

Estudos Analítico e Computacional de Sensores de Corrente Elétrica com Núcleos Toroidais

T. L. V. N. Silva, *Student Member, IEEE*, B. A. Luciano, *Senior Member, IEEE*, R. C. S. Freire, *Member, IEEE*
e T. C. Albuquerque, *Student Member, IEEE*

Resumo—Neste trabalho são apresentados estudos analítico e computacional sobre sensores de corrente elétrica com núcleo toroidal de material magneticamente mole. A fundamentação teórica parte das leis fundamentais do eletromagnetismo presentes nas equações de Maxwell. Na obtenção dos circuitos magnéticos equivalentes são levados em conta os fluxos magnéticos e as correntes elétricas como variáveis de estado e as relutâncias associadas à propagação dos fluxos magnéticos pelos diferentes meios. Partindo dos circuitos magnéticos, circuitos elétricos equivalentes são deduzidos, nos quais são representadas as resistências e as reatâncias. Como estudo de caso, foi utilizada uma simulação computacional mediante o emprego de um programa de cálculo de campo 2D, baseado no método dos elementos finitos. A principal contribuição deste trabalho é a fundamentação analítica para o estabelecimento de modelos mais próximos da representação real do sistema eletromagnético, constituído pelo sensor de corrente elétrica com núcleo ferromagnético toroidal.

Palavras Chave—Circuitos elétricos, Circuitos magnéticos, Materiais magneticamente moles, Núcleo Toroidal, Sensores de corrente elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Abordagem analítica de sensores de corrente elétrica, que utilizam um núcleo toroidal de material ferromagnético envolvido por espiras de material condutor, passa pela aplicação das leis fundamentais do eletromagnetismo presentes nas equações de Maxwell. Adicionalmente, as relações de passagem que envolvem os materiais elétricos e magnéticos devem estar presentes.

Na determinação dos circuitos magnéticos equivalentes são levadas em conta as variáveis de estado (fluxo magnético e corrente elétrica), as forças magnetomotrizes e as relutâncias associadas aos fluxos magnéticos de dispersão e de magnetização.

Com esses parâmetros bem definidos podem-se desenvolver modelos para os sistemas eletromagnéticos. Entretanto, a incerteza associada ao fluxo de dispersão resulta em dificuldades no desenvolvimento desses modelos, já que a geometria do meio não magnético (ar, por exemplo) não é bem definida.

Na determinação das relutâncias, a correta caracterização magnética é fundamental. Neste particular, intervêm parâmetros como a geometria e a permeabilidade magnética do meio, que pode ser isotrópico ou anisotrópico.

Ademais, se o caráter não linear da saturação magnética dos materiais ferromagnéticos for considerado e a distribuição não uniforme do fluxo magnético no interior do núcleo for levada em conta, dificuldades analíticas são adicionadas. Nesses casos, o emprego de métodos computacionais para a solução de problemas mais complexos facilita o estudo.

Uma vez obtido o circuito magnético equivalente, técnicas topológicas [1] podem ser utilizadas para a derivação do circuito elétrico equivalente, no qual o que era relutância se transforma em reatância e as resistências elétricas dos condutores são introduzidas.

Em termos práticos, os núcleos toroidais utilizados em sensores de corrente elétrica são constituídos de materiais ferromagnéticos, geralmente ligas metálicas à base de ferro, níquel e cobalto, tais como FeSi de grãos orientados (GO), ligas amorfas e ligas nanocristalinas, ou materiais cerâmicos compostos por óxidos metálicos, conhecidos como ferrites moles [2].

Partindo dessa fundamentação, a modelagem de sensores de corrente elétrica é apresentada neste trabalho, tendo como objetivo tornar os estudos analíticos e computacionais mais próximos da representação real desses sensores.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Partindo das leis fundamentais do eletromagnetismo descritas nas equações de Maxwell e das relações de passagem que envolvem os materiais elétricos e magnéticos, um estudo analítico foi realizado. Neste modelo considerou-se um sensor de corrente elétrica semelhante a um transformador de corrente com núcleo toroidal de material ferromagnético envolvido por espiras de material condutor.

A. Fundamentação teórica

A fundamentação teórica das aplicações eletromagnéticas passa pelas leis de Ampère e Faraday/Lenz, tal como apresentadas nas equações de Maxwell (expressões (1) e (2)), nas quais $\mathbf{E}$ representa o vetor campo elétrico; $\mathbf{B}$ representa o vetor indução magnética (densidade de fluxo magnético); t é a variável tempo; $\mathbf{J}$ é a densidade de corrente elétrica; μ_0 é a

permeabilidade magnética do ar e ϵ_0 é a permissividade elétrica do ar.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday/Lenz}) \quad (2)$$

Em regime quase estático, tem-se uma simplificação da Lei de Ampère, conforme a expressão (3). Considerando o meio ferromagnético isotrópico, tem-se a relação constitutiva (4). Sendo o campo magnético $\mathbf{H}$ originado pela corrente elétrica, pode-se reescrever a Lei de Ampère, obtendo-se a expressão (5). A indução magnética pode ser determinada a partir da Lei da Conservação do Fluxo, expressa em (6).

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{Relação constitutiva}) \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Lei da conservação do fluxo}) \quad (6)$$

Caso o meio não seja isotrópico, a anisotropia magnética precisa ser considerada. Adicionalmente, há de ser levado em conta o fenômeno da saturação magnética, segundo o qual a permeabilidade, μ , não é constante, mas depende do próprio valor de $\mathbf{H}$ existente no material magnético. O fenômeno da saturação magnética faz com que a relação geral de passagem entre $\mathbf{B}$ e $\mathbf{H}$ passe a ser representada pela expressão (7), na qual $\|\mu\|$ representa o tensor permeabilidade magnética [3].

$$\mathbf{B} = \|\mu(\mathbf{H})\| \mathbf{H} \quad (7)$$

Em termos de coordenadas cartesianas, o tensor $\|\mu\|$ é uma matriz quadrada, conforme mostrado em (8).

$$\|\mu\| = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dessa forma, a expressão geral $\mathbf{B} = \|\mu\| \mathbf{H}$ pode ser expressa na forma de matriz.

Se o material é isotrópico, ou seja, se $\mu_x = \mu_y = \mu_z = \mu$, a expressão $\mathbf{B} = \|\mu\| \mathbf{H}$ assume a forma da expressão constitutiva (4) e, no caso da propagação do campo magnético pelo ar, o valor da permeabilidade magnética, μ_0 , é constante e igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

Uma aplicação pode ser feita com o sensor de corrente mostrado na Fig.1, em que i_1 e i_2 são, respectivamente, a corrente do primário e do secundário, ambas variando senoidalmente no tempo. Pela Lei de Ampère, apresentada na expressão (5), a corrente elétrica i_1 é responsável pela criação de uma indução magnética $\mathbf{B}$. A direção e o sentido desses vetores podem ser obtidos por meio da regra da mão direita.

Neste caso, a corrente elétrica i_1 é representada na Lei de Ampère por meio da densidade de corrente $\mathbf{J}$.

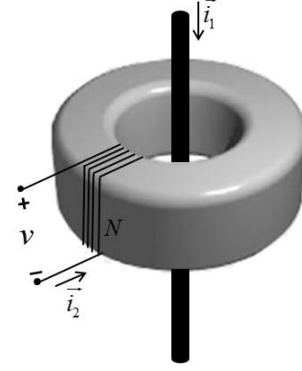


Fig.1. Representação ilustrativa de um sensor de corrente com núcleo toroidal, sendo i_1 a corrente elétrica do primário e i_2 a corrente elétrica induzida no enrolamento secundário [Fonte: elaboração própria].

Se a indução magnética $\mathbf{B}$ for variante no tempo, a essa variação, pela lei de Faraday/Lenz, podem ser associados o vetor campo elétrico $\mathbf{E}$ no interior do núcleo e uma tensão v induzida nos terminais do enrolamento secundário:

$$v = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

B. Circuito Magnético Equivalente

No tocante ao acoplamento magnético, o sensor de corrente elétrica com núcleo toroidal apresenta muita semelhança com um transformador de corrente constituído de um enrolamento secundário enrolado em torno de um anel toroidal de material ferromagnético, com o primário formado simplesmente por um condutor que passa através do centro do anel.

Nessa configuração, somente uma parcela do fluxo magnético oriundo do primário fica confinada no núcleo ferromagnético. Assim, pode-se afirmar que os enrolamentos são fracamente acoplados [4].

Assim, levando-se em conta a predominância do fluxo de dispersão pelo ar e o efeito desmagnetizante da corrente do secundário no interior do núcleo, os núcleos toroidais, sem entreferros, operam sob densidade de fluxo magnético baixa, na ordem de 0,1 T [5]. Desse modo, o dispositivo pode fornecer no secundário uma amostra de corrente proporcional à corrente do primário de forma quase exata, a menos dos erros de relação e de fase. Esses erros devem ser minimizados para que se tenha uma medição a mais exata possível.

Na Fig. 2 é apresentado o circuito magnético equivalente relativo ao sensor de corrente mostrado na Fig. 1. Nesse circuito, $\mathcal{F}_1$ e $\mathcal{F}_2$ são, respectivamente, a força magnetomotriz do primário (igual a i_1) e a força contramagnetomotriz do secundário (igual a Ni_2). $\mathcal{R}_{d1}$ e $\mathcal{R}_{d2}$ são as relutâncias de dispersão do primário e do secundário e $\mathcal{R}$ é a relutância do núcleo. ϕ_1 é o fluxo magnetizante produzido por $\mathcal{F}_1$ e ϕ_2 é o fluxo desmagnetizante produzido por $\mathcal{F}_2$.

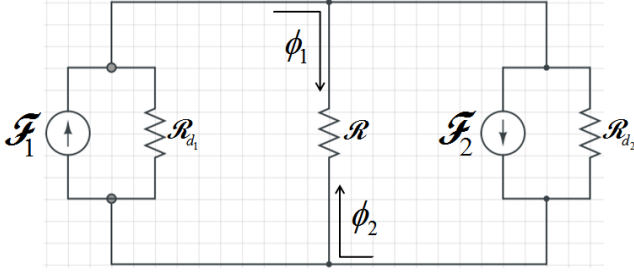


Fig.2. Circuito magnético equivalente ao sensor de corrente representado na Fig.1 [Fonte: elaboração própria].

Considerando R_{d1} e R_{d2} muito maiores do que R , isto é, que praticamente todo o fluxo magnético passará pelo núcleo magnético, tem-se que R pode ser calculada conforme (11), em que l é o comprimento do caminho magnético e A_{mag} é a área magnética.

$$R = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_{mag}} \quad (11)$$

O fluxo magnético líquido no núcleo pode ser expresso como mostrado em (12). Como $\phi = B \cdot A_{mag}$, então, a indução magnética resultante, B , pode ser expressa como mostrado em (13).

$$\phi = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2}{R} = \frac{\mu_0 \mu_r A_{mag} (i_1 - Ni_2)}{l} \quad (12)$$

$$B = \frac{\phi}{A_{mag}} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 \mu_r (i_1 - Ni_2)}{l} \quad (13)$$

Na Fig.3 é apresentado um núcleo magnético toroidal com as dimensões R_1 , R_2 , h e l , representando, respectivamente, os raios interno e externo, a altura e comprimento médio do núcleo. Caso a espessura do núcleo seja muito pequena, isto é, a diferença entre os raios externo e interno seja mínima, o comprimento do caminho magnético médio, l , pode ser expresso por $l = 2\pi R$, em que R é o raio médio, e a distribuição de campo magnético no interior no núcleo pode ser considerada uniforme.

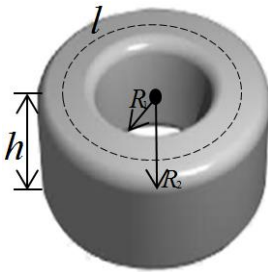


Fig.3. Núcleo magnético toroidal [Fonte: elaboração própria].

Entretanto, se a condição simplificadora de considerar os raios interno e externo aproximadamente iguais não puder ser aplicada, a distribuição de campo magnético não será uniforme na direção radial do núcleo. Neste caso, faz-se necessário obter o caminho magnético efetivo, l_e , que corresponde a um toroide hipotético com as mesmas propriedades magnéticas do núcleo não uniforme.

De acordo com [6], l_e pode ser determinado pela expressão (14). Feito isso, o caminho magnético efetivo pode ser utilizado para calcular o comportamento do núcleo não uniforme como se fosse um toroide ideal. É importante ressaltar que esse conceito é limitado a baixas densidades de fluxo em que o material obedece às relações de Rayleigh ou Peterson [6].

$$l_e = \frac{2\pi \ln(R_2/R_1)}{1/R_1 - 1/R_2} \quad (14)$$

Assim, o cálculo do módulo do vetor indução magnética resultante no núcleo, B , é dado pela expressão (15).

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r (i_1 - Ni_2)}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1 \ln(R_2/R_1)} - \frac{1}{R_2 \ln(R_2/R_1)} \right) \quad (15)$$

C. Circuito Elétrico Equivalente

Para um sistema eletromagnético como o sensor de corrente com núcleo toroidal, o circuito elétrico equivalente é um modelo simplificado do sistema real. A exatidão com que esse modelo se aproxima do sistema real é limitada pelas simplificações feitas na elaboração do circuito magnético equivalente.

A derivação de circuitos elétricos equivalentes a partir de circuitos magnéticos equivalentes pode ser feita por meio da técnica topológica proposta por [1]. De acordo com essa técnica, para cada malha independente no circuito magnético, há um nó independente no circuito elétrico. Para cada relutância derivada no circuito magnético, há uma indutância correspondente no circuito elétrico. Para cada fonte de força magnetomotriz no circuito magnético, há uma corrente correspondente na bobina do circuito elétrico.

Na Fig.4 é apresentado o circuito elétrico equivalente, refletido ao primário, para o sensor de corrente mostrado na Fig.1.

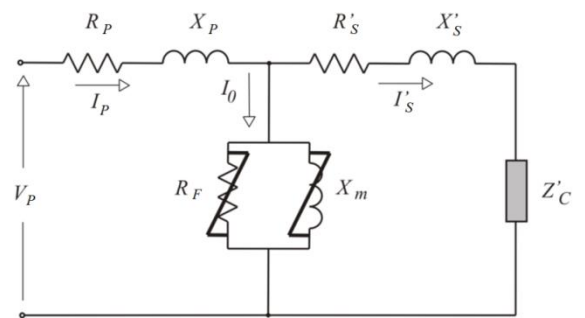


Fig.4. Circuito elétrico equivalente ao sistema eletromagnético do sensor de corrente representado na Fig.1 [Fonte: elaboração própria].

No circuito da Fig. 4, as reatâncias de dispersão e resistências dos enrolamentos primários e secundários são representadas por X_p , R_p , X_s' e R_s' , respectivamente. O ramo magnetizante está caracterizado pelos seus dois parâmetros, R_F , o qual é responsável pelas perdas ôhmicas no núcleo, e X_m , que representa a reatância de magnetização do núcleo. Z_c' é a

impedância do instrumento de medição, refletida ao primário do circuito elétrico equivalente. As correntes do primário, do secundário e de excitação são, respectivamente, I_p , I_s e I_0 .

III. SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DA MAGNETOSTÁTICA

Atualmente, existem vários programas computacionais baseados nos métodos dos elementos finitos e no método das diferenças finitas, mediante os quais a determinação das induções magnéticas no interior do núcleo pode ser feita. Dentre esses, pode ser citado o módulo magnetostático para análise de problemas bidimensionais desenvolvido por [7].

Na Tabela I são apresentadas as propriedades eletromagnéticas de algumas ligas magneticamente moles que podem ser usadas como elemento constituinte do núcleo toroidal.

TABELA I. PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE ALGUMAS LIGAS. (N): NANOCRISTALINAS, (GNO): GRÃOS NÃO ORIENTADOS, (GO): GRÃOS ORIENTADOS, (A): AMORFA.

Composição	B_{800} (T)	H_c (A/m)	μ_e (a 1 kHz)	ρ ($\mu\Omega$ m)
Fe ₈₅ Si ₂ B ₈ P ₄ Cu ₁ (N)	1,82	5,8	27000	0,736
Fe _{93,5} Si _{1,1} B _{1,7} P _{2,4} Cu _{1,3} (N)				
Fe ₈₆ Si ₁ B ₈ P ₄ Cu ₁ (N)	1,85	2,8	24000	0,670
Fe _{94,1} Si _{0,6} B _{1,7} P _{2,4} Cu _{1,2} (N)				
Fe _{73,5} Si _{13,5} B ₉ Nb ₃ Cu ₁ (N)	1,23	0,5	150000	1,15
Fe3% Si GNO	1,51	26	720	0,572
Fe3% Si GO	1,92	7,8	6100	0,478
Fe ₇₈ Si ₉ B ₁₃ (A)	1,49	2,6	10600	1,35

Fonte: Adaptado de [8].

Conforme a Tabela I, as ligas nanocristalinas (N) e a liga amorfa Fe₇₈Si₉B₁₃ (A) possuem densidades de saturação inferiores ao da liga de FeSi com grãos orientados (GO). No entanto, devido aos valores elevados da resistividade elétrica, ρ , da permeabilidade magnética, μ_e , e baixa força coerciva, H_c , essas ligas se tornam potencialmente aplicáveis como sensores de corrente elétrica no contexto de redes inteligentes [2].

Como o sensor de corrente com núcleo toroidal admite aximetria geométrica, a determinação bidimensional da indução pode ser efetuada usando componentes cilíndricas e a simulação pode ser feita tomando como domínio de estudo $\frac{1}{4}$ da região circular, conforme apresentada na Fig. 5.

As dimensões utilizadas podem ser observadas na Fig. 5. Na simulação, a condição de fronteira de Dirichlet foi utilizada, segundo a qual o potencial vetor magnético, A , é nulo ao longo da fronteira. Para os enrolamentos, considerou-se cobre com condutividade de 58 MS/m. As correntes nominais do primário e do secundário são, respectivamente, 400 A e 5 A. Adicionalmente, as densidades de corrente do primário e do secundário foram adotadas como sendo, respectivamente, 1 A/m², 3,5 A/m².

Na definição do problema, por convenção, considerou-se que a corrente elétrica é negativa e flui na direção perpendicular ao plano de estudo. Assim, tomando como base essa convenção, a densidade de corrente elétrica J da bobina do enrolamento secundário foi considerada positiva no lado interno do núcleo (corrente saindo) e negativa (corrente entrando) na região externa do toroide.

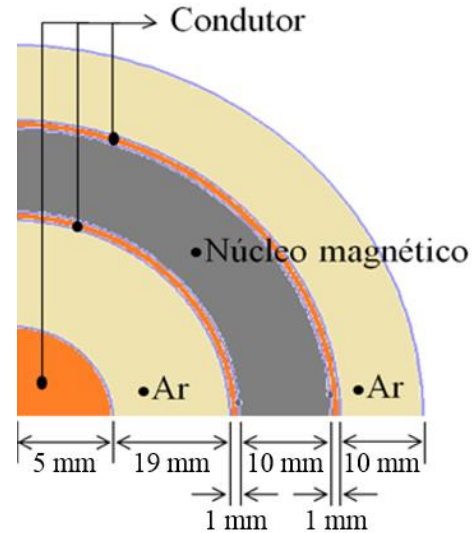


Fig. 5. Dimensões do toroide simulado no FEMM. [Fonte: elaboração própria].

Nessa simulação o material ferromagnético utilizado no núcleo foi a liga nanocristalina FINEMET (Fe_{73,5}Si_{13,5}B₉Nb₃Cu₁), cuja curva de magnetização inicial em regime quase estático, obtida experimentalmente, é apresentada na Fig. 6.

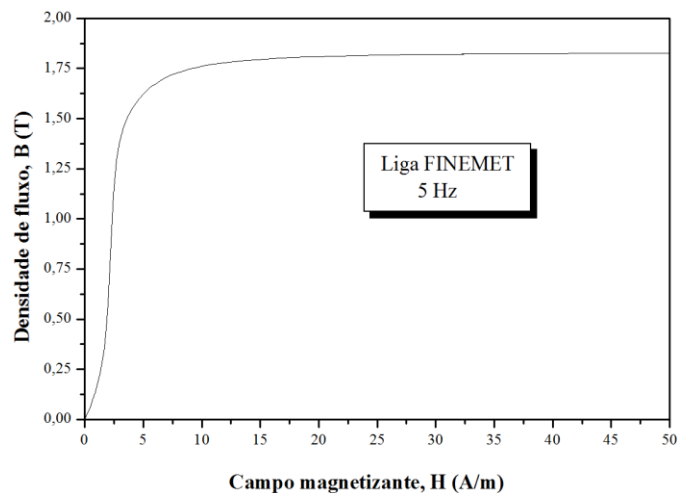


Fig. 6. Curva de magnetização inicial [9].

O emprego da ferramenta computacional desenvolvida por [7] permite a obtenção da distribuição de indução magnética, no interior do núcleo, conforme mostrado na Fig. 7 e na Fig. 8.

Na Fig. 8 é apresentado o resultado de simulação computacional no domínio de estudo. Nessa figura, o eixo das abscissas corresponde à direção radial do sistema composto

pelo condutor primário, núcleo magnético e enrolamento secundário, sendo 0 cm o centro do condutor primário e 4,5 cm a fronteira na qual, para efeito de simulação, o potencial vetor magnético foi considerado nulo. Ainda na Fig. 8, as regiões I, II, III e IV correspondem à distribuição do módulo da indução magnética no condutor primário, no conjunto ar/parte interna do enrolamento secundário, no núcleo magnético, e no conjunto parte externa do enrolamento secundário/ar, respectivamente.

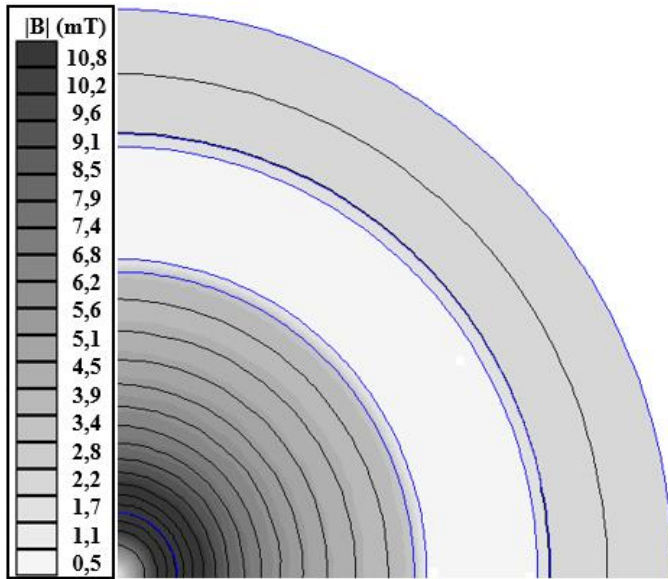


Fig. 7. Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$ do núcleo toroidal. [Fonte: elaboração própria]

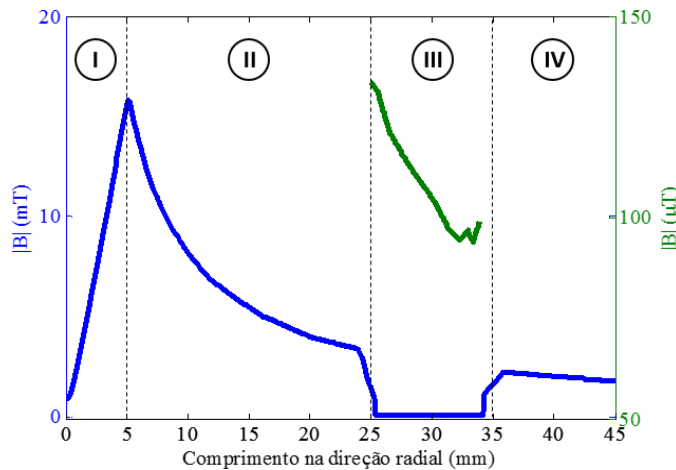


Fig. 8. Distribuição do módulo da indução magnética no domínio de estudo. [Fonte: elaboração própria]

Na região I, observa-se que o módulo da indução magnética aumenta na direção radial. Esse comportamento é decorrente do fato do material que compõe o primário ser condutor. Assim, na medida em que se percorre o condutor primário, do centro ao seu raio externo, verifica-se maior acúmulo de cargas na região periférica do condutor, sendo notável o aumento da intensidade da indução magnética nessa direção.

Como hipótese simplificadora para a modelagem matemática do sistema eletromagnético em estudo, em comparação com o material ferromagnético do núcleo, considerou-se a relutância do ar muito elevada. Utilizando essa hipótese, praticamente não há fluxo magnético nas regiões compostas por ar. Observando as regiões II e IV da Fig. 8, verifica-se que $|B|$ é da ordem de mT. Além disso, o comportamento de decaimento do módulo da indução magnética nas regiões II e IV está de acordo com a Lei de Ampère, segundo a qual a intensidade da indução magnética decai com o inverso da distância da força magnetomotriz resultante.

Na região III, percorrendo o núcleo magnético na direção do raio interno para o raio externo, verifica-se que a intensidade da indução magnética diminui, tal como previsto na expressão (15).

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas algumas considerações analíticas sobre sensores de corrente elétrica com núcleo ferromagnético toroidal e uma simulação computacional para a determinação da indução magnética no interior do núcleo.

Na fundamentação teórica tomaram-se como base as leis fundamentais do eletromagnetismo presentes nas equações de Maxwell. Na obtenção dos circuitos magnéticos equivalentes foram levados em conta as correntes elétricas e os fluxos magnéticos como variáveis de estado.

As expressões para os cálculos das relutâncias foram obtidas considerando a configuração geométrica, a permeabilidade magnética dos meios e como o fluxo magnético se propaga através do ar e do núcleo ferromagnético.

O circuito elétrico equivalente foi obtido a partir do modelo do circuito magnético equivalente. No circuito elétrico, as reatâncias correspondem às indutâncias, que por sua vez, estão diretamente relacionadas com o quadrado do número de espiras e inversamente relacionadas com as relutâncias do circuito magnético.

Na simulação computacional, realizada no domínio da magnetostática, foi utilizado um programa de cálculo de campo 2D, baseado no método dos elementos finitos.

Os valores e a distribuição da indução magnética no interior do núcleo obtidos pelo cálculo de campo 2D são coerentes com a expressão apresentada na fundamentação analítica relativa à indução magnética no interior de um núcleo ferromagnético em sua direção radial, especificamente no que diz respeito à sua distribuição não uniforme.

A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de uma fundamentação analítica referente a um sensor de corrente elétrica com núcleo ferromagnético toroidal. Partindo desta fundamentação, torna-se possível o estabelecimento de modelos computacionais mais próximos da representação real do sensor.

V. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo financiamento da pesquisa.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] G. R. Slemon, “Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas”. Vol. 1, Rio de Janeiro: LTC; São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1974, 240 p.
- [2] B. A. Luciano, “Aplicações eletroeletrônicas de ligas amorfas e ligas nanocristalinas no contexto das redes inteligentes”. In: *Proc. XI IEEE International Conference on Industry Application*, 2014, pp. 1-6.
- [3] J. P. A. Bastos, *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004, 396 p.
- [4] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 684 p.
- [5] S. M. Filho, *Medição de energia elétrica*. Rio de Janeiro: LTC, 1997, 483 p.
- [6] E. C. Snelling, *Soft Ferrites: Properties and Applications*. London: Butterworth-Heinemann, 2 Sub Edition, 1989, 376 p.
- [7] D. Meeker, *Finite element method magnetic*, version 4.2, user's manual, 2013. Disponível em: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> - Acesso em 23/11/2015.
- [8] A. Makino, T. Kubota, K. Yubuta, A. Inoue, A. Urata, H. Matsumoto, and S. Yoshida. “Low core losses and magnetic properties of $\text{Fe}_{85-86}\text{Si}_{1-2}\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloys with high B for power applications (invited)”. *Journal of Applied Physics*, v. 109, 2011.
- [9] B. A. Luciano, J. G. A. Lira, R. C. S. Freire, E. G. Costa, W. B. Castro, “Sensores de corrente elétrica com núcleos toroidais de liga nanocristalina”. In: *Anais do 62º Congresso Anual da ABM*, 2007, pp. 3724-3733.