

ANÁLISE DE UM CAPTADOR DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICO COM NÚCLEO NANOCRISTALINO UTILIZADO PARA COLHEITA DE ENERGIA

WENDELL P. FARIAS, YURI P. M. RODRIGUEZ

*Universidade Federal da Paraíba
Departamento de Engenharia Elétrica
João Pessoa – PB, Brasil*

wendell.pereira@cear.ufpb.br, molina.rodriquez@cear.ufpb.br

DAIANA C. LUCENA, MARAIZA P. SANTOS

*Universidade Federal de Campina Grande
COPELE*

Campina Grande – PB, Brasil

daiana.lucena@ee.ufcg.edu.br, maraiza.santos@ee.ufcg.edu.br

Resumo - Neste trabalho é proposto um modelo para simular um sistema de captação de energia magnética, que coleta a energia dispersa nos condutores da rede elétrica, com a finalidade de alimentar dispositivos eletrônicos ou sensores e torná-los energeticamente autônomos. Foi utilizado o software Matlab® para desenvolver um script, com o objetivo de simular a tensão induzida no secundário do núcleo, a partir de uma fonte que fornece a corrente no primário (representada pela corrente nas linhas de transmissão/distribuição) e gera um campo magnético disperso que depende das características do núcleo de nanocristalino que compõe o dispositivo, sendo possível prever o comportamento das grandezas elétricas e magnéticas aplicadas e fornecidas pelo transdutor.

Palavras-chave - Transdutor eletromagnético, Captação de energia, Modelagem.

1 Introdução

A fonte de energia é responsável pela operacionalidade dos componentes nos sistemas eletrônicos autônomos, sendo um desafio recorrente para os projetistas, pois em geral são utilizadas fontes de energia finita (baterias e pilhas) para alimentá-los, o que adiciona ao sistema a necessidade de manutenção corretiva para recarregá-las ou substituí-las.

A técnica da colheita de energia tem sido proposta como uma alternativa na resolução do problema de autonomia energética em dispositivos portáteis ou eletrônicos autônomos, com a captação de energia de fontes correlatas ou não, por meio da diferença de temperatura, radiação da solar, campos eletromagnéticos, energia cinética, entre outros. O conceito de colheita de energia, geralmente, refere-se ao processo de utilização da energia ambiente, que é convertido, principalmente (mas não exclusivamente) em energia elétrica, a fim de alimentar dispositivos eletrônicos pequenos e autônomos [1 - 5].

Os captadores são capazes de colher a energia proveniente do meio ambiente na ordem de μW a mW , que pode ser suficiente para alguns sensores e sistemas microeletrônicos de baixo consumo ou que podem ser executados em condições de baixa potência. Diante da grande diversidade de opções de energias disponíveis, é importante destacar que a aplicação e o ambiente a ser instalado, geralmente define a fonte a ser utilizada [4].

Na recuperação de energia por meio de indução magnética, o campo magnético gerado por uma corrente elétrica alternada em um condutor é captado e convertido em energia elétrica para alimentação de dispositivos [1, 2].

Na operação de um sistema, a modelagem matemática propicia a compreensão das relações entre as variáveis envolvidas e prevê as situações de operação. Neste contexto, este trabalho desenvolve um modelo analítico com utilização de um simulador computacional para um transdutor eletromagnético, utilizando o *software* Matlab, com o objetivo de prever os parâmetros na construção de um captador de energia eletromagnética, conforme ilustrado na Figura 1, em linhas de transmissão ou distribuição ou representar um existente, cuja estrutura é semelhante a um transformador de corrente. Assim é possível prever o comportamento ou estimar a tensão induzida (v_0) nos terminais da bobina secundária do transdutor, sem necessariamente realizar experimentos práticos.

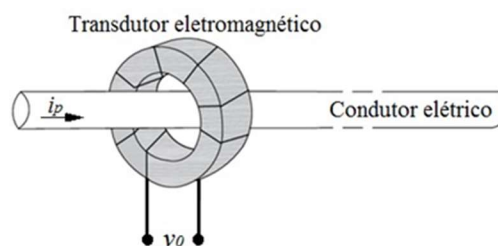


Figura 1. Configuração de um Transdutor Eletromagnético.

2 Modelo Analítico

2.1 Transdutor Eletromagnético

Um transdutor eletromagnético, ilustrado na Figura 2, por meio de núcleos de materiais com propriedades magnéticas, pode captar e converter o campo magnético induzido e disperso pelo fluxo de cargas ao longo de um condutor, o condutor elétrico

representa o enrolamento primário e o enrolamento secundário possui N espiras, com um núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade. Apresenta uma estrutura semelhante ao transformador de corrente, normalmente utilizado para medição e proteção, que em termos de circuito elétrico, possui poucas espiras no primário e uma quantidade elevada de espiras no secundário, transformando uma corrente elevada que circula no primário, em uma corrente de menor intensidade no secundário [5].

O número de espiras no secundário, as dimensões do e a permeabilidade do núcleo, que representa a facilidade com que o material magnético permite a concentração de linhas de fluxo no interior do núcleo, interfere diretamente no seu desempenho [6] [7].

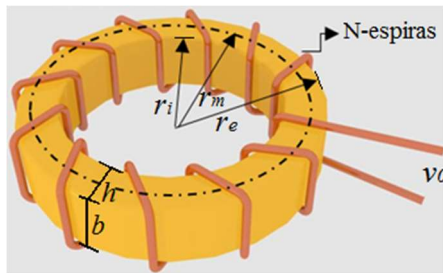


Figura 2. Transdutor eletromagnético com núcleo toroidal.

Os materiais mais utilizados em núcleos de transdutores eletromagnéticos, com aplicações em colheita de energia magnética, são os ferromagnéticos, como as ligas nanocristalinas e as ferritas compostas de óxidos de ferro e outros elementos [8] [9] [10].

A operação de dispositivos eletromagnéticos é regido pela distribuição de campos magnéticos, cujo comportamento baseia-se nas equações de Maxwell, sendo a seguir consideradas as equações para o vácuo, na ausência de meios materiais (dielétricos e/ou magnéticos). A lei de Gauss magnética expressa a nulidade do fluxo magnético líquido que entra ou sai de uma superfície fechada, isto equivale a dizer que o fluxo incidente em uma superfície que delimita um volume deverá sair através de outra região dessa superfície, de forma que as linhas de fluxo magnético formem laços fechados, de acordo com (1) [11]:

$$\oint_S B da = 0 \text{ Wb} \quad (1)$$

O fluxo magnético que atravessa uma superfície aberta S é dado por (2):

$$\phi = \oint_S B da \text{ [Wb]} \quad (2)$$

Assumindo que o núcleo tem uma permeabilidade muito maior do que a do ar ($\mu \gg \mu_0$), o fluxo magnético está confinado quase completamente no núcleo. As linhas de campo seguem o caminho definido pelo núcleo e a densidade de fluxo é uniforme em uma seção reta qualquer (A), assim:

$$\phi = BA \text{ [Wb]} \quad (3)$$

Na Figura 3 é mostrado um circuito equivalente para um transdutor eletromagnético, com uma carga R_L , sendo o primário composto apenas por uma espira, por onde circula uma corrente alternada de entrada i_p , R_s e L_s correspondem, respectivamente, a resistência e a indutância inerentes à bobina secundária. A corrente de saída é representada, respectivamente, por i_s [7].

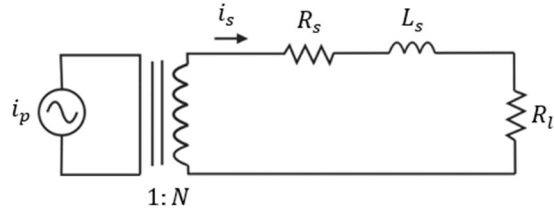


Figura 2. Circuito Equivalente de um Transdutor Eletromagnético [7].

O desenvolvimento do modelo analítico teve como base a teoria para campos magnéticos induzidos por uma corrente com frequência de 60 Hz, pois o estudo experimental foi realizado para aplicações que utilizam a frequência fundamental da rede elétrica no Brasil. A fonte geradora do campo magnético é representada por um sinal de corrente alternada $i_p = I_p \sin \omega t + \phi$, no condutor primário.

A intensidade de campo magnético H_1 gerado devido a uma corrente no primário, em uma distância radial r do centro do núcleo de um transdutor magnético, é dada por:

$$\oint H dl = i_p \Rightarrow H \oint dl = i_p \quad (4)$$

$$\Rightarrow H = \frac{i_p}{l} \Rightarrow H = \frac{i_p}{2\pi r}$$

O campo magnético gera linhas de fluxo ao redor do condutor, de forma que a intensidade de campo magnético é proporcional à corrente e inversamente proporcional à distância do condutor. A densidade de fluxo magnético média B_1 , induzida considerando um núcleo magnético, de permeabilidade $\mu_r \mu_0$, é dada por (5), em que r_e e r_i são o raio externo e o interno respectivamente, e h a largura da seção transversal:

$$B = \frac{1}{h} \int_{r_i}^{r_e} \mu_r \mu_0 H dr = \frac{\mu_r \mu_0 i_p}{2\pi h} \ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) \quad (5)$$

A relação entre a intensidade de campo magnético H e a densidade de fluxo magnético B , uma propriedade do material em que se encontra o campo magnético, está expressa em (6):

$$B = \mu H \left[\frac{Wb}{m^2} \right] \quad (6)$$

Ao serem consideradas as propriedades não lineares dos materiais ferromagnéticos a relação constituinte dada em (6) não é válida. A análise da região não linear da curva de magnetização de materiais com aplicações em colheita de energia

magnética está relacionada diretamente com o rendimento do TE [7].

Neste modelo a densidade de fluxo magnético é expressa matematicamente por (7), com o valor para α dado em (8), obtido através de um modelo para indutor proposto por Jiles e Atherton (1983), (1986). Na qual se utiliza a tangente hiperbólica com os limites de domínios da curva definidos pela densidade de fluxo magnético na saturação inicial e final do material, B_{in} e B_{sat} , respectivamente. O valor de B_{in} representa o início da saturação na curva de histerese e o valor de B_{sat} o ponto a partir do qual o valor da densidade de fluxo irá permanecer constante devido à saturação, sendo referente ao valor máximo de B , ambos foram determinados a partir de resultados experimentais, podendo também ser obtidos através de dados do fabricante.

$$B_n = B_{sat} \tanh(\alpha H) \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\tanh\left(\frac{B_{in}}{B_{sat}}\right)}{\left(\frac{B_{in}}{\mu}\right)} \quad (8)$$

O coeficiente α , expresso em (8), delimita os limites verticais da curva de magnetização pela função tangente hiperbólica em função dos valores da densidade de fluxo no ponto de saturação e da permeabilidade magnética. A Figura 4 ilustra os pontos B_{in} e B_{sat} em uma curva de histerese.

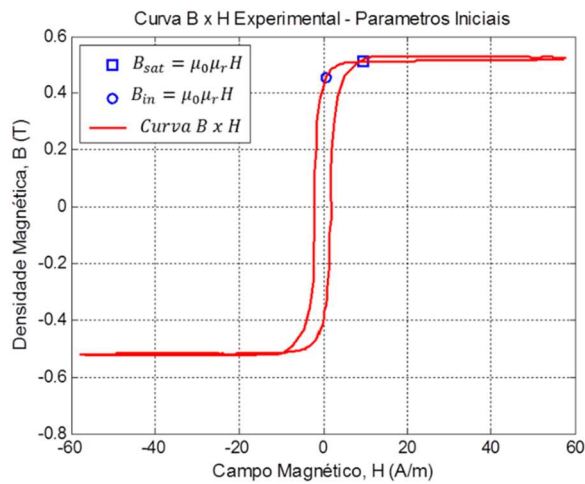


Figura 4. Localização dos pontos B_{in} e B_{sat} em uma curva de histerese.

Para uma superfície limitada por uma bobina com N espiras, o fluxo total (fluxo concatenado) será a soma dos fluxos que passam por cada espira da bobina. Esse cálculo só pode ser feito se as espiras da bobina estiverem suficientemente próximas umas das outras para que possam ser consideradas superfícies limitadas. Sendo assim, para um campo magnético uniforme aplicado sobre a bobina,

$$\lambda = N\phi = NBA \quad (9)$$

O fluxo magnético que passa através da superfície transversal é variante, portanto, de acordo

com o princípio da Lei de indução de Faraday, uma força eletromotriz é induzida na bobina, dada por:

$$v_0 = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (10)$$

3 Simulador Proposto e Resultados

O *script* produzido no Matlab, que se encontra no Apêndice, tem a finalidade de modelar o transdutor eletromagnético, obtendo os laços de histerese, a corrente e tensão de saída. É necessário informar a amplitude da corrente no primário i_p , a frequência da rede elétrica f , a fase da rede elétrica, o número de ciclos N_{ciclos} , a frequência de amostragem fs , que representa o sinal da corrente na linha de transmissão, e as características do núcleo magnético: raio interno r_i , raio externo r_e , largura da seção transversal b , altura da seção reta do núcleo h e a permeabilidade μ fornecida pelo fabricante. A partir desses parâmetros é possível encontrar o vetor intensidade de campo H e a densidade de fluxo magnético B , a curva de magnetização $H \times B$, o fluxo magnético ϕ , o fluxo magnético concatenado λ , a força eletromotriz v_0 e a corrente induzida i_s nos terminais da bobina. Na Figura 5 é ilustrada a sequência dos módulos responsáveis por obter os dados.

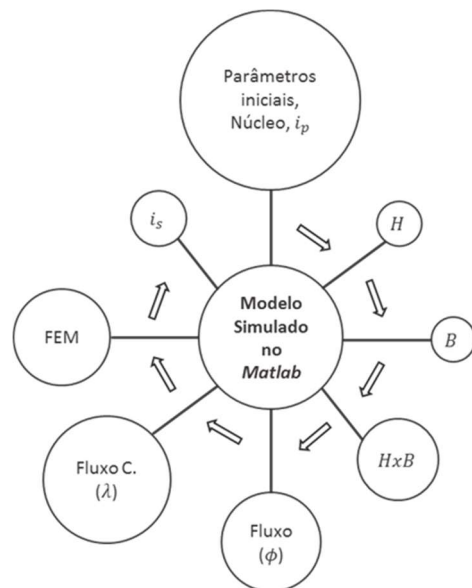


Figura 5. Sequência dos módulos responsável por obter os dados.

A fonte geradora de campo magnético disperso está presente no nosso sistema de distribuição de energia de forma abundante e no simulador proposto, foi definido para fins de simulação a fonte geradora com amplitude de 6,4 A, frequência de 60 Hz, fase de 0°, número de ciclos igual a 2 e frequência de amostragem de 40000 Hz.

Um transdutor eletromagnético com núcleo de material nano cristalino foi utilizado como base para simulação, cujas características estão definidas na Tabela 1, sendo r_e : raio externo, r_i : raio interno, h :

largura da seção reta do núcleo, b : altura da seção reta do núcleo, N : número de espiras do secundário e μ_r a permeabilidade relativa.

Tabela 1. Características do núcleo.

Características do núcleo					
r_e	r_i	h	b	N	μ_r
20,5	14,75	6,0	12,0	156	100000

Utilizando dados estimados para os valores de B_{Sat} e B_{in} pra cada densidade magnética gerada, com os valores das correntes do condutor, que representa o enrolamento primário, e as características do núcleo, são obtidas através do simulador, as curvas de histerese e as curvas de tensão para os valores de corrente no primário de 1,5 A, 2,0 A, 4,0 A e 6,4 A, ilustrada na Figura 6 e Figura 7 respectivamente. A Figura 8 ilustra a curva da tensão induzida conforme varia a corrente do condutor, ou primário do transdutor.

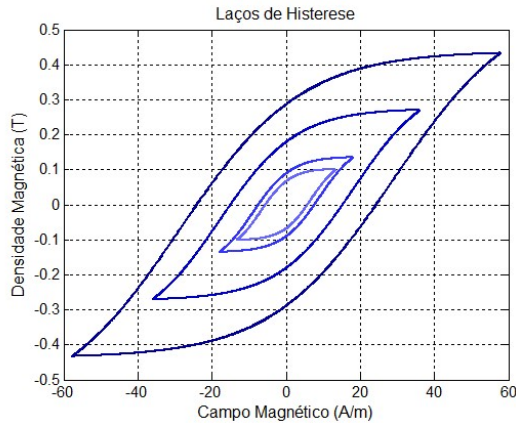


Figura 6. Curvas de histerese.

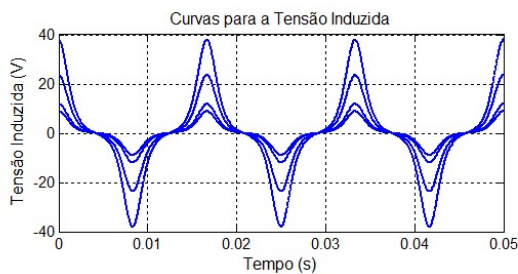


Figura 7. Curvas para a tensão induzida.

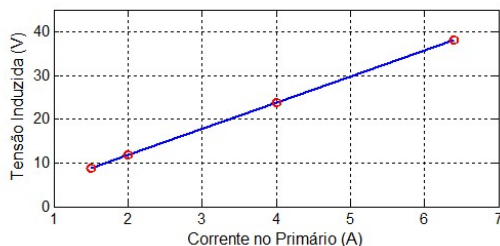


Figura 8. Tensão Induzida x Corrente no Primário.

Na Figura 9 é mostrado o resultado simulado para tensão induzida utilizando os valores de B_{Sat} e B_{in}

obtidos a partir de um resultado experimental para a curva de histerese. O resultado obtido experimentalmente para a tensão induzida está na Figura 10, utilizando o transdutor com uma carga de 10 kΩ conectada ao secundário. A forma de onda foi captada com um osciloscópio conectado nos terminais da bobina secundária. Visualmente é possível perceber que existe uma similaridade muito próxima das amplitudes e fases dos dois sinais.

A fim de fazer uma análise comparativa entre os resultados pode-se observar na Figura 11, que as formas de onda com resultado experimental e simulado se sobrepõem, os picos das curvas obedecem a mesma amplitude e ocorrerem no mesmo período.

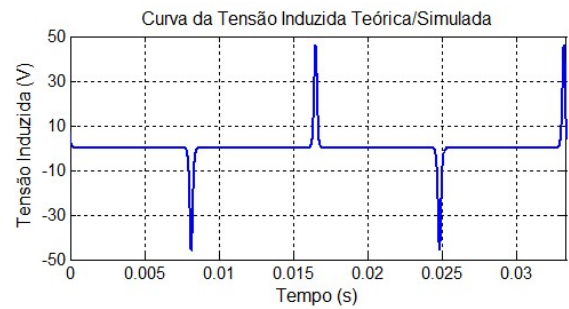


Figura 9. Resultado simulado para a tensão induzida.

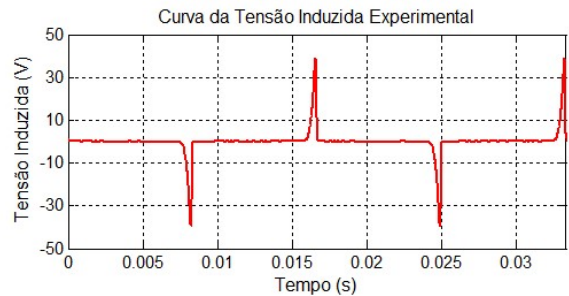


Figura 10. Resultado simulado para a tensão induzida.

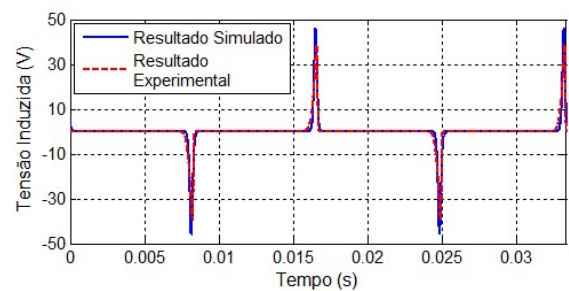


Figura 11. Resultados simulado e experimental para a tensão induzida.

4 Conclusão

Neste artigo foi apresentado um modelo analítico implementado no MATLAB para analisar o desempenho de um captador de energia eletromagnética com núcleo toroidal, composto de um material nanocristalino.

Foram realizados vários testes considerando múltiplas correntes no primário e as características do núcleo, com as análises computacionais, é possível observar o comportamento dos valores pra as tensões de saída e projetar o sistema captador de energia, como número de espiras, tamanho núcleo, tipo do núcleo. A validação da análise e o modelo analítico implementado, se deu por meio da comparação entre os dados experimentais e os obtidos pela simulação teórica.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Tartagni, "Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems." [S.l.]: CATRENE Working Group on Energy Autonomous Systems, 2009. 84 p.
- [2] J. C. López, "TFM: Energy Harvesting." Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Sept 2011.
- [3] F. Belhora, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, L. Lebrun, A. Hajjaji, M. Mazroui and Y. Boughaleb. "Hybridization of electrostrictive polymers and electrets for mechanical energy harvesting." Sensors and Actuators A, v. 183, p. 50–56, jun. 2012.
- [4] E. M. Minero, et al. "Piezoelectric Energy Harvesting from Induced Vortex in Water Flow." Instrumentation and Measurement Technology Conference, p. 624-627, 2012.
- [5] N. M. Roscoe, M. D. Judd and J. Fitch, "Development of Magnetic Induction Energy Harvesting for Condition Monitoring." Universities Power Engineering Conference (UPEC), p. 1-5, Sept 2009.
- [6] T. O. Moraes Jr., Y. P. M. Rodriguez, E. C. S. Melo, and C. P. Souza, "Experimental Results on Magnetic Cores for Magnetic Induction-Based Energy Harvesting," *19 IMEKO*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 625-630.
- [7] Z. Wu, Y. Wen and P. Li, "A Power Supply of Self-Powered Online Monitoring Systems for Power Cords." IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 28, December 2013. ISSN 4.
- [8] T. O. Moraes Jr., Y. P. M. Rodriguez, E. C. S. Melo, and C. P. Souza, "Experimental Results on Magnetic Cores for Magnetic Induction-Based Energy Harvesting," *19 IMEKO*, Barcelona, Spain, 2013, pp. 625-630.
- [9] J. Moon and S. B. Lee, "Analysis Model for Magnetic Energy Harvesters," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 30, no. 8, pp. 4302-4311, Aug 2015.
- [10] S. Yuan et al., "Magnetic Field Energy Harvesting Under Overhead Power Lines," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 30, no. 11, pp. 6191-6202, Nov 2015.
- [11] A. E. Fitzgerald, JR. C. Kingsley and S. D. Umans, "Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência." Tradução de Anatólio Laschuk, Porto Alegre, n. 6, p. 648, 2006.

Apêndice

```

índice=1; % criação de vetor
% corrente variável a cada loop 5 unidade até 100
for i= 1:4
%           ip1 ip2 ip3 ip4
Amplitude=[1.5 2.0 4.0 6.4];

```

```

fonte= [60 0 3 40000]; %
% tempo final desejado
tf= fonte(3)*1/fonte(1);
% vetor de tempo de 0 a tf com intervalos de 1/fs
t=0:1/fonte(4):tf;
%% Ip: corrente do primário
ip (índice,:)= ...
Amplitude(i)*sin(2*pi*fonte(1)*t+fonte(2));
%% Parâmetros do Núcleo
% ns - número de espiras
%           re   ri   b   h   ns
nucleo= [20.5 14.75 6.0 12.0 156]./1000;
% raio médio
rm(índice)= (nucleo(1)+ nucleo(2))/2;
% comprimento do perímetro
l(índice)= 2*pi*rm(índice);
% área da seção reta do núcleo
a(índice)= nucleo(3)*nucleo(4);
% volume do núcleo
v(índice)=2*pi*rm(índice)*a(índice);
u0=((4*pi)*10e-7); % permeabilidade do vácuo
ur= 100000; % permeabilidade material linear
%% Intensidade do Campo Magnético
H(índice,:)=(ip(índice,:)./(l(índice)));
hc(índice)=max(H(índice,:))/2;
%% Densidade do Campo Magnético estimado
B(índice,:)= ((ur*u0).*(H(índice,:)))/100;
% B Saturação acredita-se que 33% seja o suficiente
% para iniciar
Bsat(índice)= max(B(índice,:))*0.7032;
% B Saturação Inicial - Constante encontrada por
estimativas
Bsin(índice)= (Bsat(índice)-Bsat(índice)*0.40);
% Constante encontradas por estimativas
br(índice)=Bsin(índice)/40.4;
% H Saturação inicial, quando H=B/(u0*ur)
Hsin(índice)=(Bsin(índice)/(u0*ur))*100;
%% Permeabilidade estimada não linear
u(índice,:)=(atanh(Bsin(índice)/Bsat(índice)))/(Hsin(índice))*1.0695; % Constante encontradas por
% estimativas
%% Densidade do Campo Magnético estimado não
% linear - Novo B_nonlinea
B_nonlinear(índice,:)= ...
Bsat(índice)*tanh(u(índice,:).*H(índice,:));
%% Ajuste da Densidade do Campo Magnético
estimado não linear.
B_nonlinearud(índice,:)= ...
((Bsat(índice)*tanh(u(índice,:)) ...
.*(max(H(índice,:))+hc(índice)))) - ...
(Bsat(índice)*tanh(u(índice,:)) ...
.*(max(H(índice,:))-hc(índice))))/2;
%% Desmagnetização Histerese
B_nonlinearu(índice,:)=
Bsat(índice)*tanh(u(índice,:)) ...
.*(H(índice,:)+hc(índice))) -B_nonlinearud(índice,:);
%% Magnetização Histerese
B_nonlineard(índice,:)=
Bsat(índice)*tanh(u(índice,:)) ...
.*(H(índice,:)-hc(índice)))+B_nonlinearud(índice,:);
%% Número de espiras proposto

```

```

NroEspiras(i)= ...
(10^8)/((4.44)*max(B(indice,:)) ...
*10000*(a(indice))*fonte(1));
%%% Fluxo
F(indice,:)= B_nonlinear(indice,:).*a(indice);
%%% Fluxo Concatenado
Fc(indice,:)= F(indice,:).*(nucleo(5).*1000)*10;
%%% Tensão Induzida no Secundário
FEM(indice,:)= gradient(Fc(indice,:),1/fonte(4));
RL= 10000; % Resistencia da carga 10k Ohms
%%% Corrente no Secundário
Is(indice,:)= FEM(indice,:)./RL;
%%% Gráficos
resultado(indice,:)= [real(max(FEM(indice,:)))
real(max(ip(indice,:)))];
indice= indice + 1;
end

```