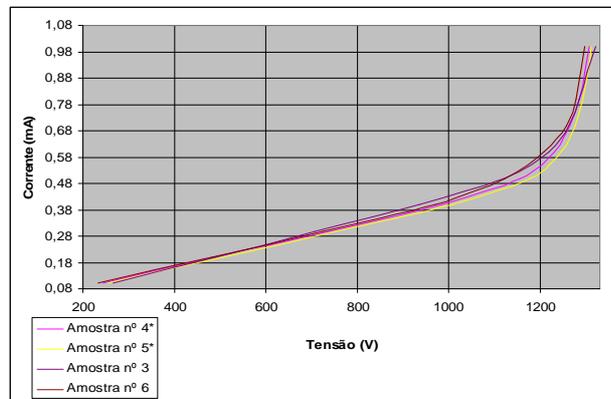


FIGURA 16 - Comparação das características IxV das pastilhas de varistres envelhecidas e não envelhecidas.