

OTIMIZAÇÃO DE UM TORÓIDE USANDO O ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Juliana A. Malagoli, José R. Camacho, Jacson Hudson I. Ferreira, Sebastião C. Guimarães Jr.

juliana.malagoli@gmail.com, jrcamacho@ufu.br, jacson@iftm.edu.br, scguimaraes@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG

Resumo – Nos dias atuais, o projeto de sistemas de engenharia configura-se como uma linha de pesquisa de grande interesse devido às inúmeras aplicações que podem ser encontradas em áreas distintas da ciência e engenharia. Neste cenário, o projeto de toróide, forma geométrica do núcleo redondo e semelhante a um anel e cuja função base é concentrar as linhas de força do campo magnético, configura-se como um interessante tema de pesquisa, já que está diretamente relacionado aos custos de transformadores. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo o projeto de um toróide utilizando o Algoritmo de Evolução Diferencial. Para essa finalidade considera-se a minimização do volume do toróide através da determinação do vetor de variáveis geométricas que caracterizam o modelo matemático apresentado. Os resultados preliminares indicam que a metodologia proposta configura-se como uma interessante alternativa para a finalidade acima descrita.

Palavras-Chave – Evolução Diferencial, Método de Elementos Finitos, Toróide.

OPTIMIZATION OF A TOROID USING DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

Abstract – In the present day, design of engineering systems appears as a line of research of high interest due to numerous applications that can be found in different areas of science and engineering. In this setting, the project toroid, geometric shape round and core similar to a ring and whose function based is to concentrate the force lines of the magnetic field, appears as an interesting research topic, since it is directly related to the costs of transformers. In this context, the present work aims at designing a toroid using the Differential Evolution Algorithm. For this purpose considered to minimize the volume of the toroid by determining the vector of geometric variables that characterize the mathematical model presented. Preliminary results indicate that the methodology proposed appears as an interesting alternative for the purpose described above.

Keywords – Differential Evolution, Finite Element Method, Toroid.

I. INTRODUÇÃO

No contexto industrial, os núcleos com formatos toroidais oferecem uma excelente possibilidade de escolha para o projetista de transformadores e indutores [1]. Existem dois tipos de aplicações para os núcleos, que diferem em tamanho e frequência de operação: os transformadores de sinal (pequena dimensão e altas frequências) e os transformadores de potência (grande dimensão e baixas frequências). A permeabilidade magnética é elevada e a condutividade elétrica é baixa, o que ajuda a evitar correntes de Foucault. Um dos fabricantes de toróides é a *Micrometals Arnold Powder Cores* [2].

Em se tratando do projeto de sistemas de engenharia, objetiva-se produzir toróides para realizar tarefas específicas com ótima economia e eficiência. O problema de projeto e fabricação de toróides é construir, o mais economicamente possível, um núcleo de ferro silício que cumpra um determinado conjunto de especificações. Tradicionalmente, o projeto de toróide tem sido direcionado a alcançar melhores características de desempenho ou redução de custo de fabricação. É notório que, qualquer melhoria significativa na eficiência operacional do toróide implica na conservação de energia. Por isso, deseja-se com o projeto deste sistema reduzir o volume do núcleo de ferro silício. A eficiência da energia de um toróide pode ser otimizada reduzindo-se o peso dos materiais ativos utilizados, o que pode ser conseguido através da redução do diâmetro e comprimento do toróide, isto é, através da minimização do volume do núcleo [3].

II. PROJETO DO TORÓIDE

Toróide refere-se à forma geométrica do núcleo, redondo e semelhante a um anel, como mostra a Figura 1. Pode ser constituído por diversos materiais magnéticos, desde uma fita muito fina de aço silício com grão orientado até materiais advindos da nanotecnologia que resulta em uma gama de produtos que podem se beneficiar das potencialidades do toróide.

Os toróides têm vantagens e desvantagens em relação aos outros tipos de núcleos [1]:

Vantagens:

- Podem ser obtidos em diversas permeabilidades;
- Os núcleos podem ser obtidos em diversos tamanhos e espessuras;
- Baixo custo;



XIIICEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

- Não apresenta interação sensível com os circuitos adjacentes como ocorre com indutores de outros tipos;
- Indutância elevada em relação ao tamanho que ocupam;
- Faixa de aplicações entre 10 KHz a 3 MHz.

Desvantagem:

- Não é possível variar a indutância.

A Figura 1 mostra o toróide do fabricante *Micrometals Arnold Powder Cores* [2]. O modelo usado é FS-601090-2.

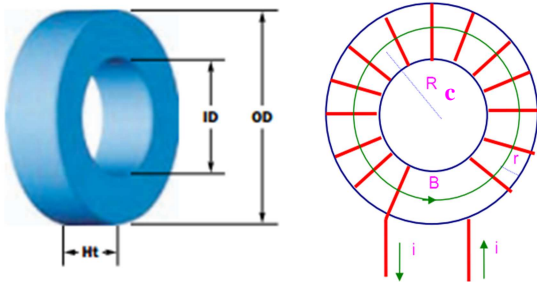


Fig. 1. Modelo do toróide.

Onde:

- ID – É o diâmetro interno (m);
- OD – É o diâmetro externo (m);
- Ht – É a altura (m);
- Rc – É o raio que passar até o centro do toróide (m);
- Re – É o raio da extremidade interna do toróide (m) ($Re=Rc-r$).

A Tabela I mostra os parâmetros do toróide.

Tabela I – Parâmetros do Toróide

Parâmetros	Valores	Unidades
Diâmetro Interno (ID)	0,08128	m
Diâmetro Externo (OD)	0,1524	m
Altura (Ht)	0,0254	m
Número de Espiras (N)	200	<i>Espiras</i>
Corrente (I)	0,0001	A
Frequência (f)	10.000	Hz
Tensão (V)	7,8	V
Permeabilidade Magnética Ferro Silício (μ_r)	55.000	-
Permeabilidade Magnética no vácuo (μ_0)	$4 \pi 10^{-7}$	$T m / A$

O comprimento do núcleo do toróide é representado pela equação:

$$L_e = 2 \pi R \quad (1)$$

Onde:

- R – Raio até o centro do toróide (m).

A área do núcleo do toróide é:

$$A_e = r H_t \quad (2)$$

Onde:

- r – É a distância do $OD - ID$ (m).

O volume do toróide é representado pela equação:

$$V_e = A_e L_e \quad (3)$$

Os cálculos da densidade de fluxo magnético B e do campo magnético H do toróide são mostrados a seguir.

A densidade de fluxo magnético no centro do toróide é [3]:

$$Bc = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2 \pi Rc} \quad (4)$$

Onde:

- μ_0 – É a permeabilidade magnética do vácuo ($T m/A$);
- μ_r – É a permeabilidade magnética do material;
- N – É o número de espiras;
- I – É a corrente (A);

A densidade de fluxo magnético na extremidade interna do toróide é [3]:

$$Be = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2 \pi Re} \quad (5)$$

A lei de comportamento do material, que estabelece a relação entre campo magnético e o meio em que estão inseridos é dada pela equação do campo magnético no centro do toróide [3]:

$$Hc = \frac{Bc}{\mu_0 \mu_r} \quad (6)$$

O campo magnético na extremidade interna do toróide é [3]:

$$He = \frac{Be}{\mu_0 \mu_r} \quad (7)$$

III. ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo evolutivo proposto para problemas de otimização [4]. Uma das principais características dessa metodologia é que esta apresenta uma concepção puramente matemática, baseada em operações vetoriais, sendo por este motivo considerada uma abordagem estrutural [5].

Em linhas gerais, a ideia principal por trás deste algoritmo é o esquema proposto para atualização de cada indivíduo, a saber, por meio da realização de operações vetoriais. Basicamente, a diferença ponderada entre dois indivíduos da população é adicionada a um terceiro indivíduo da mesma população. Assim, o indivíduo gerado através deste esquema é avaliado segundo a função objetivo, podendo inclusive substituir indivíduos mal sucedidos nas gerações seguintes. Esta característica faz com que essa técnica seja reconhecida como uma abordagem puramente estrutural, o que a diferencia em relação às outras técnicas evolutivas, já que essas têm fundamentação teórica inspirada na natureza. Neste caso, a diferença ponderada, via taxa de perturbação F , entre dois indivíduos (\vec{x}_{r_2} e \vec{x}_{r_3}) é adicionada a um terceiro indivíduo (\vec{x}_{r_1}) como mostrado na Figura 2.

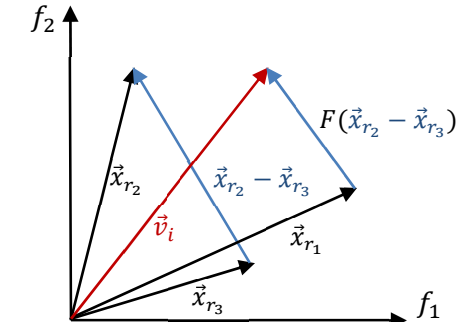


Fig. 2. Fundamentação teórica do algoritmo de ED [6].

O algoritmo é escrito em linguagem C, a evolução diferencial é utilizada devido a sua simplicidade, rápida convergência e precisão.

Na literatura, pode-se encontrar inúmeras aplicações do algoritmo de ED em áreas distintas da ciência, dentre as quais pode-se citar: estimação de parâmetros térmicos em reator de leito [7], síntese e otimização de sistemas integrados de energia aplicados a destilação [8], projeto de sistemas de engenharia [9], determinação da difusividade térmica aparente na secagem de frutas [10], projeto de sistemas de engenharia com enfoque multi-objetivo [11], estimação de parâmetros térmicos em transferência radiativa [12], além de outras aplicações [6].

IV. METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, este trabalho consiste na minimização do volume do toróide via aplicação do algoritmo de evolução diferencial. Para o melhor entendimento da metodologia empregada neste trabalho, alguns pontos devem ser destacados:

- O objetivo considerado é: minimizar a função do volume do toróide (V_e);
- As variáveis de projeto são: diâmetro interno (ID), o diâmetro externo (OD) e a altura do toróide (Ht);
- Os parâmetros utilizados pelo algoritmo: 25 indivíduos, 100 iterações, taxa de perturbação e probabilidade de cruzamento igual a 0,8 e estratégia DE/rand/1/bin para a geração de potenciais candidatos;
- Critério de parada: um determinado número de gerações é definido para interromper o procedimento.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo considera a Equação 3 como a função objetivo do problema estudado. A função objetivo é minimizar o volume do toróide. A Tabela II apresenta as variáveis, os parâmetros e os limites do vetor para minimizar a função objetivo utilizando o algoritmo de evolução diferencial.

Tabela II – Variáveis, Parâmetros e Limites

Varáveis	Parâmetros	Limites	
		Mínimo	Máximo
x(1)	Diâmetro Interno (ID)	0,07965	0,08365
x(2)	Diâmetro Externo (OD)	0,1499	0,1539
x(3)	Altura (Ht)	0,0228	0,0268

A Figura 3 apresenta o perfil de volume do toróide obtido pelo Algoritmo de Evolução Diferencial. A função objetivo é minimizada, ou seja, o volume é reduzido.

Observa-se também, que a execução do algoritmo de evolução diferencial foi capaz de obter resultados satisfatórios para minimizar o volume do toróide.

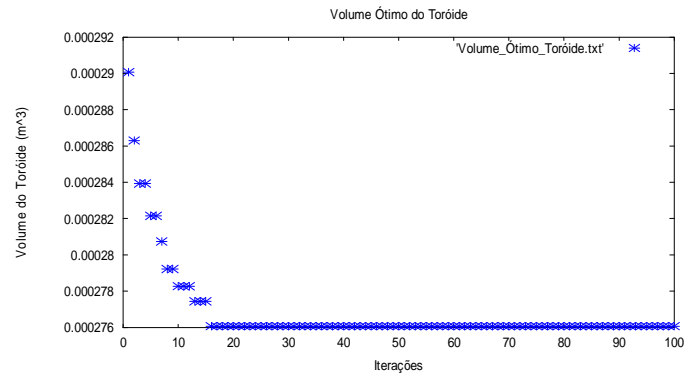


Fig. 3. Resultado do volume minimizado pelo algoritmo de evolução diferencial.

A Tabela III apresenta os principais parâmetros do projeto do toróide antes e depois da otimização. Os principais parâmetros do projeto do toróide são: diâmetro interno, diâmetro externo, altura, densidade de fluxo no centro, densidade de fluxo na extremidade interna, campo magnético no centro, campo magnético na extremidade interna, fluxo magnético, indutância e volume do núcleo toroidal, respectivamente, como mostra a Tabela III.

Tabela III – Parâmetros antes e depois da Otimização

Parâmetros do Projeto do Toróide	Projeto Original	Projeto Otimizado
Diâmetro Interno (ID)	0,08128 (m)	0,08365 (m)
Diâmetro Externo (OD)	0,1524 (m)	0,1499 (m)
Altura (Ht)	0,0254 (m)	0,0228 (m)
Densidade de Fluxo no centro (Bc)	0,0037730 (T)	0,0037729 (T)
Densidade de Fluxo na Extremidade Interna (Be)	0,0053939 (T)	0,0052632 (T)
Campo Magnético no Centro (Hc)	0,0545904 (A/m)	0,0545898 (A/m)
Campo Magnético na Extremidade Interna (He)	0,0780436 (A/m)	0,0761518 (A/m)
Fluxo Magnético (ϕ)	0,000412134 (Wb)	0,000338052 (Wb)
Indutância (L)	4,12134 (H)	3,38052 (H)
Volume do Núcleo (Ve)	0,000330309 (m³)	0,000275984 (m³)

É evidente a partir da Tabela III que o diâmetro externo e altura são reduzidos, quando comparados com os valores iniciais do projeto original. O diâmetro interno aumentou um pouco. A densidade de fluxo na extremidade interna diminuiu um pouco. No entanto, o valor da densidade de fluxo no centro do toróide se manteve o mesmo após a otimização. Já os valores dos campos magnéticos no centro e na extremidade interna do toróide diminuíram quando comparado com os valores dos campos magnéticos obtidos a partir da concepção inicial. A diminuição na densidade de fluxo na extremidade interna reduz as perdas específicas. Uma vez que, a perda é menor em comparação com o desenho inicial, o peso do toróide é reduzido. Além disso, o custo do toróide a partir da abordagem de otimização irá ser inferior quando comparado com o toróide com a abordagem inicial.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados da densidade de fluxo e campo magnético do toróide original, respectivamente. Utilizou-se o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para modelar e analisar o toróide original utilizando o método de elementos finitos.

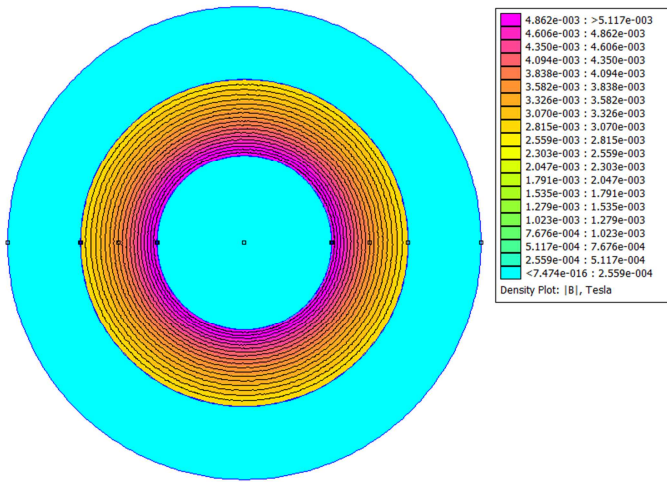


Fig. 4. Resultado da densidade de fluxo do toróide original.

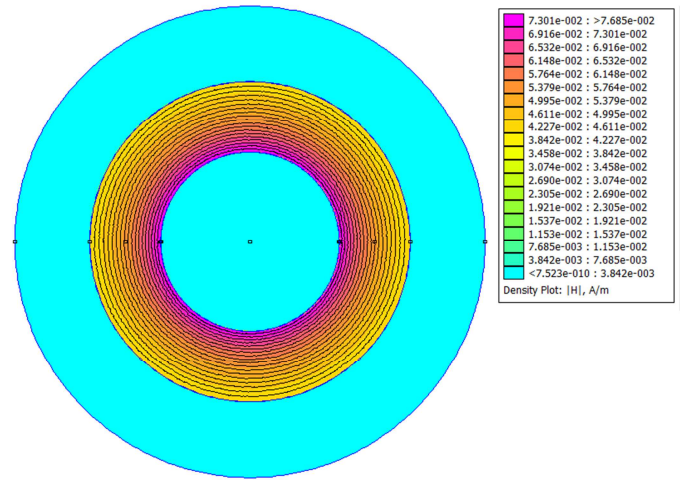


Fig. 7. Resultado do campo magnético do toróide ótimo.

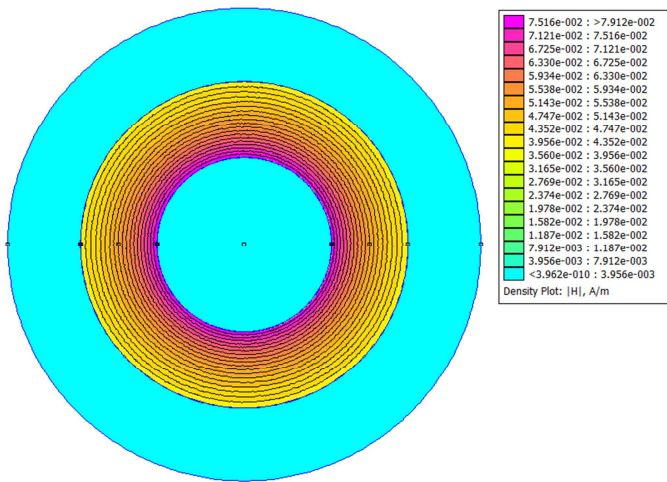


Fig. 5. Resultado do campo magnético do toróide original.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados da densidade de fluxo e campo magnético do toróide otimizado, respectivamente. Utilizou-se o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para modelar e analisar o toróide ótimo utilizando o método de elementos finitos.

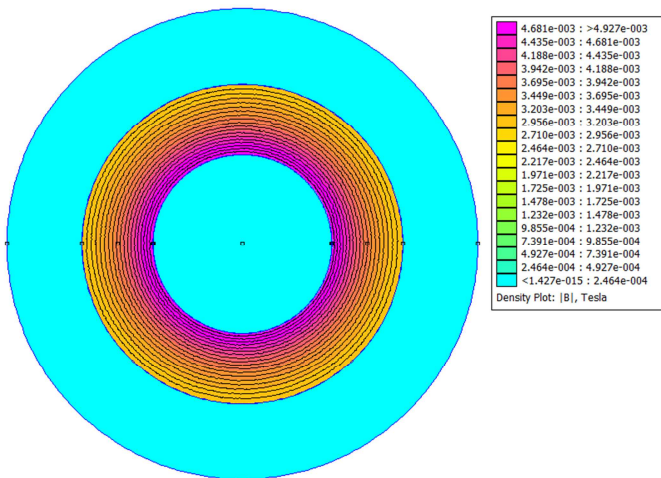


Fig. 6. Resultado da densidade de fluxo do toróide ótimo.

Nota-se nas Figuras 4 e 6, a diferença nos resultados da densidade de fluxo na extremidade interna do toróide antes é 0,0053939 (T) e após é de 0,0052632 (T). Enquanto que nas Figuras 5 e 7, os resultados do campo magnético na extremidade interna do toróide antes é de 0,0780436 (T) e após é de 0,0761518 (T). Após a minimização da função objetivo, o volume total do toróide de 0,000330309 (m^3) passou a ser 0,000275984 (m^3), ou seja, houve uma redução de 16,44 (%).

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou o projeto de um toróide utilizando o Algoritmo de Evolução Diferencial. Foram analisados o volume do núcleo original e otimizado. A partir da análise dos resultados obtidos observa-se que o algoritmo de evolução diferencial foi capaz de minimizar o volume do toróide através da determinação do vetor de variáveis geométricas que caracterizaram o modelo matemático apresentado. Desta forma, conclui-se que a metodologia proposta se configura como uma interessante estratégia para a finalidade acima descrita.

Como propostas de trabalhos futuros, pode-se citar a aplicação da metodologia nas indústrias, e a otimização dos projetos de equipamentos para minimizar custos e maximizar eficiência.

AGRADECIMENTOS

A autora Juliana Almansa Malagoli agradece à CAPES pelos recursos destinados ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4097-art560>, acessado em 16 de Abril de 2014.
- [2] www.micrometalsarnoldpowdercores.com, acessado em 17 de Abril de 2014.
- [3] J. A. Malagoli, *Os Elementos Finitos no Estudo de Eletromagnetismo Utilizando os Software Gmsh/GetDP*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

- [4] R. Storn, K. Price, *Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces*. International Computer Science Institute, Vol.12, pp. 1-16, 1995.
- [5] F. S. Lobato, *Multi-objective Optimization to Engineering System Design*. Tese, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 2008.
- [6] R. Storn, K. Price, J. A. Lampinen, *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Springer: Natural Computing Series, 2005.
- [7] B. V. Babu, K. K. N. Sastry, *Estimation of Heat-transfer Parameters in a Tricklebed Reactor using Differential Evolution and Orthogonal Collocation*. Computers and Chemical Engineering, Vol. 23, pp. 327-339, 1999.
- [8] B. V. Babu, R. P. Singh, *Synthesis and Optimization of Heat Integrated Distillation Systems Using Differential Evolution*, in Proceedings of the All-India Seminar on Chemical Engineering Progress on Resource Developmen, 2000.
- [9] F. S. Lobato, V. Steffen Jr., *Engineering System Design with Multi-Objective Differential Evolution*, in Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007.
- [10] V. C. Mariani, A. G. B. Lima, L. S. C. Coello, *Apparent Thermal Diffusivity Estimation of the Banana during Drying using Inverse Method*. Journal of Food Engineering, Vol. 85, pp. 569-579, 2008.
- [11] F. S. Lobato, V. Steffen Jr., E. B. Arruda, M. A. S. Barrozo, *Estimation of Drying Parameters in Rotary Dryers using Differential Evolution*, Journal of Physics: Conference Series, Vol.135, 2008.
- [12] F. S. Lobato, V. Steffen Jr., A. J. S. Neto, *Estimation of Space-Dependent Single Scattering Albedo*, in Radiative Transfer Problems, Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, 2010.