



ESTUDO ANALÍTICO E COMPUTACIONAL DE APLICAÇÕES DE LIGAS NANOCRISTALINAS EM NÚCLEOS TOROIDAIS

Mary Karlla Araújo Guimarães

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 10105
58109-970 Campina Grande – PB, Brasil
e-mail: karlla@dee.ufpb.br

Benedito Antonio Luciano

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 10105
58109-970 Campina Grande – PB, Brasil
e-mail: benedito@dee.ufpb.br

***Resumo.** Os transformadores e as máquinas elétricas convencionais, instalados nos sistemas elétricos, são compostos de núcleos de ferro-silício e enrolamentos de cobre ou alumínio. Isto representa uma tecnologia consolidada, restando como alternativa para melhoria da eficiência energética desses equipamentos a substituição dos materiais convencionais por outros que apresentem perdas específicas menores, como por exemplo: As ligas amorfas à base de FeSi ou as ligas nanocristalinas, obtidas mediante tratamento térmico de cristalização das ligas amorfas à base de ferro. Propriedades elétricas e magnéticas, como alta resistividade, baixa força coerciva, indução de saturação elevada e baixa magnetostricção tornam esses materiais concorrentes dos materiais tradicionais aplicados em núcleos ferrocristalinos. Neste trabalho apresenta-se um estudo comparativo de desempenho desses novos materiais, mediante o dimensionamento de núcleos toroidais destinados a aplicações eletroeletrônicas específicas. Os cálculos analíticos são realizados utilizando-se as equações clássicas do eletromagnetismo. Resultados de simulações computacionais por cálculo de campo, baseado no Método dos Elementos Finitos (FEM), são comparados aos obtidos analiticamente com o objetivo de validar os estudos de casos.*

***Palavras-chave:** materiais nanocristalinos, ligas amorfas, aplicações eletroeletrônicas, cálculo de campo.*

1. INTRODUÇÃO

A partir do desenvolvimento das ligas amorfas, Yoshizawa e seus colaboradores obtiveram uma nova classe de materiais magneticamente moles: as ligas nanocristalinas, que apresentam excelentes propriedades magnéticas, possibilitando um grande número de aplicações na eletroeletrônica. A denominação nanocristalina é devido a estrutura de grãos da fase Fe(-Si) (Yoshizawa, 1988).

Inoue et al (1995) desenvolveu um novo tipo de material nanocristalino magneticamente mole baseado em Fe-M-B (M=Zr, Hf, Nb) a liga nanocristalina NANOPERM[®] (Fe_{85,6}Zr_{3,3}Nb_{3,3}B_{6,8}Cu₁). Yoshizawa (1999) obteve a liga nanocristalina FINIMET[®] (Fe_{73,5}Cu₁Nb₃Si_{13,5}B₉) pela solidificação rápida de uma liga amorfa à base de Fe-Si-B.

As excelentes propriedades magnéticas, conferem às ligas nanocristalinas diferentes possibilidades de aplicações em dispositivos eletroeletrônicos, tais como: transformadores de pulso, bobinas de *choke* de modo comum, transformadores para fontes chaveadas, sensores (Makino, 1997).

Atualmente, prosseguem as pesquisa dos materiais nanocristalinos, com novas perspectivas para aplicações na eletroeletrônica: como materiais magneticamente moles (Luciano et al, 2000) e como meio magnético de armazenamento de informação (McHenry et al, 2000). A geometria toroidal é particularmente compatível com o uso de material nanocristalino, que são encontrados na forma de longas fitas, com cerca de 20µm de espessura. O fato dos materiais serem produzidos em forma de fitas muito finas, acarretam problemas de ordem prática durante a montagem eletromecânica dos núcleos, exigindo cuidados especiais no manuseio do material.

Durante o processo de fabricação do núcleo são introduzidas tensões mecânicas internas que tendem a mudar as propriedades magnéticas do material. Essas alterações são indesejáveis e é necessário submeter o material a um tratamento térmico, sob a ação de um campo magnético. Assim, é possível recuperar as propriedades magnéticas e até melhorar algumas delas.

2. ESTUDO ANALÍTICO

2.1 Análise Linear

Na Fig. (1) está representado o elemento indutivo. Este indutor é caracterizado por um núcleo toroidal constituído de material magnético, envolvido por uma ou mais bobinas de material condutor (cobre, por exemplo), a indutância própria será determinada tomando como base a teoria dos circuitos magnéticos e as relações fundamentais do eletromagnetismo.

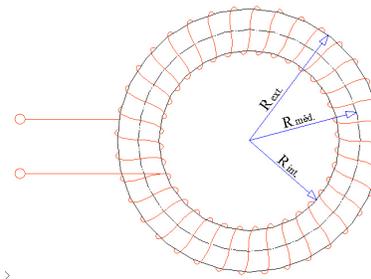


Figura 1 - Indutor toroidal com enrolamento uniformemente distribuído.

R_{int} : raio interno

R_{ext} : raio externo

R_{med} : raio médio

H_n : altura do núcleo (largura da fita)

Pode-se afirmar que a indutância do núcleo toroidal representado na Fig. (2.1) é uma propriedade que depende apenas dos elementos construtivos do núcleo e do quadrado do número de espiras (N^2) que o envolve, independente do valor da corrente elétrica (I) como pode ser observado na Eq. (2.1).

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_T} \quad (2.1)$$

Na Eq. (2.1), o valor da relutância (\mathfrak{R}_T) depende da geometria e do material que é constituído o toroide. A relutância pode ser determinada pela Eq. (2.2):

$$\mathfrak{R}_T = \frac{l_{mag}}{\mu_{mat} A_{mag}} \quad (2.2)$$

Em que l_{mag} é o comprimento médio do percurso do fluxo magnético, μ_{mat} é a permeabilidade magnética do material e A_{mag} é a área da seção reta do material magnético do toroide.

Substituindo a Eq. (2.2) na Eq. (2.1) resulta:

$$L = \mu_{mat} \frac{N^2 A_{mag}}{l_{mag}} \quad (2.3)$$

Essa análise preliminar foi realizada partindo da suposição de que a permeabilidade magnética do material de que é constituído o toroide é constante (material isotrópico), independente da corrente que circule pelo enrolamento do indutor.

2.2 Circuito Equivalente

Tomando-se como base o indutor toroidal, apresentado na Fig. (1), aplica-se uma camada de material isolante e, em seguida, um outro enrolamento é colocado sobre o núcleo. Dessa forma é obtido o transformador de dois enrolamentos de núcleo toroidal.

No circuito magnético da Fig. (2) F_1 é a força magnetomotriz devido o primário, F_2 é a força magnetomotriz devido o secundário, R_1 é a relutância do núcleo devido ao fluxo \mathcal{O}_m , R_d é a relutância devido ao fluxo de dispersão. A relutância R_2 é devido ao fluxo \mathcal{O}_2 . O núcleo foi dividido em duas partes fisicamente separadas, porém, por causa da simetria, elas podem ser considerados como estando em magneticamente paralelo.

O circuito magnético inclui dois ramos de magnetização representado pelas relutâncias R_1 e R_2 , como mostrado na Fig. (2.3).

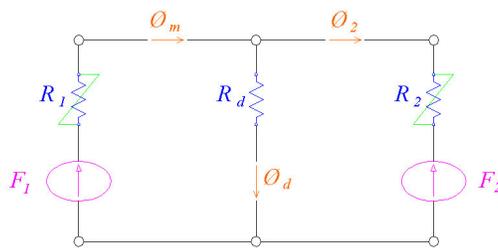


Figura 2 - Circuito magnético equivalente.

O circuito da Fig.(3) pode ser derivado diretamente do circuito da Fig.(2) pelo princípio topológico da dualidade (Slemon et al, 1982). R_l e X_l representa a impedância do primário. R'_l e X'_l a impedância do secundário.

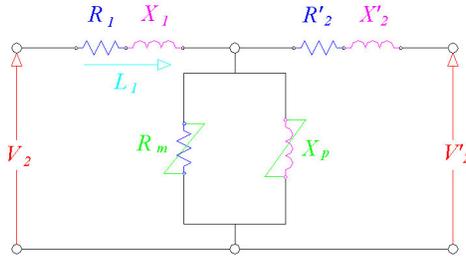


Figura 3 - Circuito elétrico equivalente.

3. DIMENSIONAMENTO DO NÚCLEO

Na Fig.(1) é mostrado o núcleo na forma toroidal que é o mais adequado para o material nanocristalino que é produzido na forma de fita.

A seguir será apresentado um procedimento geral para o projeto do núcleo toroidal.

Passo 1: Cálculo do comprimento médio do circuito magnético do núcleo:

$$l_{mag} = 2\pi \left(\frac{R_{ext} + R_{int}}{2} \right) \quad (3.1)$$

Passo 2: Cálculo da Área da Seção Transversal do Núcleo Toroidal:

Há três possibilidades para seção transversal do núcleo toroidal: Seção retangular, seção circular e seção quadrada. Essas áreas podem ser calculadas de acordo com as Eqs.de 3.2 a 3.4.

$$\text{Retangular: } A_{geo} = h_n (R_{ext} - R_{int}) \quad (3.2)$$

$$\text{Circular: } A_{geo} = \frac{\pi}{4} (R_{ext} - R_{int})^2 \quad (3.3)$$

$$\text{Quadrada: } A_{geo} = (R_{ext} - R_{int})^2 \quad (3.4)$$

O dimensionamento do circuito magnético inicia-se com a determinação da área da magnética do núcleo. A seção magnética é determinada pela Eq. (3.5), sendo o fator k_s , a relação entre a área da seção magnética e a área da seção geométrica do núcleo.

$$A_{mag} = k_s A_{geo} \quad (3.5)$$

A relutância magnética oferecida ao fluxo é determinada pela Eq. (2.2) e a indutância do núcleo é obtida pela Eq. (2.1)

4. ESTUDO COMPARATIVO:

As ligas nanocristalinas de nome comercial FINEMET[®] (Fe-Cu-Nb-B-Si) já foram testadas com sucesso em transformadores de pulso, transformadores de corrente, filtros de ruído e outros. Uma outra família de ligas comercialmente denominada de NANOPERM[®] (Fe-Zr-(Cu)-B-(Si)) apresentou um ótimo desempenho quando utilizadas na construção de bobinas de *choke* de modo comum, núcleo de transformadores, fontes chaveadas e sensores magnéticos.

Na Tab.(4.1) são apresentadas as principais características das duas ligas nanocristalinas que foram utilizadas comparativamente como material magnético para o núcleo toroidal .

Tabela 4.1 – Dados das ligas FINEMET* e NANOPERM**

Material Nome comercial	Composição	Indução de saturação (T)	Campo coercivo (A/m)	Resistividade ($\mu\Omega.m$)	Densidade (g/cm^3)	Perdas específicas (W/kg)****
FINEMET	Fe _{73,5} Cu ₁ Nb ₃ Si _{13,5} B ₉	1,24	0,45	1,15	7,18	35,0
NANOPERM	Fe ₈₄ Zr _{3,5} Nb _{3,5} B ₈ Cu ₁	1,53	1,7	1,15	7,35	58,7

(*)FINEMET®: fabricada pela Hitachi Metals (Japão)

(**)NANOPERM®: fabricada pela Magnetec GmbH (Alemanha)

(W/kg)****: perdas a [100kHz e 0,2T]

Na Tab.(4.2) são apresentadas as principais características dos materiais que serão empregados para efeito comparativo com os nanocristalinos.

Tabela 4.2 – Dados das liga amorfa MP3210P-4AS (*) e do Pó de ferro **

Material Nome comercial	Composição	Indução de saturação (T)	Campo coercivo (A/m)	Resistividade ($\mu\Omega.m$)	Densidade (g/cm^3)	Perdas específicas (W/kg)****
MP3210P-4AS	Co-Fe-Si-Bo	0,57	0,3	1,42	7,59	85,0
T150-26	Fe-Co	1,38	440,0	0,20	7,00	680,0

(*)MICROLITE® Square Loop: marca registrada, Honeywell Amorphous Metals (USA)

(**)Iron powder: marca registrada, MICROMETALS (USA)

(W/kg)****: perdas a [100kHz e 0,2T]

Comparando os valores das Tabs. (4.1) e (4.2) verifica-se que as induções de saturação apresentadas pelos nanocristalinos situam-se acima daquelas apresentadas pela liga amorfa e pó de ferro microencapsulado. Isto, em termos de **VOLUME**, é uma vantagem, pois exigirá uma menor massa ativa para o núcleo destes equipamentos.

Por outro lado, a escolha do material do núcleo não deve se prender apenas ao aspecto da indução de saturação. As perdas por histerese e por correntes parasitas também devem ser levadas em consideração. Das Tabs. (4.1) e (4.2), a 100kHz e 0,2T, as perdas no núcleo do material nanocristalino quando comparadas as da liga amorfa à base de cobalto e do pó de ferro foram menores.

Analisando as perdas no núcleo devido as correntes parasitas, conclui-se que as ligas amorfas e as nanocristalinas apresentam perdas menores quando comparadas ao pó de ferro. Para tanto, basta observar a resistividade das ligas nanocristalinas e da amorfa que de acordo com a Tab. (4.1) é cerca de seis vezes maior que o do pó de ferro microencapsulado, já a espessura é praticamente a mesma pra as ligas. Portanto, se o critério for **REDUÇÃO DAS PERDAS** no núcleo, a escolha será o material nanocristalino ou o amorfo.

Para efeito comparativo com os núcleos de liga amorfa e de pó microencapsulado disponíveis foram consideradas as seguintes dimensões: $R_{ext} = 17,05$ mm, $R_{int} = 10,10$ mm e $H_n = 11,80$ mm .

Na Tab. (4.3) são apresentados os valores para o peso, volume e perdas para os diferentes tipos de materiais empregados no núcleo.

Tabela 4.3 – Dados comparativos de peso, volume e perdas para o núcleo com materiais magnéticos diferentes.

Material	Liga nanocristalina FINEMET® Fe _{76,9} Cu _{0,6} Nb _{2,5} Si ₁₁ B ₉	Liga nanocristalina NANOPERM® Fe ₈₄ Zr _{3,5} Nb _{3,5} B ₈ Cu ₁	Liga amorfa à base de cobalto (Co-Fe-Si-Bo)	Ferro em Pó microencapsulado (Fe-C)
Peso do núcleo, g	23,83	51,00	53,43	58,00
Volume do núcleo, cm ³	3,34	6,94	7,04	8,32
Perdas totais, W	0,849	3,03	2,18	4,67

As perdas totais com o núcleo de FINEMET® (Fe_{76,9}Cu_{0,6}Nb_{2,5}Si₁₁B₉) foram cerca de 5,5 vezes menores que as perdas para o núcleo de pó microencapsulado e 3,5 menores que as do núcleo de NANOPERM® (Fe₈₄Zr_{3,5}Nb_{3,5}B₈Cu₁). Com relação ao volume e peso o núcleo com a liga FINEMET® (Fe_{76,9}Cu_{0,6}Nb_{2,5}Si₁₁B₉), mostrou-se o cerca de duas vezes mais leve e mais compacto quando comparado aos outros materiais.

De acordo com essas observações o material que obteve o melhor desempenho com relação à redução de volume, peso e perdas foi a liga FINEMET® (Fe_{76,9}Cu_{0,6}Nb_{2,5}Si₁₁B₉). Portanto, essa liga é a mais indicada para o material do núcleo.

5. ESTUDO COMPUTACIONAL

5.1 Método dos Elementos Finitos:

Esta técnica numérica parte do princípio de que o domínio de estudo deve ser decomposto ou discretizado em pequenas regiões, chamadas *elementos finitos*. Uma formulação conveniente é aplicada a cada um destes elementos, e o conjunto de soluções relativo a estas regiões fornece a solução global do problema. Quanto menores forem estes elementos, ou seja, quanto maior for a decomposição do domínio de estudo, mais a solução discretizada se aproxima da solução contínua, o que representaria o caso ideal.

5.2 Método dos Elementos Finitos na Magnetostática

A aplicação do método dos elementos finitos na magnetostática é baseada na segunda equação de Maxwell (Lei de Ampère).

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (5.1)$$

Sendo \vec{J} a densidade de corrente e \vec{H} intensidade de campo magnético.

A partir da terceira equação de Maxwell $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, define-se o vetor potencial magnético \vec{A} , tal que:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5.2)$$

Para resolver este problema é aplicada a relação constitutiva $H = vB$, na qual v representa a relutividade do meio. O vetor densidade de corrente e o vetor potencial magnético podem ser reduzidos a uma componente, Z , normal ao plano de estudo. Nesse caso foram utilizadas coordenadas polares, já que o domínio de estudo é um disco de raio R .

$$\vec{J} = J_z(r, \theta) \vec{u}_z \quad \text{e} \quad \vec{A} = A_z(r, \theta) \vec{u}_z \quad (5.3)$$

A solução numérica para (5.1) pode ser obtida pela discretização dos domínios por coordenadas polares. Aplica-se a lei de Ampère a cada nó, conforme apresentado na Fig. (4).

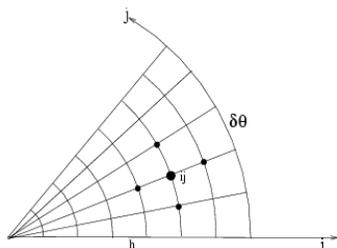


Figura 4 – Malha para discretização em coordenadas polares.

5.3 Estudo de Caso

A seguir será apresentado um estudo da indução máxima no núcleo do transformador, em função do material magnético utilizado. Neste estudo foi empregada técnica de cálculo de campo, baseada no método dos elementos finitos FEMM (Deeker, 1998).

Na Fig. (5) é mostrada uma representação do núcleo toroidal, incluindo a representação das bobinas.

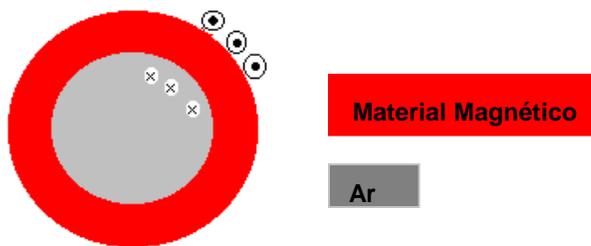


Figura 5 – Representação do núcleo e das bobinas.

Na Fig. (6) é apresentada a discretização do problema e as regiões de contorno. Na região do núcleo onde está a densidade de campo magnético foi utilizada uma malha muito fina, para garantir uma boa resolução do problema.

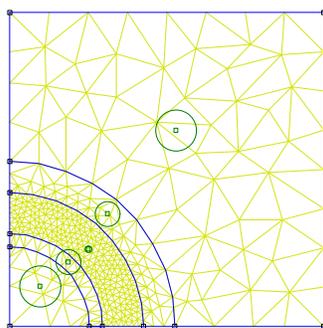


Figura 6 – Discretização do problema e regiões de contorno utilizando o FEMM.

Na figura 7 são mostradas em (negrito) as linhas de campo magnético para o núcleo do transformador. Este mapa de campo foi obtido utilizando o FEMM.

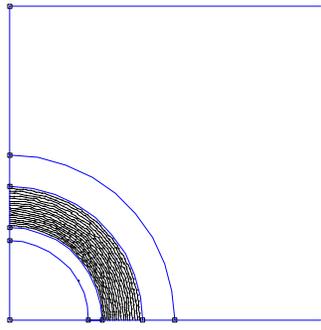


Figura 7 – Mapa de campo magnético do núcleo.

Na figura 8 é apresentada a densidade de fluxo magnético no interior do núcleo para a liga nanocristalina FINEMET[®].

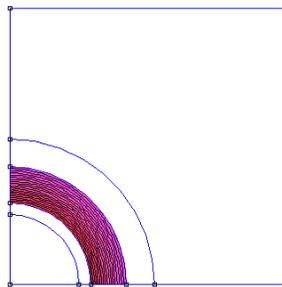


Figura 8 – Densidade de fluxo para o núcleo de $(Fe_{76,9}Cu_{0,6}Nb_{2,5}Si_{11}B_9)$.

Na Tab. (5.1) são apresentados os resultados obtidos analiticamente e pelo uso do programa de cálculo de campo (FEMM).

Tabela 5.1 - Resultados comparativos.

		Analiticamente	FEMM
AMORFO	Fluxo Magnético (Wb)	$2,88 \times 10^{-4}$	$3,072 \times 10^{-4}$
	Densidade de fluxo magnético (T)	$4,9 \times 10^{-1}$	$4,6 \times 10^{-1}$
FINEMET[®]	Fluxo Magnético (Wb)	$1,74 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$
	Densidade de defluxo magnético (T)	$7,3 \times 10^{-1}$	$7,5 \times 10^{-1}$
NANOPERM[®]	Fluxo Magnético (Wb)	$2,96 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$
	Densidade de fluxo magnético (T)	$5,16 \times 10^{-1}$	$5,5 \times 10^{-1}$
Pó de ferro micro encapsulado Fe-C	Fluxo Magnético (Wb)	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,094 \times 10^{-7}$
	Densidade de fluxo magnético (T)	$3,47 \times 10^{-4}$	$3,01 \times 10^{-4}$

Analisando os resultados mostrados na Tab.(5.1), em termos comparativos, eles são considerados satisfatórios. Ficando assim, comprovada a importância da utilização de programas de cálculo de campo, como uma ferramenta computacional auxiliar em projetos de equipamentos.

5. CONCLUSÕES:

Neste trabalho foram apresentadas comparações entre núcleos de material nanocristalino, núcleos de material amorfo e pó microencapsulado que estão disponíveis comercialmente. Esta apresentação de forma comparativa visou demonstrar como o material do núcleo influi no dimensionamento do equipamento. Foram analisados aspectos relativos às perdas, volume e peso, demonstrando vantagens significativas na redução desses fatores com o núcleo de liga nanocristalina ($\text{Fe}_{76,9}\text{Cu}_{0,6}\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{11}\text{B}_9$).

Os resultados obtidos, de forma analítica e computacional, foram ambos satisfatórios, tendo em vista as suposições impostas antes da resolução do problema. Isto demonstra a necessidade de programas de cálculos de campos como ferramenta de análise em projetos de sistemas magnéticos.

A liga ($\text{Fe}_{76,9}\text{Cu}_{0,6}\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{11}\text{B}_9$) apresenta ótimas propriedades (baixas perdas, magnetostricção próxima de zero e indução de saturação elevada) quando aplicadas em altas frequências, tornando-se competitiva com as ligas amorfas à base de cobalto. Já a liga ($\text{Fe}_{84}\text{Zr}_{3,5}\text{Nb}_{3,5}\text{B}_8\text{Cu}_1$) tem um melhor desempenho quando utilizada em baixa frequência (60 Hz), por isso podem ser empregadas em núcleos de transformadores de distribuição. Essas particularidades podem ser observada pelos resultados obtidos, de acordo com o tipo de material do núcleo.

Efetivamente, os materiais nanocristalinos se caracterizam como materiais de alta eficiência energética, possibilitando inúmeras aplicações na eletroeletrônica. Entretanto, o emprego desses materiais precisa ser avaliado de forma detalhada quanto a qualidade de energia e ao impacto ambiental.

6. REFERÊNCIAS

- Inoue, A., Makino, A., Hatanai, T., Yoshida, S., Hasegawa, N. and Masumoto, T., 1995, "Soft magnetic properties of nanocrystalline Fe-M-B(M=Zr, Hf, Nb) alloys with high magnetization". *Nanostruct. Mater.*, vol. 6, pp.985-988.
- Luciano, B.A. and Kiminami, C.S., 2000, "Materiais nanocristalinos e suas aplicações na eletroeletrônica". São Pedro: CD ROM do 14^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.
- Luiz, L., Silva, V.C., Rossi, L.N. and Cardoso, J.R., 2001, "Teaching Electromagnetic Fields and FEM for Undergraduate Students". *IEEE Transactions on Education*. CD ROM Rapid Publication Supplement. Vol 44, N^o2.
- Makino, A., Hatanai, T., Y., Bitoh, T., Inoue, A., and Masumoto, T., 1997, "Applications of nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B (M=Zr, Nb) alloys NANOPERM[®]". *IEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, N^o 5, pp. 3793-3798.
- McHenry, M. E. and Laughlin, D. E., 2000, "Nano-scale materials development for future magnetic applications". *Acta Mater.* 48, pp. 223-238.
- Meeker, D., 1998, "FEMM Finite Element Method Magnetics User's Manual", Arquivo Tipo PDF.
- Slemon, G.R. and Straughen, A., 1982, "Electrical Machines". Addison-Wesley Publishing Company, Philippines, p. 575.
- Yoshizawa, Y., 1999, "Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-based alloys". *Materials Science Forum*, Vol. 307, pp.51-62.
- Yoshizawa, Y.; Oguma, S. and Yamauchi, K., 1988, "New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure". *Journal of Applied Physics* 64, pp. 6044-6046.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores autorizam o direito de publicação do conteúdo deste trabalho, desde que devidamente referenciado.

ANALYTIC AND COMPUTATIONAL STUDY OF APPLICATIONS OF NANOCRYSTALLINE ALLOYS IN TOROIDAL CORES

Mary Karlla Araújo Guimarães

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 10105
58109-970 Campina Grande – PB, Brasil
e-mail: karlla@dee.ufpb.br

Benedito Antonio Luciano

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 10105
58109-970 Campina Grande – PB, Brasil
e-mail: benedito@dee.ufpb.br

Abstract. *The transformers and conventional electric machines, present in electrical systems, are composed of an iron silicon core and copper or aluminium windings. This represents a consolidated technology, remaining as an alternative for improvement of the energy efficiency the substitution of the conventional materials for others more efficient, such as: amorphous alloys based on the iron silicon or nanocrystalline alloys, produced in one single step, i.e. using rapid solidification technology, thin ribbons are jet cast directly from the melt. Electric and magnetic properties, like high resistivity, low coercivity, high saturation magnetization and zero or low magnetostriction turn those materials into competitors with traditional ones applied in a ferrocrytalline core. In this work we focus on a comparative study on the performance of those new materials, in the dimensioning of toroidal cores for specific applications in electrical and electronic. The analytic calculations have been accomplished for field calculation, based on the Finite Elements Method (FEM) and are compared to obtained analytically with the aim of validating case study.*

Keywords: *nanocrystalline materials, amorphous alloys, electrical and electronics applications, field calculation.*