

# SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA COM NÚCLEOS TOROIDAIS DE LIGA NANOCRISTALINA<sup>1</sup>

Benedito Antonio Luciano<sup>2</sup>  
José Gutemberg de Assis Lira<sup>3</sup>  
Raimundo Carlos Silvério Freire<sup>4</sup>  
Edson Guedes da Costa<sup>5</sup>  
Walman Benício de Castro<sup>6</sup>

## Resumo

Neste trabalho são apresentados estudos teóricos e experimentais sobre aplicações de núcleos toroidais de liga nanocrystalinas como o principal elemento do circuito magnético de sensores de corrente elétrica. Na fundamentação teórica são destacadas as propriedades elétricas e magnéticas das ligas nanocrystalinas em comparação com outros materiais magneticamente moles, tais como: ligas amorfas, ligas à base de FeSi e ferrites. Na caracterização experimental são destacados os procedimentos e os equipamentos de medição empregados na determinação do laço de histerese, curvas de magnetização inicial e permeabilidade magnética dos núcleos toroidais. Adicionalmente, são apresentados dois estudos de casos: um relativo ao emprego em transformador de corrente, e outro relacionado a um sistema para a medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco, em operação.

**Palavras-chave:** Ligas nanocrystalinas; Núcleos toroidais; Sensores de corrente elétrica.

## ELECTRIC CURRENT SENSORS WITH NANOCRYSTALLINE ALLOY CORES

### Abstract

In this work are presented some theoretical and experimental studies about the applications of nanocrystalline alloys in toroidal cores as the main electric current sensor magnetic circuit element. In the theoretical background are discussed how the core magnetic characteristics affect the current sensor performance. In addition are presented two cases: an application of nanocrystalline alloys for current transformer cores and a system for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service.

**Key-words:** Nanocrystalline alloys; Toroidal cores; Current sensor.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor, Membro da ABM, Professor Associado, UAEE/CEEI/UFCG. Caixa Postal 10105. CEP 58.109 970 Campina Grande – PB, Brasil. Fone: (83) 3310 1139. E-mail: [benedito@dee.ufcg.edu.br](mailto:benedito@dee.ufcg.edu.br).

<sup>3</sup> Mestre, Professor Adjunto IV, UAEE/CEEI/UFCG. Caixa Postal 10105. CEP 58.109 970 Campina Grande – PB, Brasil. Fone: (83) 3310 1447. E-mail: [liragutemberg@gmail.com](mailto:liragutemberg@gmail.com).

<sup>4</sup> Doutor, Professor Associado, UAEE/CEEI/UFCG. Caixa Postal 10105. CEP 58.109 970 Campina Grande – PB, Brasil. Fone: (83) 3310 1447. E-mail: [rctfreire@dee.ufcg.edu.br](mailto:rctfreire@dee.ufcg.edu.br).

<sup>5</sup> Doutor, Professor Associado, UAEE/CEEI/UFCG. Caixa Postal 10105. CEP 58.109 970 Campina Grande – PB, Brasil. Fone: (83) 3310 1303. E-mail: [edson@dee.ufcg.edu.br](mailto:edson@dee.ufcg.edu.br).

<sup>6</sup> Doutor, Professor Associado, UAEM/CCT/UFCG. CEP: 58.109 970 Campina Grande – PB, Brasil. Fone: (83) 310 1386. E-mail: [walman@dem.ufpb.br](mailto:walman@dem.ufpb.br).

## 1 INTRODUÇÃO

Dependendo da aplicação, os sensores magnéticos podem ser classificados de acordo com a faixa de indução magnética a eles associada: de femtotesla (fT), como nos magnetômetros *SQUID* (*superconducting quantum interference device*), até valores de 1 a 2 teslas (T); das baixas frequências (<1 Hz) às altas frequências (MHz).<sup>(1)</sup>

Neste trabalho são apresentadas e discutidas duas aplicações de sensores de corrente elétrica, utilizando no circuito magnético, núcleos toroidais de liga nanocristalina. O primeiro caso é um transformador de corrente (TC) de 2,5 VA, 400A/5A, 60 Hz, partindo de um estudo conduzido por Luciano et al.<sup>(2,3,4)</sup> O segundo é um sistema para a medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco.

### 1.1 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são equipamentos elétricos projetados e construídos especificamente para alimentarem instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção<sup>(5)</sup>. Utilizados majoritariamente como redutor de corrente, os TC são empregados como transformadores para instrumentos quando há necessidade de medir, indiretamente, valores elevados de corrente alternada, sobretudo quando se torna inviável a construção de amperímetros com calibres capazes de medir diretamente estas correntes, seja por motivos de segurança, custos ou dificuldades operacionais.

Fisicamente, o funcionamento do TC baseia-se em duas leis fundamentais da eletrotécnica: a Lei de Ampère ( $\text{rot}\vec{H} = \vec{J}$ ) e a Lei de Faraday ( $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ). Na Lei de Ampère a intensidade de campo magnético, representada pela letra  $H$ , é produzida pela densidade de corrente elétrica, representada pela letra  $J$ . Na Lei de Faraday as grandezas eletromagnéticas envolvidas são o campo elétrico  $E$  e a densidade de fluxo magnético, ou indução magnética, representada pela letra  $B$ . Estas definições são ressaltadas aqui para que não ocorram dúvidas quanto à diferença entre campo magnético e densidade de fluxo magnético, pois  $H$  e  $B$  são grandezas distintas.

Em termos construtivos, o enrolamento primário do TC é constituído de poucas espiras de cobre, de seção transversal compatível com a corrente que se deseja avaliar, enquanto seu enrolamento secundário tem número de espiras elevado e seção transversal pequena em relação à seção transversal do enrolamento primário.

### 1.2 Corrente de Fuga em Para Raios de Óxido de Zinco

Os pára-raios à base de óxido de zinco são equipamentos largamente utilizados na proteção dos sistemas elétricos. A função desses equipamentos é limitar sobretensões e suprimir impulsos de correntes ocasionados por descargas atmosféricas. Por este motivo, a observação de alguns dos seus parâmetros elétricos é importante na determinação do seu estado de funcionamento real. Dentre estes parâmetros, pode-se destacar a componente resistiva  $I_r$  da corrente de fuga que flui pelo condutor de terra.

A intensidade da corrente de fuga resistiva é proporcional à potência absorvida pelos varistores. Se a potência absorvida exceder a capacidade de dissipação do

pára-raios, a corrente e a temperatura aumentarão progressivamente, isto é, o pára-raios atingirá o desencadeamento térmico (avalanche térmica).<sup>(6)</sup>

Para determinados valores de tensão e temperatura, a componente da corrente de fuga resistiva é um indicador sensível das mudanças na característica tensão-corrente dos pára-raios de óxido de zinco. Deste modo, a corrente de fuga resistiva é usada para diagnosticar mudanças na condição de operação (degradação) dos pára-raios de óxido de metal.<sup>(7)</sup>

Neste trabalho é apresentado um sistema para a medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco, a partir da corrente de fuga total, baseado na análise de suas componentes ortogonais. Este sistema é composto de dois módulos: um módulo em *hardware* (Figura 1), responsável pela aquisição do sinal, no caso a corrente de fuga total  $I_T$ , e sua digitalização, e outro módulo em *software*, responsável pelo tratamento digital do sinal.

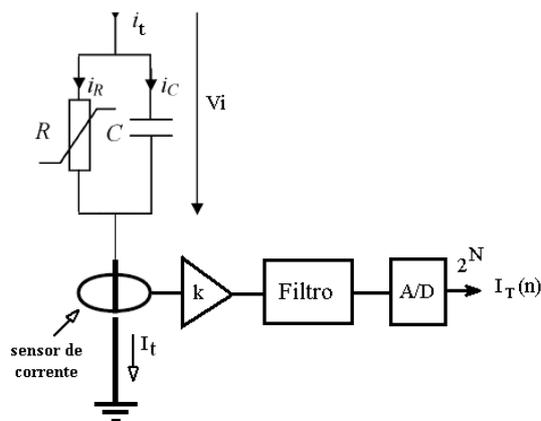


Figura 1. Sistema de aquisição da corrente de fuga

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Liga Nanocristalina

Os materiais nanocristalinos formam um subconjunto dos materiais nanoestruturados, nos quais estão incluídos todos os materiais produzidos com uma ou mais dimensões na escala nanométrica. Neste particular, destacam-se as ligas metálicas nanocristalinas, com estrutura de grãos da fase Fe(-Si), onde a estrutura nanocristalina ocorre a partir do acréscimo de elementos químicos em ligas amorfas ricas em ferro<sup>(6)</sup>, promovendo uma evolução de estrutura de grãos refinada. Para evitar o crescimento exagerado dos grãos, além de pequenas quantidades de cobre também são adicionados, alternativamente, Nb, Mo, W, Ta, Zr, Hf, Ti. Estes metais de transição têm o efeito de aumentar a temperatura de cristalização das ligas, evitando o crescimento dos grãos e a deterioração das propriedades magnéticas do material.

Uma das primeiras ligas nanocristalinas foi obtida por Yoshizawa e seus colaboradores:<sup>(6)</sup> a liga nanocristalina  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$  (nome industrial: FINEMET<sup>®</sup>).

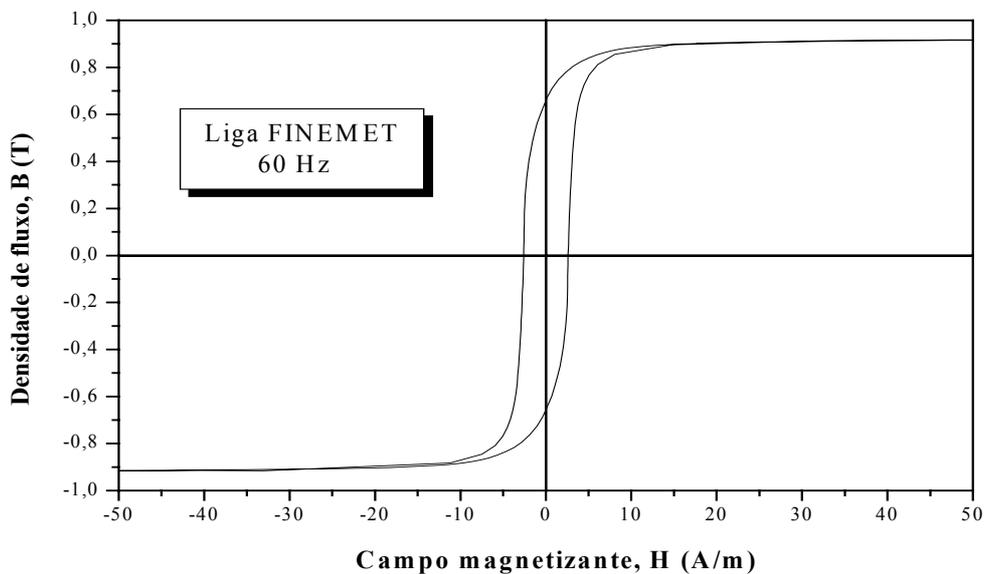
Comparada com o material magneticamente mole cristalino convencional (aço ao silício de grão orientado), com as ligas amorfas (à base de Fe, Ni ou Co) ou com os ferrite moles (à base de MnZn ou NiZn), a liga  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$  apresenta o mais

baixo valor para a força coerciva ( $H_c$ ), o mais elevado valor da permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) e os menores valores para as perdas por histerese.

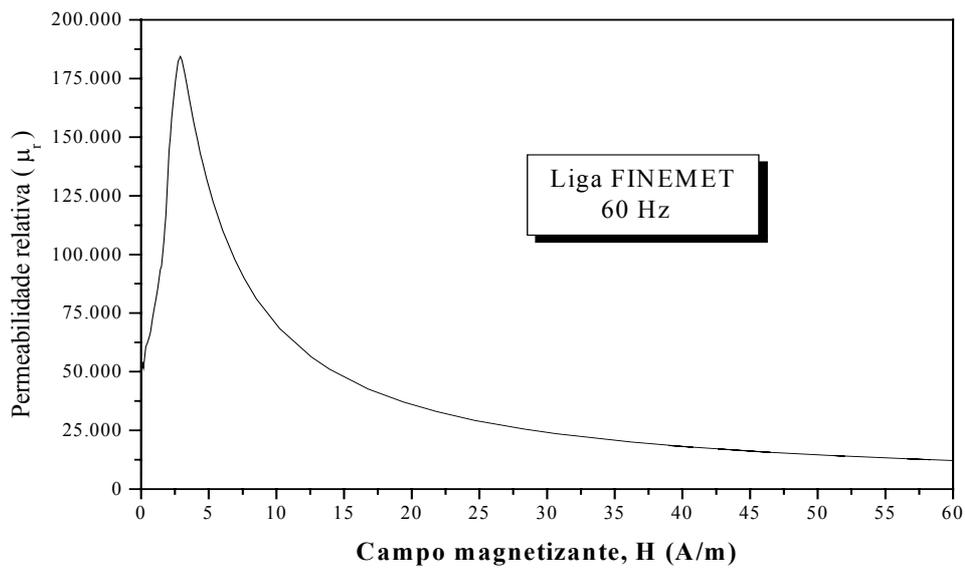
Atualmente, prosseguem as pesquisas e o desenvolvimento dos materiais nanocristalinos, abrindo perspectivas para diversas aplicações na eletroeletrônica<sup>(7)</sup>, tanto como material magneticamente mole, quanto magneticamente duro (ímã permanente), ou como meio magnético de armazenamento de informação<sup>(8)</sup>.

## 2.2 Caracterização Magnética

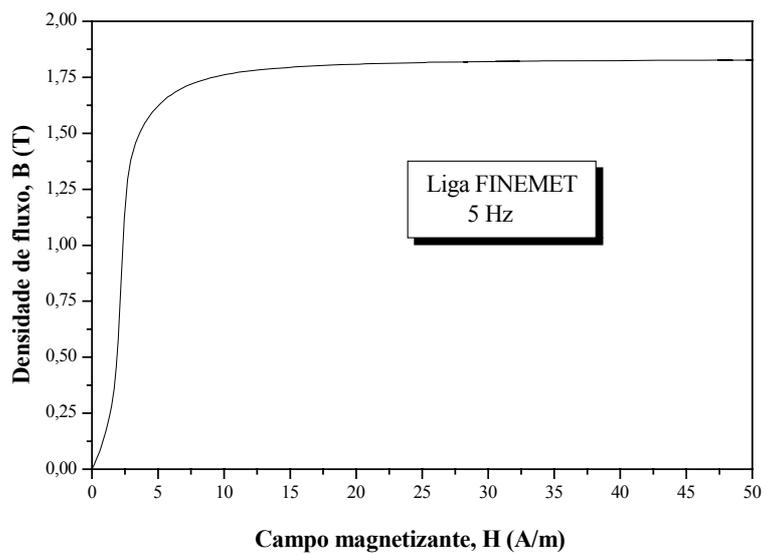
Para a determinação das características magnéticas da liga nanocristalina, que compõe o núcleo toroidal, foi utilizado um traçador de histerese: o TCH8600/B, pertencente ao Laboratório de Metais Amorfos e Nanocristalinos/DEMa/UFSCar. Por meio desse equipamento foram obtidas a curva de histerese (Figura 2), a curva de permeabilidade magnética (Figura 3), ambas a uma frequência de 60 Hz, e a curva de magnetização inicial, na frequência de 5 Hz (quase-estático), apresentada na Figura 4.



**Figura 2.** Curva de histerese a 60 Hz da liga nanocristalina.



**Figura 3.** Curva de permeabilidade magnética a 60 Hz da liga nanocristalina.



**Figura 4.** Curva de magnetização inicial da liga nanocristalina a 5 Hz.

As curvas de magnetização inicial e de permeabilidade do aço ao silício E-004 (Figura 5) foram cedidas pelo fabricante (ACESITA).

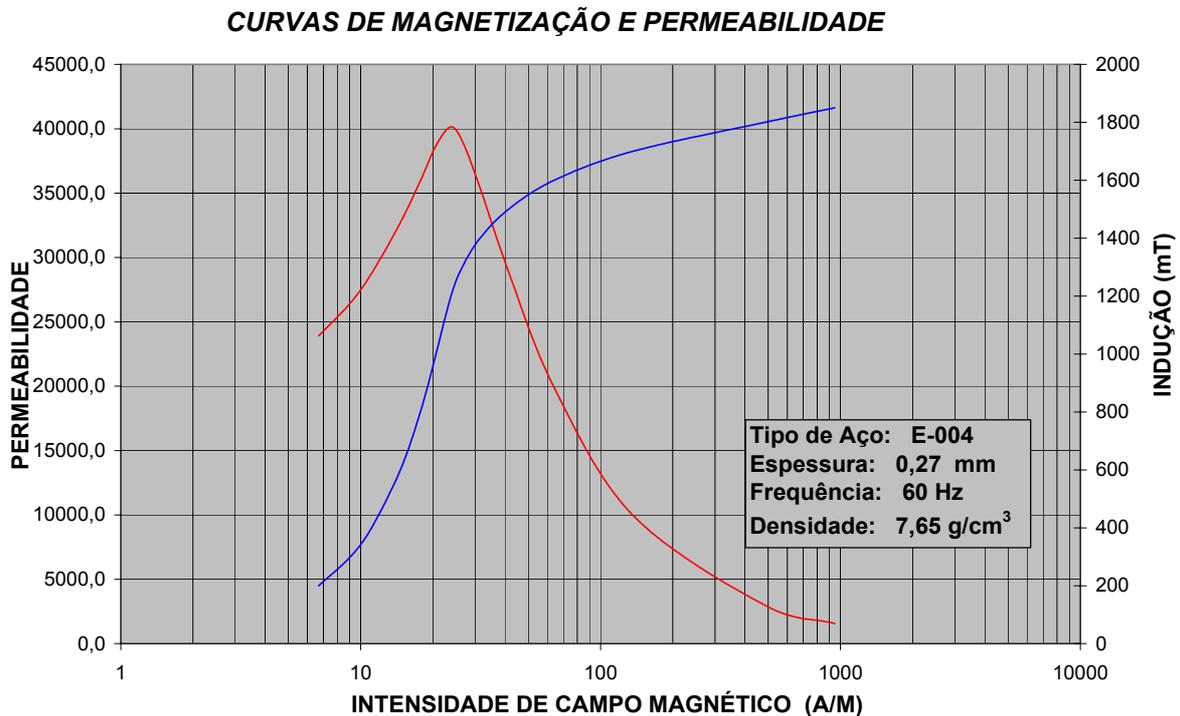


Figura 5. Curvas de magnetização inicial e de permeabilidade do aço-silício E-004.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Ensaios para Determinação dos Erros de Fase do TC

Com o objetivo de investigar a influência do material magnético sobre o desempenho do TC, foram realizados ensaios experimentais no Laboratório do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo.

A norma técnica de referência foi a NBR 6821<sup>(5)</sup>, sendo empregado o método comparativo, no qual o circuito primário do TC, sob ensaio, é ligado em série com o do TC – padrão.

Antes de iniciar os ensaios, os núcleos dos TC foram desmagnetizados, de acordo com os procedimentos descritos nos itens 9.2.1 e 9.2.2 da citada NBR.

Os ensaios experimentais foram realizados sob as seguintes condições:

- Corrente nominal primária 400 A;
- Corrente nominal secundária: 5 A;
- Relação nominal dos TC: 80;
- Relação nominal do TC padrão: 80;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Fator térmico: 1,2.

Foram feitos testes comparativos e determinados os erros de relação, fator de correção de relação e os ângulos de fase dos TC sob estudo. No Quadro 1 são estes últimos.

**Quadro 1.** Ensaios experimentais para a determinação do ângulo de fase.

CARGA: 2,5 VA			CARGA: 5,0 VA		
Ângulo de fase (minutos)			Ângulo de fase (minutos)		
%I <sub>2</sub>	FeSi	Liga nanocristalina	%I <sub>2</sub>	FeSi	Liga nanocristalina
10	8,5	2,2	10	10,5	2,8
25	6,6	1,9	25	7,8	2,2
50	5,3	1,5	50	6,0	1,6
75	4,6	1,4	75	5,0	1,2
100	4,0	1,3	100	4,2	1,3
120	3,7	1,3	120	3,7	0,9

Conforme pode ser observado no Quadro 1, o TC com núcleo de liga nanocristalina apresentou significativa redução do ângulo de fase quando comparado com o TC com núcleo de FeSi (material ferromagnético cristalino de grãos orientados), tanto para a carga de 2,5 VA, quanto para a carga de 5,0 VA.

### 3.2 Sistema para Medição da Corrente de Fuga Resistiva

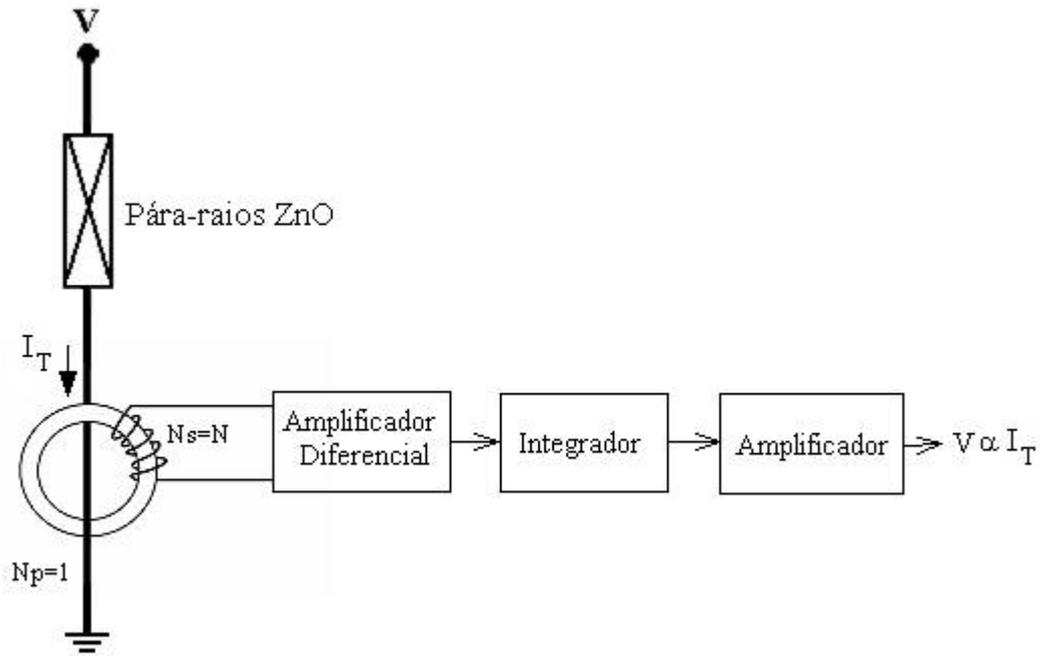
Com o objetivo de verificar o desempenho do núcleo magnético a base de material nanocristalino como sensor de corrente em pára-raios de óxido de zinco, foram realizados ensaios experimentais nos Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas e Laboratório de Alta Tensão do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande.

Para um pára-raios, um sensor de corrente de fuga é um dispositivo capaz de medir a corrente que flui através de sua conexão com a terra. Assim, o sensor de corrente de fuga do pára-raios de óxido de zinco deve possuir propriedades e características elétricas bem definidas para a função proposta. O uso de sensores magnéticos fabricados com materiais à base de ligas nanocristalinas apresentou características elétricas desejáveis para esta função. Ou seja, a sua sensibilidade e a sua linearidade são alguns dos parâmetros que devem ser observados, uma vez que dependem deles todas as informações para o processamento e diagnóstico posterior.

A alta permeabilidade magnética dessas ligas facilita o processo de magnetização do núcleo, exigindo um valor relativamente pequeno de corrente de excitação do primário, fazendo com que seu uso seja adequado em sensores de corrente de baixa intensidade.

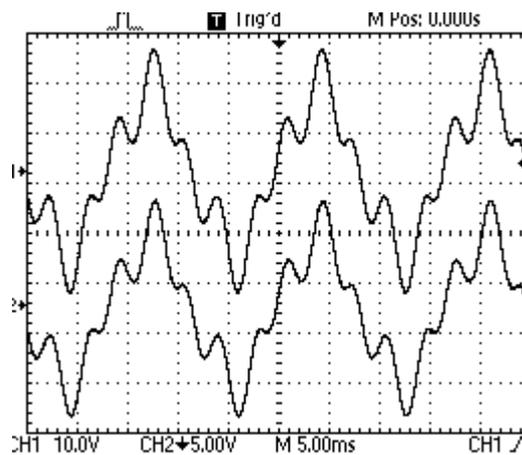
A corrente de fuga que circula pelo fio condutor terra do pára-raios de ZnO gera em torno de si uma variação de fluxo magnético (*Lei de Faraday*) proporcional à variação da corrente. Neste aspecto, deve-se destacar que o material do núcleo magnético é um elemento altamente importante na construção de um sensor de corrente, pois as correntes induzidas dependem significativamente das características do núcleo.

Na Figura 6, mostra-se o diagrama do sistema de medição usado no processo da aquisição da corrente de fuga, a partir do sensor indutivo com núcleo toroidal de liga nanocristalina.



**Figura 6.** Diagrama do sistema de medição da corrente de fuga.

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 exigidos para o sensor, uma vez que a medição exata da corrente é baseada nestes parâmetros, conseqüentemente o diagnóstico preciso da degradação. Para efeito comparativo, são apresentadas na Figura 7 as tensões equivalentes obtidas a partir da corrente de fuga  $I_T$  em um pára-raios de óxido de zinco submetido a uma tensão de 35 kV, quando aplicadas a um resistor em série, e pelo sensor indutivo com núcleo toroidal de liga nanocristalina.



**Figura 7.** Corrente de Fuga no resistor (superior) e no sensor indutivo (inferior).

Observa-se na Figura 7 que a tensão obtida pelo conjunto do sensor de corrente (amplificador, integrador) com núcleo toroidal de liga nanocristalina é semelhante à obtida sobre o resistor pela passagem da mesma corrente.

## 4 DISCUSSÃO

Tanto o emprego da liga nanocristalina em núcleos de transformadores de corrente (TC), quanto o sistema proposto para a medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco, com núcleo toroidal de liga nanocristalina, podem ser considerados como inovações tecnológicas. Em ambos os casos, essa inovação consiste na substituição do material magnético convencional pela liga nanocristalina  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ : o FeSi, no caso do TC; e a ferrite mole, no caso do sistema de medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco.

## 5 CONCLUSÕES

O transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$  apresenta menores valores de ângulo de fase (erro de fase), quando comparado com o TC com núcleo toroidal de FeSi, de características nominais idênticas, na frequência de 60 Hz. Este desempenho superior deve-se ao fato de a permeabilidade magnética da liga nanocristalina ser superior à permeabilidade magnética da liga de FeSi, o que resulta em menores valores das componentes das correntes de magnetização e de perdas no núcleo.

A liga nanocristalina  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ , sob a forma de núcleo toroidal, também foi utilizada como sensor de corrente num sistema para a medição da corrente de fuga resistiva em um pára-raios de óxido de zinco em operação. Desta feita, o desempenho comparativo foi realizado tomando como referência um núcleo toroidal de ferrite magneticamente mole. As curvas obtidas com o sensor de corrente montado com núcleo toroidal de liga nanocristalina apresentaram boa linearidade e sensibilidade no processo de medição da corrente de fuga em pára-raios de óxido de zinco.

## Agradecimentos

À Hitachi Metals Ltd. (Japão) e à Magnetec GmbH (Alemanha) pela doação dos núcleos de ligas nanocristalinas. À TOROID do Brasil pela doação dos núcleos de FeSi. À ACESITA pelas valiosas informações. À FAPESQ-PB, ao CNPq e à CAPES (programas PROCAD e COFECUB) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 LENZ, J.; EDELSTEIN, A. S. Magnetic sensor and their applications. IEEE Sensor Journal, Vol. 6, NO. 3, p. 631-649, June 2006.
- 2 LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B. TC com núcleo toroidal: influência do material magnético sobre o ângulo de fase. Eletricidade Moderna, n° 373, São Paulo, v. XXXIII, p. 172-181, abril 2005.
- 3 LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; LIRA, J. G. A.; FONTGALLAND, G; CASTRO, W. B. Transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina, Anais do 6º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, Montevideú, Uruguai, Noviembre de 2005.
- 4 LUCIANO, B. A.; CAVALCANTI de ALBUQUERQUE, J. M.; CASTRO, W. B.; AFONSO, C. R. M. Nanocrystalline material in toroidal cores for current transformer: analitical study and computational simulations. Materials Research, Vol. 8, No. 4, p. 1-14 , Oct./Dec. 2005.
- 5 MEDEIROS FILHO, S. Medição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
- 6 COSTA, E. G. *Análise do desempenho de pára-raios de óxido de zinco*. Campina Grande: UFPB, 1999. Tese, Universidade Federal da Paraíba, 1999.
- 7 HEINRICH, C.; HINRICHSEN, V. Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks – Comparison of existing and newly developed procedures, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, No. 1, p. 138-143, 2001.
- 8 YOSHIZAWA, Y.; OGUMA, S.; YAMAMUCHI, K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. J. Appl. Phys. Vol. 64, p. 6044-6046, 1988.
- 9 LUCIANO, B. A., LIRA, J. G. A.; FREIRE, R. C. S., CASTRO, W. B.; LANDGRAF, F. J. Aplicações eletroeletrônicas de ligas amorfas e nanocristalinas. M. M Metalurgia e Materiais, São Paulo, p. 406-408, 2004.
- 10 McHENRY, M. E.; LAUGHLIN, D. E. Nano-scale materials development for future magnetic applications. Acta mater. 48, p. 223-238, 2000.
- 11 NBR 6821-Transformador de corrente: método de ensaio, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.