

# SENSOR DE CORRENTE INDUTIVO À BASE DE LIGAS NANOCRISTALINAS

Lira, Jose G. A.<sup>1</sup>, Macedo, E. C. T.<sup>1</sup>, Costa, E. G.<sup>1</sup>, Luciano, B. A.<sup>1</sup>,  
Freire, R. C. S.<sup>1</sup>, Marcelo J. A. Maia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Brazil,  
liragutemberg@gmail.com

Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970 Paraíba (PB), Brasil

<sup>2</sup> Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF, Recife, Brasil, mjamaia@chesf.gov.br

**Abstract:** In this paper the design and application of an inductive magnetic sensor based on nanocrystalline alloys are described. The sensor is adjusted for the measurement and monitoring of currents with intensities from some microamperes to miliamperes. Its functional behavior, performance and a specific application are described. One of the biggest advantages of this current sensor is its non-invasive characteristic that means, no direct contact with the circuit that is being monitored is required. It becomes appropriate for diverse applications where this requirement is necessary. An example of application for this sensor is the metal oxide surge arresters leakage current monitoring.

**Keywords:** Current Sensor, Nanocrystalline Alloys, Magnetic Permeability, ZnO Surge Arresters.

## 1. INTRODUÇÃO

As ligas nanocristalinas ferromagnéticas são, em geral, materiais magneticamente moles, ou seja, possuem alta permeabilidade  $\mu$ , baixa coercividade  $H_C$  e pequena perda por histerese, quando comparadas com outras ligas ferromagnéticas convencionais.

Esse tipo de material é constituído de uma estrutura física de nanocristais com diâmetros de aproximadamente 10 nanômetros, além de possuírem uma permeabilidade magnética constante sobre uma larga escala de amplitude do campo aplicado. Outra vantagem deste material é possuir indução de saturação superior quando comparada às ligas magneticamente moles convencionais, permitindo uma redução significativa das dimensões do núcleo [1].

Apesar de serem materiais ferromagnéticos que possuem alta permeabilidade magnética, deve-se tomar algumas precauções em sua utilização, sobretudo quanto ao ponto de operação que este se encontra sobre a curva de histerese  $B \times H$ , a fim de evitar problemas de não linearidade.

Outro aspecto relevante é que além dos elevados valores da permeabilidade magnética, a resistividade elétrica destas ligas varia muito pouco com a temperatura.

A alta permeabilidade magnética dessas ligas facilita o processo de magnetização do núcleo, exigindo um valor relativamente pequeno de corrente de excitação do enrolamento primário de um circuito magneticamente acoplado, fazendo com que seu uso em núcleos de

transformadores de corrente para fins de medição tenda a diminuir os erros na relação de tensão e de fase, quando comparada com materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos dos transformadores de corrente tradicionalmente comercializados [2].

Na figura 1 é destaca-se a região de operação exigida para que se obtenha uma relação linear entre a corrente de entrada  $I$  e a tensão de saída  $V$  a partir de um conversor corrente-tensão.

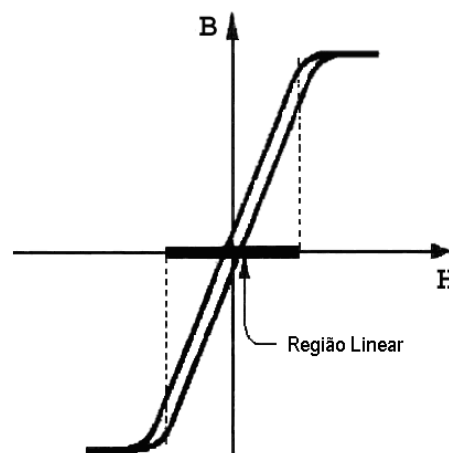


Fig. 1. – Região linear da curva de magnetização.

Exemplificando uma das aplicações para este tipo de sensor de corrente, pode-se citar o monitoramento de alguns equipamentos utilizados em sistemas elétricos de potência, como por exemplo os pára-raios de óxido de zinco (ZnO), que mesmo em bom estado e funcionando em regime permanente apresentam uma corrente de fuga praticamente constante, de valor desprezível.

Qualquer modificação que possa vir a ocorrer neste estado de operação contínua, seja uma sobretensão no sistema elétrico, seja uma falha no pára-raios resulta no aumento da corrente de fuga do equipamento, e conseqüentemente, no aumento de temperatura ao longo da coluna de varistores que compõem este equipamento.

A monitoração contínua da intensidade da corrente de fuga pode indicar falha permanente ou atuações momentâneas do pára-raios, enquanto que a análise de suas componentes harmônicas indica o grau de degradação do

equipamento ou algumas falhas, como por exemplo, a entrada de umidade no mesmo. Uma das maneiras mais eficiente de se verificar as condições de degradação de um pára-raios de ZnO é monitorar a componente resistiva da corrente de fuga pois os efeitos da degradação são evidenciados na componente resistiva e primordialmente na sua componente harmônica de terceira ordem [3], [4], [5].

No caso da corrente de fuga do pára-raios de óxido de zinco provocada pela tensão normal de operação, deve-se destacar o grau de linearidade, sensibilidade e resolução exigido para o sensor, uma vez que a medição exata da corrente é baseada nestes parâmetros [6], [7].

Neste sentido, foi desenvolvido um sensor indutivo com núcleo toroidal de alta permeabilidade magnética  $\mu$ , que atende essas especificações.

## 2. DESCRIÇÃO FUNCIONAL

O princípio fundamental do sensor de corrente magnético desenvolvido para a medição da corrente de fuga no pára-raios de óxido de zinco baseia-se na obtenção de uma tensão que seja diretamente proporcional à intensidade da corrente que se deseja medir. Para tal, faz-se a captação da intensidade do campo magnético  $H$  gerado pela corrente de fuga  $I_T$  em torno do fio que o conecta à terra e em seguida com o devido condicionamento e processamento do sinal extraí-se a informação de interesse.

A Fig. 2 ilustra a aplicação do sensor em um sistema elétrico de potência.

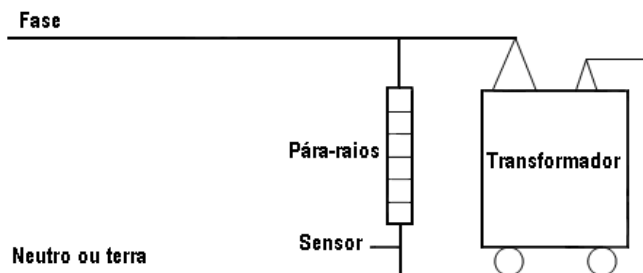


Fig. 2. – Exemplo de aplicação do sensor proposto.

Para a captação do fluxo magnético gerado em torno do núcleo conforme Fig. 3 optou-se por usar um material magneticamente mole de alta permeabilidade magnética e formato geométrico de um toróide visando o confinamento do fluxo em um circuito magnético fechado.

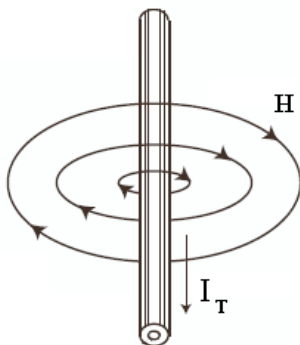


Fig. 3 – Princípio de captura da intensidade de campo magnético.

No diagrama funcional mostrado na Fig. 4 é ilustrado o processo utilizado na conversão do valor da intensidade da corrente de fuga em uma tensão proporcional equivalente. Nesta figura é possível observar que a corrente de fuga total  $I_T$  que circula pelo pára-raios induz no núcleo toroidal em volta do fio terra uma tensão proporcional ao fluxo gerado em seu núcleo. Considerando-se que a tensão induzida (Lei de Faraday) é proporcional à derivada da corrente  $I_T$ , dessa maneira, faz-se necessário o uso de um bloco integrador.

A parte física do circuito é composta de uma bobina sensora de alta sensibilidade, seguida por um amplificador diferencial e um integrador.

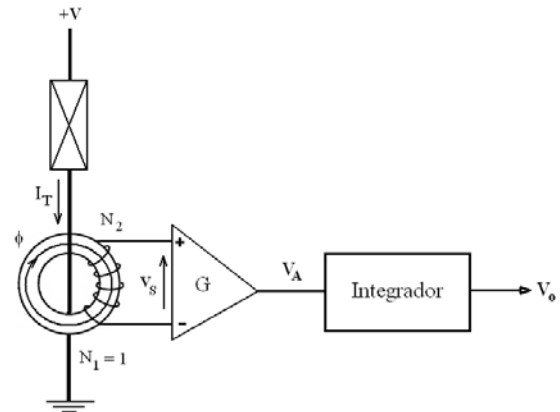


Fig. 4. – Diagrama esquemático do conversor sensor-corrente.

Assim, quanto maior o valor da permeabilidade magnética do material do núcleo toroidal maior a intensidade da tensão  $V$  do sinal na saída do circuito do sensor.

A Lei de Ampère estabelece que a integral de linha de  $H$  em qualquer percurso fechado é exatamente igual à corrente enlaçada pelo percurso conforme a equação (1).

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = I_T \quad (1)$$

A equações (2) e (3) mostram que a tensão  $V_S$  é proporcional a derivada do fluxo magnético e, conseqüentemente, a derivada da corrente  $I_T$  surgindo a necessidade do integrador mostrado na Fig. 4, onde  $A$  representa a área transversal do núcleo e  $\mu$  a permeabilidade magnética do material do núcleo.

$$V_S = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = A \frac{dB}{dt} = \mu A \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

Aplicando-se a Lei de Ampère,

$$H = \frac{N_1 I_T}{l} \quad (4)$$

Derivando a expressão (4), obtém-se a equação (5);

$$\frac{dH}{dt} = \frac{N_1}{l} \frac{dI_T}{dt} \quad (5)$$

Substituindo-se a equação (5) em (3) obtém-se a expressão (6) que mostra a dependência do fluxo magnético com a corrente.

$$\frac{d\phi}{dt} = \mu A \frac{N_1}{l} \frac{dI_T}{dt} \quad (6)$$

Dessa maneira, tem-se a demonstração matemática de como obter-se uma tensão  $V_S$  proporcional a corrente de fuga  $I_T$  proveniente de um pára-raios de ZnO.

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Na construção de um medidor de corrente de fuga para pára-raios de óxido de zinco utilizou-se um núcleo toroidal, com material magnético baseada em ligas nanocristinas. O núcleo foi submetido a uma corrente de magnetização no primário variando de 100µA a 10mA.

A configuração de montagem experimental realizada em laboratório é exemplificada conforme a Fig. 5.

Visando uma verificação comparativa entre a forma de onda da corrente obtida a partir da utilização do sensor de corrente proposto e a obtida a partir da medição direta da corrente sobre uma resistência  $R$ , realizou-se a aquisição simultaneamente dos sinais com a utilização de dois canais de um osciloscópio.

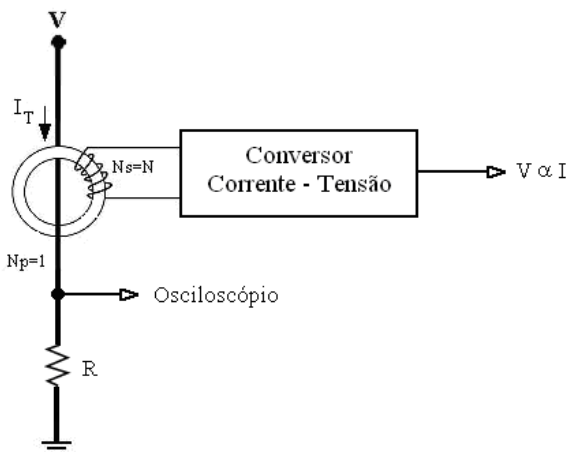


Fig. 5 – Configuração da montagem experimental.

Uma onda triangular com frequência fundamental de 60 Hz, foi conectada no ponto V do esquema apresentado na Fig. 5, esse valor foi escolhido por tratar-se da frequência de operação do pára-raios.

Esta forma de onda foi aplicada visando dois objetivos: inicialmente observar o correspondente grau de linearidade da medição para uma variação linearmente crescente e decrescente da corrente e segundo verificar a resposta do sensor ao conteúdo de harmônicos deste sinal. Pode verificar-se resultado obtido com o auxílio da Fig. 6.

Nas figuras 6 e 7 o sinal superior representam a tensão capturada sobre o resistor  $R$  e o sinal inferior representa a tensão na saída do conversor corrente-tensão proposto.

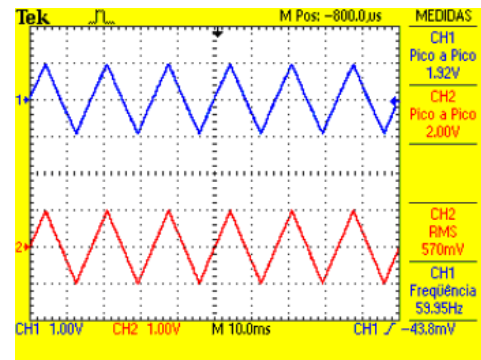


Fig. 6 – Resultado obtido após aplicação de onda triangular.

Para verificar-se a resposta do sensor em relação à rápidas transições mantendo-se a sensibilidade e a linearidade desejada, foi aplicado ao núcleo um sinal de corrente de magnetização do tipo Sinc(t), o resultado obtido é ilustrados nas Fig. 7.

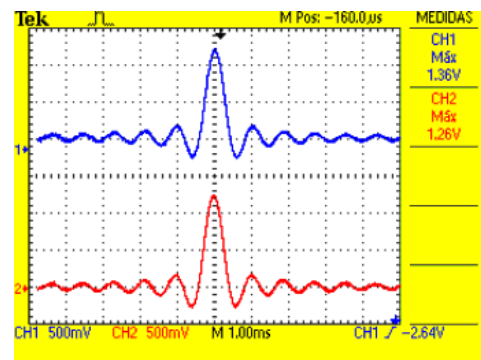


Fig. 7 – Resultado obtido após aplicação de onda tipo Sinc(t).

Em todos os procedimentos experimentais, os valores obtidos nas medições utilizando o sensor de corrente indutivo mostraram-se compatíveis com os medidos sobre o resistor.

Após a verificação do funcionamento do sensor de corrente proposto com a utilização de sinais conhecidos em laboratório, buscou-se avaliar o desempenho do sensor de correntes para a medição da corrente de fuga em pára-raios de ZnO em operação, no sistema CHESF. Assim, alguns testes experimentais foram realizados utilizando a configuração apresentada na Fig. 8.

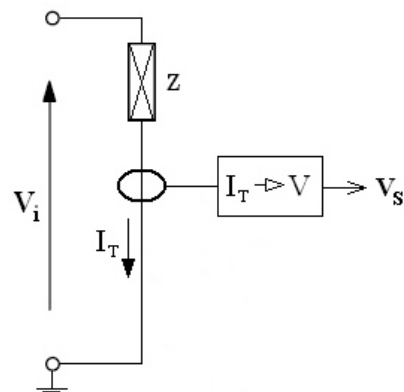


Fig. 8 – Configuração do sistema de medição.

Na Fig. 8, tem-se que  $V_i$  representa a tensão aplicada ao pára-raios,  $I_T$  representa a corrente de fuga que circula no pára-raios, quando este se encontra energizado e  $V_s$  representa um sinal de tensão na saída do sensor de corrente que é proporcional a corrente de fuga que circula no pára-raios. No caso da medição de corrente de fuga dos pára-raios de ZnO, um sensor com alto grau de sensibilidade e resolução é necessário para se obter resultados precisos.

A instalação do sensor de corrente em uma subestação de alta tensão é exemplificada com o auxílio da Fig. 9.



A medição realizada da corrente de fuga em um para-raios de ZnO, quando o pára-raios encontrava-se submetido a uma tensão de 230kV.

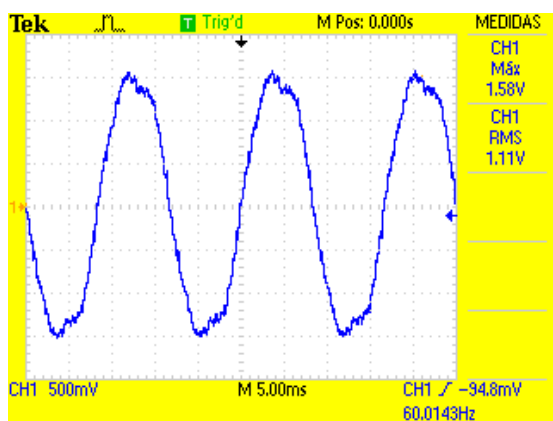


Fig 9 - Corrente de Fuga de um pára-raios de ZnO.

O sensor de corrente utiliza a relação de transformação de que para cada 1mA que atravessa o núcleo toroidal, obtém-se na saída do circuito 1 V. Pode-se verificar a partir da Fig. 10, uma tensão de 1,11V RMS.

Esse sinal de tensão pode ser utilizado como sinal de entrada de processadores digitais de sinais para um posterior processamento.

Baseado na relação citada anteriormente, pode-se afirmar que uma corrente de 1,11mA circula no pára-raios no momento da medição.

## 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se uma aplicação para o uso de núcleos magnéticos baseados em ligas nanocristalinas, a aplicação consiste no desenvolvimento de sensores de corrente para sinais, de pequenas intensidades na ordem de microamperes variando até miliamperes.

O sensor desenvolvido atendeu as expectativas propostas no que se refere a sua concepção e implementação obtendo ao seu final os resultados estimados.

Durante a execução deste trabalho o sensor de corrente foi submetido a vários testes para verificação da sua confiabilidade e repetibilidade. Resultados obtidos do sensor desenvolvido apresentaram boa linearidade e sensibilidade quando utilizado na medição de corrente de fuga de pára-raios de ZnO.

Embora a pesquisa tenha sido desenvolvida com núcleos de diversas composições magnéticas nanocristalinas, neste trabalho destaca-se apenas alguns resultados considerados de aspectos mais relevantes.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq – Brasil, e adicionalmente ao Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento CT-I-92.2007.8690.00 intitulado: *Pára-Raios a ZnO: Monitoramento remoto e ferramenta de apoio ao diagnóstico de falhas*. Também à Hitachi Metals Ltd. (Japão), à Magnetec GmbH (Alemanha) e a Mecagis (França) pela doação dos núcleos de ligas nanocristalinas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Lira, J. G. Assis, Luciano, B. A., Freire, R. C. S., Castro, W. B. Ligas amorfas e ligas nanocristalinas: aplicações em dispositivos eletroeletrônicos. Revista Eletricidade Moderna, Ano XXXIII, Num. 375, pg. 154-161, Junho, 2005.
- [2] Benedito A. Luciano, Raimundo C. S. Freire, José Gutemberg A. Lira, Glauco Fontgalland, e Walman B. de Castro. "Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal de Liga Nanocristalina: Estudo analítico e computacional" IEEE IM2005, 6º Encontro de Potencia, Instrumentación y Medidas, Uruguai, 2005.
- [3] Gupta, T. K., "Aplication of zinc oxide surge varistors", J. Am. Ceram. Soc., vol. 73, n.7, p.1817-1840, 1990.
- [4] Costa, E. G., "Análise do desempenho de pára-raios de óxido de zinco", Universidade Federal da Paraíba, Tese de Doutorado, 1999.
- [5] Souza, R. T., "Medição e análise harmônica da corrente de fuga resistiva em varistores de ZnO" Universidade Federal de Campina Grande, Mestrado, 2004.
- [6] Lundquist, J. "New Method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service", IEEE Transacions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7] José G.A. Lira, Euler C.T. Macedo, Edson G. Costa, Raimundo C. S. Freire, Benedito A. Luciano. "ZnO Surge Arresters Diagnosis Using Microcontroller" Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2007, Warsaw, Poland, May 1-3, 2007.