

18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

## PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO UTILIZANDO O ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Juliana Almansa Malagoli, [juliana.malagoli@gmail.com](mailto:juliana.malagoli@gmail.com)<sup>1</sup>

Fran Sérgio Lobato, [fslobato@feq.ufu.br](mailto:fslobato@feq.ufu.br)<sup>2</sup>

José Roberto Camacho, [jrcamacho@ufu.br](mailto:jrcamacho@ufu.br)<sup>1</sup>

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, [mauricio.luz@ufsc.br](mailto:mauricio.luz@ufsc.br)<sup>3</sup>

Jacson Hudson Inácio Ferreira, [Jacson@iftm.edu.br](mailto:Jacson@iftm.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica.

Av.: João Naves de Ávila, nº 2121, Bairro: Santa Mônica, CEP: 38.408-100, Uberlândia-MG, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química.

Av.: João Naves de Ávila, nº 2121, Bairro: Santa Mônica, CEP: 38.408-100, Uberlândia-MG, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Elétrica.

Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, Bairro: Trindade, CEP: 88.040-970, Florianópolis-SC, Brasil.

**Resumo:** Atualmente, 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 engenharia. Neste cenário, os transformadores monofásicos são dispositivos fundamentais para a operação de sistemas de potência e podem ser considerados como o tipo de máquina elétrica responsável por realizar a transformação de energia elétrica, proporcionando a redução ou elevação da tensão alternada. Configura-se como um interessante tema de pesquisa, já que está diretamente relacionado a sistemas de redução da tensão em circuitos eletrônicos presente em diversos equipamentos, por exemplo, em eletrodomésticos. Além disso, têm um custo significativo em relação ao total de uma instalação. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo o projeto de transformador monofásico utilizando o Algoritmo de Evolução Diferencial. Os resultados mostram a minimização do volume de um transformador monofásico através da determinação do vetor de variáveis geométricas que caracterizam o modelo matemático apresentado.

**Palavras-chave:** Evolução Diferencial, Otimização, Transformador Monofásico.

### 1. INTRODUÇÃO

No contexto industrial, os transformadores monofásicos, são máquinas responsáveis pela transferência de energia elétrica de um circuito para outro, proporcionando a redução ou elevação da tensão alternada (Aguilar e Camacho, 2011). Além disso, dependem da ação indireta da indutância mútua entre os enrolamentos. Os transformadores podem ser elevadores, abaixadores ou simplesmente isoladores cada um com uma finalidade, construção e tamanho específicos (Godoy, 2010).

Em se tratando do projeto de sistemas de engenharia, objetiva-se produzir máquinas para realizar tarefas específicas com ótima economia e eficiência. O problema de projeto e fabricação de transformador é construir, o mais economicamente possível, um transformador que cumpra um determinado conjunto de especificações (Malagoli *et al.*, 2014). Tradicionalmente, o projeto do transformador monofásico tem sido contemplado para alcançar melhores características de desempenho ou para a redução do custo (Martignoni, 1991). É notório que, qualquer melhoria significativa na eficiência operacional do transformador implica na conservação de energia. Por isso, deseja-se com o projeto deste sistema melhorar a eficiência energética e reduzir os custos de materiais ativos (ferro e cobre) do transformador. Podem-se reduzir os pesos dos materiais ativos utilizados, através da redução do diâmetro e comprimento do transformador, isto é, através da minimização do volume total do equipamento.

Diante do que foi apresentado, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho do algoritmo de Evolução Diferencial para a minimização do volume de um transformador monofásico. Este trabalho está estruturado como segue: A seção 2 apresenta uma breve descrição e caracterização do projeto de transformador; o algoritmo de evolução diferencial é apresentado brevemente na seção 3. As seções 4 e 5 descrevem a metodologia proposta e apresentam os resultados obtidos para o estudo de caso. Finalmente, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na seção 6.

## 2. PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

O transformador possui três componentes indispensáveis à sua operação: enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo. O enrolamento primário está ligado à fonte e é constituído por uma quantidade de espiras de material condutor, normalmente, o cobre ou alumínio (Martignoni, 1991). O enrolamento secundário está ligado à carga e é constituído por material condutor semelhante ao do primário (Martignoni, 1991). O núcleo conduz fluxo magnético e é constituído por material com baixa relutância magnética, normalmente, o aço silício laminado ou metal amorfo com base em aço ou cobalto para redução de perdas ocasionadas por correntes de Foucault e sobre o qual estão enrolados o primário e secundário (Godoy, 2010).

### 2.1. Considerações e dados para o projeto dos transformadores de pequena potência monofásico

*Condutores, isolamento e disposição das bobinas:* os condutores nos transformadores são de cobre, isolados com esmalte ou algodão. O enrolamento das bobinas é entre uma camada e outra sucessiva há uma folha de papel isolante. Para garantir o isolamento das bobinas, os fios não são enrolados até a extremidade do carretel, ficando uma distância que depende das dimensões do transformador. A separação entre a bobina primária e secundária é feita com uma camada de cartolina grossa ou várias camadas de cartolina fina, com espessura proporcional à tensão do enrolamento de alta tensão (Martignoni, 1991).

*Lâminas padronizadas:* em geral o núcleo dos pequenos transformadores é feito com lâminas padronizadas, chamadas de E e I, em virtude de seu formato especial, conforme a Fig. 1.

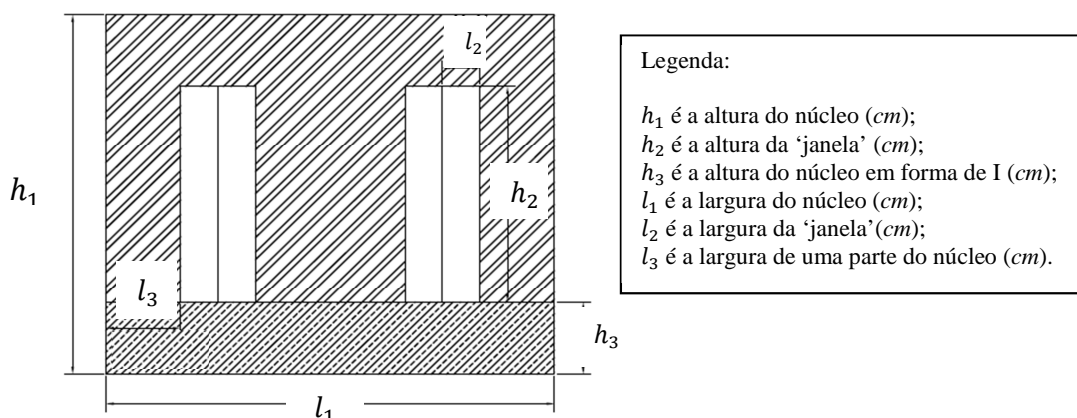


Figura 1: Lâminas E e I dos pequenos transformadores.

Uma grande característica das lâminas dos transformadores é a área da 'janela', pois depende do número de espiras e a seção dos condutores que irão constituir a bobina do transformador.

*Correntes primárias e secundárias:* a corrente secundária é obtida pela relação (Aguiar, 1999):

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A) \quad (1)$$

Onde:  $P_2$  é a potência de saída (VA);  $V_2$  é a tensão de saída (V).

Para se calcular a corrente primária é preciso avaliar a potência primária, o que é feito acrescentando-se à potência secundária 10 % de seu valor a fim de se terem em consideração as perdas, isto é (Martignoni, 1991; Aguiar, 1999),

$$P_1 = 1,1 P_2 \quad (VA) \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} \quad (A) \quad (3)$$

Onde:  $P_1$  é a potência de entrada (VA);  $V_1$  é a tensão de entrada (V).

*Cálculo da área geométrica da 'janela':* o produto da largura ( $l_2$ ) da 'janela' do transformador, pela altura ( $h_2$ ), fornece a área geométrica da 'janela', isto é,

$$S_j = l_2 h_2 \quad (cm^2) \quad (4)$$

*Cálculo da área geométrica do núcleo:* o produto da largura ( $l_1$ ) do núcleo do transformador, pela altura ( $h_3$ ), fornece a área do núcleo com formato de I, isto é,

$$S_1 = 2 l_1 h_3 \quad (cm^2) \quad (5)$$

Conforme a Fig. 1, o produto da largura ( $l_3$ ) de uma parte do núcleo do transformador, pela altura ( $h_2$ ), fornece a área de uma parte do núcleo, isto é,

$$S_2 = 4 l_3 h_2 \quad (cm^2) \quad (6)$$

Então, a área total do núcleo do transformador pode ser escrita como,

$$S_n = S_1 + S_2 \quad (cm^2) \quad (7)$$

*Volume do transformador:* a soma do volume da 'janela', pelo volume do núcleo, fornece o volume total do transformador, isto é,

$$V_j = S_j P_{rof} \quad (cm^3) \quad (8)$$

$$V_n = S_n P_{rof} \quad (cm^3) \quad (9)$$

$$V_t = V_j + V_n \quad (cm^3) \quad (10)$$

onde  $P_{rof}$  é a profundidade do transformador ( $cm$ ).

*Cálculo do número das espiras:* para o cálculo do número das espiras primárias emprega-se a fórmula (Martignoni, 1991; Aguiar, 1999),

$$N_1 = \frac{V_1 10^8}{4,44 B_M S_m f} \quad (e) \quad (11)$$

em que  $N_1$  é o número de espiras ( $e$ ) primárias;  $f$  é a frequência ( $Hz$ );  $B_M$  é indução máximo no ferro (para lâminas de ferro silício, de boa qualidade, com resfriamento natural,  $B_M = 11.300 Gauss$ );  $S_m$  é a seção magnética ( $cm^2$ ).

*Perdas no ferro:* as perdas no núcleo ou no ferro estão relacionadas a passagem de fluxo magnético no núcleo de um transformador. As perdas podem ser divididas em dois tipos: perdas por correntes parasitas e perdas por histerese.

- ❖ *Perdas por Correntes Parasitas:* a passagem de fluxo magnético alternado pelo núcleo de transformador dá origem as forças eletromotrizes, que ocasiona as correntes parasitas. As correntes atravessam as chapas de ferro do núcleo provocando perdas em forma de calor. Podem ser calculadas por (Aguiar, 1999; Godoy, 2010):

$$P_f = 2,2 f^2 B_M^2 d^2 10^{-3} \quad (W) \quad (12)$$

onde  $d$  é a espessura da chapa ( $mm$ ).

- ❖ *Perdas por Histerese:* as perdas por histerese por fase dependem do fluxo magnético no interior do núcleo e da frequência, sendo expressa pela seguinte equação (Aguiar, 1999; Godoy, 2010):

$$P_h = K_s B_M^{1,6} f \quad (W) \quad (13)$$

em que  $K_s$  é a constante que depende do tipo de material usado no núcleo.

- ❖ *Perdas no núcleo:* as perdas no núcleo por fase é obtida adicionando as perdas por correntes de Foucault com as perdas por histerese, isto é (Aguiar, 1999; Godoy, 2010),

$$P_n = P_h + P_f \quad (W) \quad (14)$$

*Perdas no cobre:* para um transformador monofásico, as perdas no cobre são dadas, como é sabido, pela relação (Martignoni, 1991; Aguiar, Camacho, 2011):

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (W) \quad (15)$$

onde  $R_1$  é a resistência primária ( $\Omega$ );  $R_2$  é a resistência secundária ( $\Omega$ );  $I_1$  é a corrente primária (A);  $I_2$  é a corrente secundária (A).

## 2.2. Circuito Equivalente:

No problema linear, duas equações relativas as tensões aplicadas e as correntes resultantes podem ser escritas como (Meeker, 2006):

$$j \omega L_1 I_1 + j \omega M I_2 + R_1 I_1 = V_1 \quad (16)$$

$$j \omega M I_1 + j \omega L_2 I_2 + (R_2 + Z) I_2 = 0 \quad (17)$$

onde  $j\omega$  é igual a 1;  $L_1$  é a indutância primária (H);  $I_1$  é a corrente primária (A);  $M$  é a indutância mútua (H);  $I_2$  é a corrente secundária (A);  $R_1$  é a resistência primária ( $\Omega$ );  $V_1$  é a tensão primária (V);  $L_2$  é a indutância secundária (H);  $R_2$  é a resistência secundária ( $\Omega$ );  $Z$  é a impedância da carga ( $\Omega$ ).

As Eq. (16) e (17) são representadas pelo diagrama do circuito do transformador como mostra a Fig. 2:

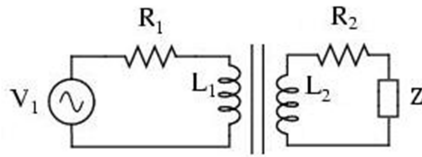


Figura 2. Diagrama do circuito do transformador.

A indutância mútua está relacionada com as auto-indutâncias (Meeker, 2006):

$$\frac{L_1}{N_1^2} \approx \frac{L_2}{N_2^2} \approx \frac{M}{N_1 N_2} \quad (18)$$

onde  $N_1$  é o número de espiras no enrolamento primário ( $e$ );  $N_2$  é o número de espiras no enrolamento secundário ( $e$ ).

A diferença entre essas quantidades dependem da indutância no transformador. A impedância  $Z$  é a impedância de carga ligada ao transformador.

## 3. ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo evolutivo proposto por Storn e Price (1995) para problemas de otimização. 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 (Lobato, 2008). 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 Fig. 3.

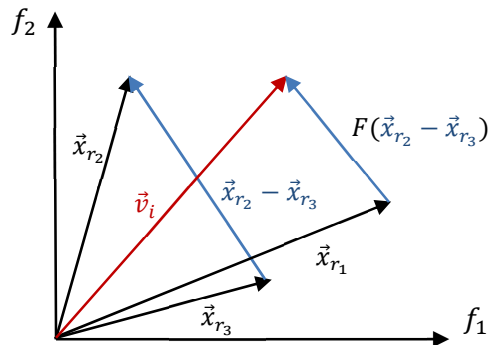


Figura 3: Fundamentação teórica do algoritmo de ED (Lobato, 2008).

O indivíduo gerado através deste esquema ( $\vec{v}_i$ ) é avaliado pela função objetivo e pode inclusive substituir indivíduos mal sucedidos nas gerações seguintes. Desta forma, nenhuma distribuição de probabilidade em separado deve ser usada, o que torna este esquema completamente auto-ajustável.

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 (Babu, Sastry, 1999), síntese e otimização de sistemas integrados de energia aplicados a destilação (Babu, Singh, 2000), estimação de parâmetros cinéticos em processos de fermentação a batelada alimentada (Wang, Jang, 2001), projeto de sistemas de engenharia (Lobato, Steffen, 2007), determinação da difusividade térmica aparente na secagem de frutas (Mariani, 2008), projeto de sistemas de engenharia com enfoque multi-objetivo (Lobato, 2008), estimação de parâmetros térmicos em transferência radiativa (Lobato, 2010), além de outras aplicações (Storn, 2005).

A Evolução Diferencial é eficaz mesmo com uma população pequena, funções descontínuas e não-lineares (Rocha, Saramago, 2011). Além disso, vem sendo utilizada devido a sua simplicidade, rápida convergência e precisão.

As estratégias da ED variam com o tipo de indivíduo a ser modificado na formação do vetor, com o número de indivíduos considerados para a perturbação e com o tipo de cruzamento a ser utilizado, podem ser escritas como: ED/ $a/b/c$  (Rocha, Saramago, 2011). Onde:  $a$  especifica o vetor a ser perturbado, pode ser “*rand*” (vetor da população aleatório) ou “*best*” (vetor de menor custo da população);  $b$  determina o número de diferenças ponderadas usadas para a perturbação de  $a$ ;  $c$  denota o tipo de cruzamento, pode ser “*exp*” (exponencial) ou “*bin*” (binomial). Estas convenções definem dez estratégias diferentes para a evolução diferencial (Malagoli, Lobato, Camacho, Ferreira da Luz, 2014).

Por conseguinte, analisam-se quais as estratégias e qual algoritmo retorna a melhor solução para o problema. Neste trabalho, a melhor estratégia é DE/*rand/1/bin*. E os parâmetros utilizados foram: 25 indivíduos da população, taxa de perturbação de 0.8, probabilidade de cruzamento de 0.8 e o número máximo de iterações é 50. Além disso, um determinado número de gerações é definido para interromper o procedimento.

#### 4. METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, este trabalho consiste na minimização do volume dos materiais para fabricação do transformador 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 de volume ( $V_t$ );
- ❖ As variáveis de projeto são: largura do núcleo ( $l_1$ ), largura da ‘janela’ ( $l_2$ ), altura da ‘janela’ ( $h_2$ ), altura da chapa com formato de I ( $h_3$ ) e profundidade ( $P_{rof}$ );
- ❖ Os parâmetros utilizados pelo algoritmo: 25 indivíduos, 50 iterações, taxa de perturbação e probabilidade de cruzamento igual a 0,8 e estratégia DE/*rand/1/bin* para a geração de potenciais candidatos;
- ❖ Para melhor quantificar a qualidade da solução utilizou-se o vetor de sementes ([0 1 2 3 4 5 6 7 8 9]) para inicialização do gerador randômico;
- ❖ Critério de parada: um determinado número de gerações é definido para interromper o procedimento;
- ❖ Número de execuções: 10 testes executados para obter o melhor resultado;
- ❖ Os resultados obtidos com o algoritmo de ED são comparados com os resultados obtidos pelo algoritmo genético (AG).

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo considera a Eq. (10) como a função objetivo do problema estudado. A função objetivo é minimizar o volume do equipamento. A Tabela 1 apresenta as variáveis, os parâmetros e os limites do vetor para minimizar o volume do equipamento. Utilizou-se o algoritmo de evolução diferencial e o algoritmo genético para comparar os resultados.

**Tabela 1: Variáveis, Parâmetros e limites.**

Variáveis	Parâmetros	Limites	
		Mínimo	Máximo
x(1)	Largura do núcleo (cm)	9.50	12.50
x(2)	Largura da ‘janela’ (cm)	0.70	1.25
x(3)	Altura da ‘janela’ (cm)	4.50	6.50
x(4)	Altura da chapa com formato de I (cm)	1.35	2.50
x(5)	Profundidade (cm)	3.75	5.00

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com o algoritmo ED para diferentes sementes.

**Tabela 2: Resultados obtidos para o estudo de caso (Função Objetivo - FO) utilizando ED.**

Sementes	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)	x(5)	FO
0	9,5000	0,7927	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
1	9,5000	1,2500	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
2	9,5000	1,2499	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
3	9,5000	0,7258	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
4	9,5000	1,0722	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
5	9,5000	0,7452	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
6	9,5000	0,9373	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
7	9,5000	0,9499	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
<b>8</b>	<b>9,5000</b>	<b>0,7000</b>	<b>4,5000</b>	<b>1,3500</b>	<b>3,7500</b>	<b><math>2,565 \times 10^{-4}</math></b>
9	9,5000	1,2500	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
Média	9,5000	0,9673	4,5000	1,3500	3,7500	$2,565 \times 10^{-4}$
Desvio Padrão	0,0000	0,2148	0,0000	0,0000	0,0000	$0,000 \times 10^{-4}$

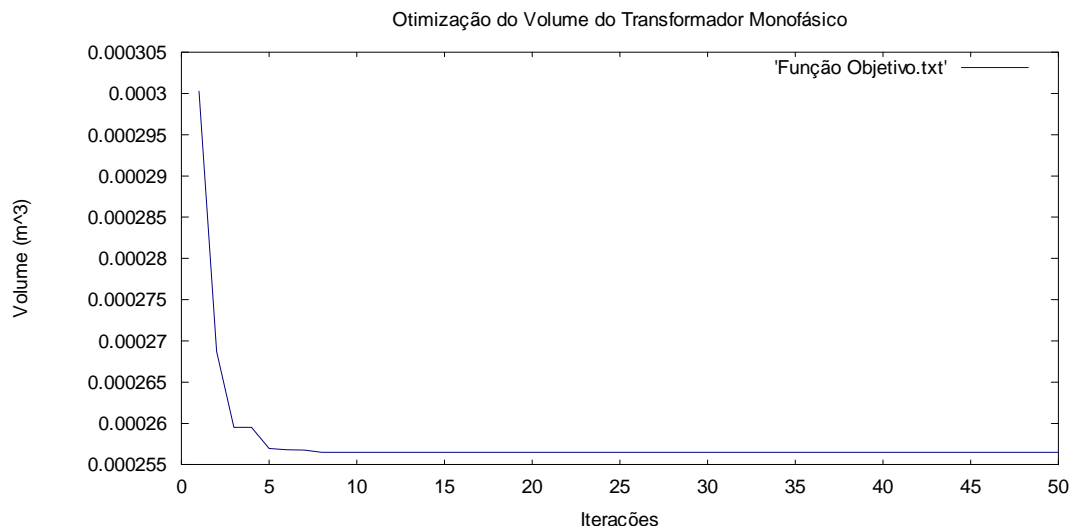
A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com o algoritmo genético para sementes aleatórias e foram realizadas 10 execuções do algoritmo.

**Tabela 3: Resultados obtidos para o estudo de caso (Função Objetivo - FO) utilizando AG.**

Testes	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)	x(5)	FO
0	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
1	9,5000	1,0480	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5649 \times 10^{-4}$
2	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
3	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
4	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
5	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
6	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
7	9,5000	0,9250	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5649 \times 10^{-4}$
<b>8</b>	<b>9,5000</b>	<b>0,7000</b>	<b>4,5000</b>	<b>1,3500</b>	<b>3,7500</b>	<b><math>2,5650 \times 10^{-4}</math></b>
9	9,5000	0,7000	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5650 \times 10^{-4}$
Média	9,5000	0,7573	4,5000	1,3500	3,7500	$2,5649 \times 10^{-4}$
Desvio Padrão	0,0000	0,1178	0,0000	0,0000	0,0000	$0,8944 \times 10^{-8}$

Observam-se nas Tab. 2 e 3, os resultados dos algoritmos ED e AG foram praticamente iguais, como esperado. De modo geral, o estudo de caso é bem simples, com uma função mono-objetivo e sem restrição. É importante destacar que, neste caso, o desvio padrão do algoritmo de evolução diferencial é menor do que o algoritmo genético.

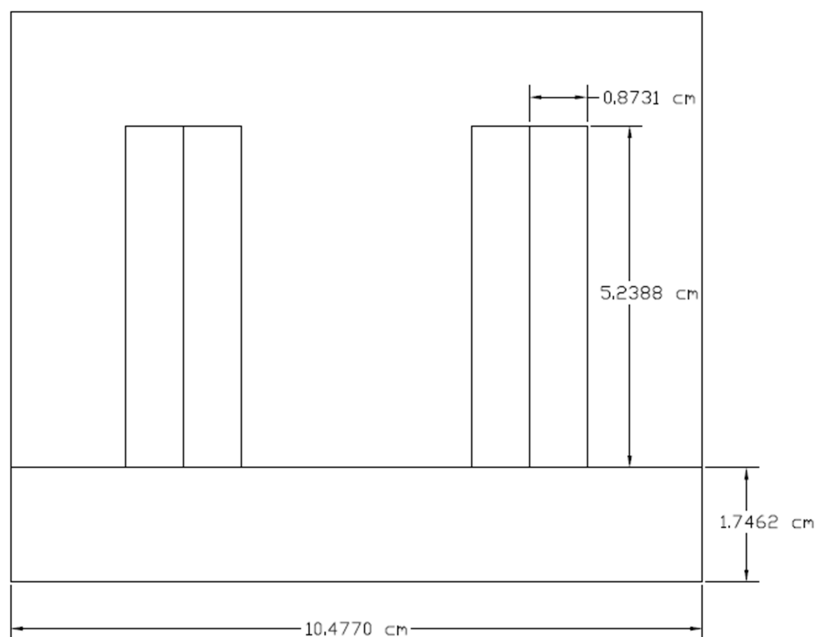
A Figura 4 apresenta o perfil do volume obtido pelo Algoritmo de Evolução Diferencial. A função objetivo é minimizada, ou seja, o volume é mínimo.



**Figura 4: Resultado do volume minimizado pelo algoritmo de evolução diferencial.**

Observa-se na Fig. 4, que a execução do algoritmo de evolução diferencial foi capaz de obter resultados satisfatórios com rápida convergência para minimizar o volume do transformador monofásico. Nota-se a importância de testar as dez estratégias para comparar os resultados obtidos, pois uma estratégia pode ser boa para um problema e ruim para outro problema.

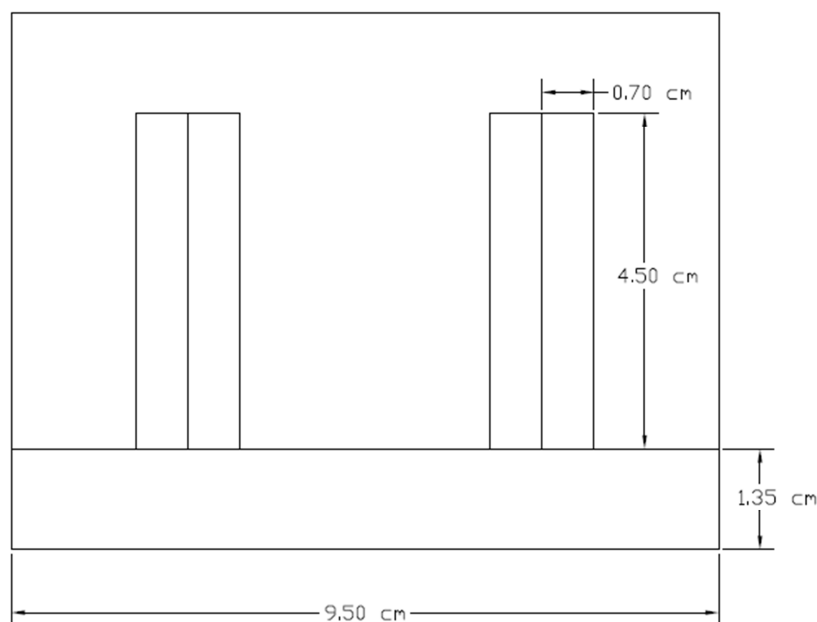
A Figura 5 apresenta o desenho da chapa do transformador antes da otimização. Utilizou-se o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para modelar o transformador monofásico.



**Figura 5: Desenho vista frontal do transformador do projeto convencional (antes da otimização).**

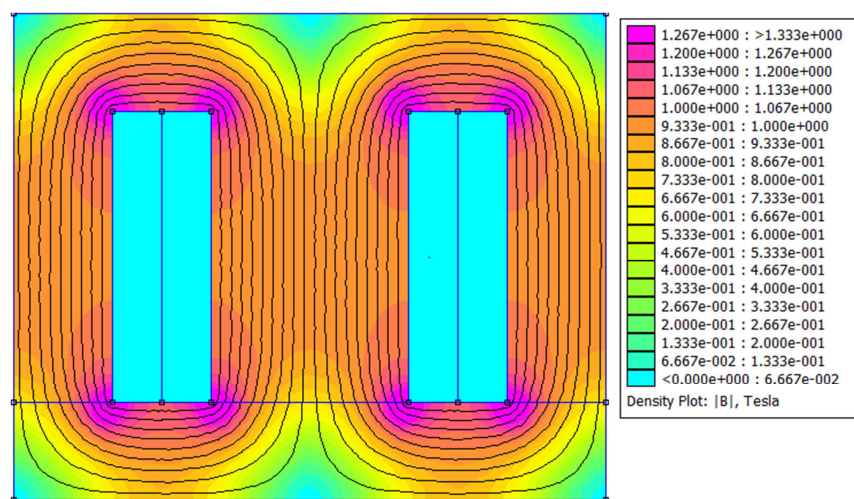
A Figura 6 apresenta o desenho da chapa do transformador depois da otimização. Utilizou-se o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) para modelar o transformador monofásico.



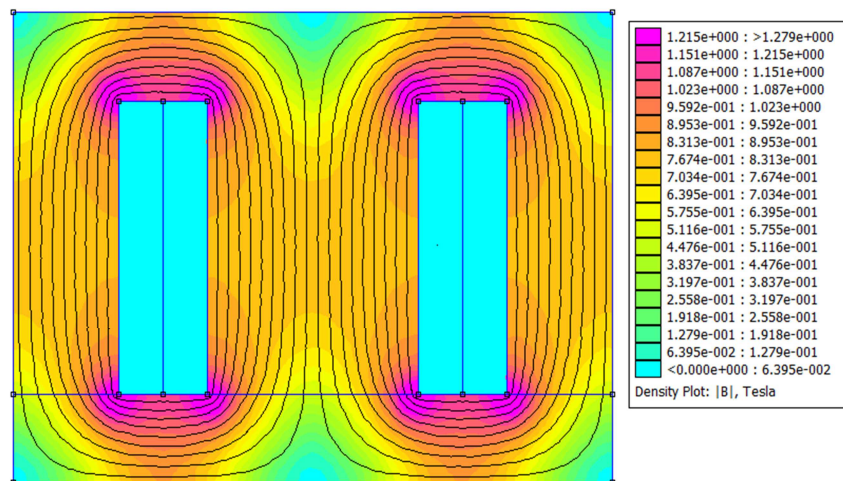


**Figura 6: Desenho vista frontal do transformador do projeto ótimo (depois da otimização).**

Utilizou-se o *software* FEMM para analisar o transformador através do método de elementos finitos. As Figuras 7 e 8 mostram as densidades de fluxo antes e após a otimização do transformador monofásico, respectivamente.



**Figura 7: Densidade de fluxo no transformador do projeto convencional.**



**Figura 8: Densidade de fluxo no transformador do projeto ótimo.**



Nota-se nas Fig. 7 e 8, o valor da densidade de fluxo no meio do núcleo do transformador monofásico é reduzido comparado com o valor da densidade obtido a partir da concepção inicial. Todavia, esse valor ficou abaixo do valor de saturação do ferro. Além disso, uma vez que os pesos de cobre e ferro são reduzidos, o custo do motor a partir da abordagem de otimização irá ser inferior quando comparado com o motor com abordagem inicial.

A Tabela 4 apresenta as comparações dos projetos convencional e ótimo ED dos principais parâmetros do transformador monofásico. Os dados do projeto convencional são resultados do cálculo analítico do transformador e utilizou-se um transformador monofásico de potência de saída de 14,40 (VA), tensão de entrada de 120 (V), tensão de saída de 40 (V) e frequência de 60 (Hz). Os principais parâmetros são: largura do núcleo, largura da 'janela', altura da 'janela', altura da chapa com formato de I, profundidade, densidade de fluxo no meio do núcleo, perdas no núcleo, perdas no cobre, volume do núcleo, volume do cobre e volume do transformador, respectivamente, como mostrado nesta tabela.

**Tabela 4: Parâmetros antes e depois da otimização.**

Parâmetros do Transformador	Projeto Convencional	Projeto Ótimo ED
Largura do núcleo	10,4770 (cm)	9,5000 (cm)
Largura da 'janela'	0,8732 (cm)	0,7000 (cm)
Altura da 'janela'	5,2388 (cm)	4,5000 (cm)
Altura da chapa com formato de I	1,7462 (cm)	1,3500 (cm)
Profundidade	4,1275 (cm)	3,7500 (cm)
Densidade de fluxo no meio do núcleo	0,9800 (T)	0,7900 (T)
Perdas no núcleo	1,7800 (W)	0,9500 (W)
Perdas no cobre	0,0009925 (W)	0,0006752 (W)
Volume do núcleo	0,0003020 ( $m^3$ )	0,0002090 ( $m^3$ )
Volume do cobre	0,0000755 ( $m^3$ )	0,0000472 ( $m^3$ )
Volume do transformador	0,0003770 ( $m^3$ )	0,0002560 ( $m^3$ )

É muito claro a partir da Tab. 4 que as dimensões do transformador são reduzidas, quando comparado os valores iniciais do projeto convencional. A densidade de fluxo no meio do núcleo diminuiu. Os valores das perdas no núcleo e no cobre também reduziram. Uma vez que, o peso do ferro e cobre no transformador são menores em comparação com o projeto convencional, a perda total é reduzida. Além disso, uma vez que os pesos de cobre e ferro são reduzidos, o custo do transformador a partir da abordagem de otimização será inferior quando comparado com o transformador com a abordagem inicial.

Pode-se concluir que, após a minimização da função objetivo, o volume do transformador monofásico de 0,0003770 ( $m^3$ ) passou a ser 0,0002560 ( $m^3$ ), ou seja, houve uma redução de 32,09 (%). Além disso, constata-se que, para o estudo de caso analisado, a escolha da semente inicial no algoritmo de evolução diferencial pouco influencia o valor da função objetivo.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou o projeto de um transformador monofásico utilizando o Algoritmo de Evolução Diferencial. Foi analisado o volume original e otimizado. A partir da análise dos resultados obtidos observa-se que o algoritmo de evolução diferencial foi capaz de minimizar o volume através da determinação do vetor de variáveis geométricas que caracterizam 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 de máquinas elétricas para minimizar custos e maximizar eficiência.

## 7. AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, A. L. 1999. *Roteiro de Cálculo das Máquinas Elétricas*. Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG, Brasil.
- Aguiar, A. L., Camacho, J. R. 2011. *Transformadores de Potência*. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG, Brasil.
- Babu, B. V., Sastry, K. K. N. 1999. *Estimation of Heat-transfer Parameters in a Tricklebed Reactor using Differential Evolution and Orthogonal Collocation*. Computers and Chemical Engineering, Vol. 23, pp. 327-339.
- Babu, B. V., Singh, R. P. 2000. *Synthesis and Optimization of Heat Integrated Distillation Systems Using Differential Evolution*, in Proceedings of the All-India Seminar on Chemical Engineering Progress on Resource Development.
- Godoy, M. V. 2010. *Transformadores de Potência*. Universidade de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica, Vol. 1, (pp. 1-26), Recife-PE, Brasil.
- Lobato, F. S. 2008. *Multi-objective Optimization to Engineering System Design*. Tese, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- Lobato, F. S., Steffen Jr., V., Arruda, E. B., Barrozo, M. A. S. 2008. *Estimation of Drying Parameters in Rotary Dryers using Differential Evolution*, Journal of Physics: Conference Series, Vol.135.
- Lobato, F. S., Steffen Jr., V. 2007. *Engineering System Design with Multi-Objective Differential Evolution*, in Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering.
- Lobato, F. S., Steffen Jr., V., Neto, A. J. S. 2010. *Estimation of Space-Dependent Single Scattering Albedo*, in Radiative Transfer Problems, Inverse Problems, Design and Optimization Symposium.
- Malagoli, J. A., Camacho, J. R., Ferreira da Luz, M. V. 2014. *Projeto de Rotor de Máquina de Indução Trifásica Usando o Algoritmo de Evolução Diferencial*. Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Vol. 1, (pp. 1-6), Curitiba-PR, Brasil.
- Malagoli, J. A., Lobato, F. S., Camacho, J. R., Ferreira da Luz, M. V. 2014. *Projeto de Estator de Máquina de Indução Trifásica Usando o Algoritmo de Evolução Diferencial*. Simpósio de Mecânica Computacional e Encontro Mineiro de Modelagem Computacional, Vol. 1, (pp. 1-13), Juiz de Fora-MG, Brasil.
- Mariani, V. C., Lima, A. G. B., Coello, L. S. C. 2008. *Apparent Thermal Diffusivity Estimation of the Banana during Drying using Inverse Method*. Journal of Food Engineering, Vol. 85, pp. 569-579.
- Martignoni, A. 1991. *Transformadores*. 8ª Edição, Editora Globo, São Paulo-SP, Brasil.
- Meeker, D. 2006. *Determination of Transformer Operationa Point*. Example of FEMM.
- Rocha, N. C., Saramago, S. F. P. 2011. *Estudo de Algumas Estratégias de Evolução Diferencial*. Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, CMAC Sudeste.
- Storn, R., Price, K. 1995. *Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces*. International Computer Science Institute, Vol.12, pp. 1-16.
- Storn, R., Price, K., Lampinen, J. A. 2005. *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Springer: Natural Computing Series.
- Wang, F. S., Su, T. L., Jang, H. J. 2001. *Hybrid Differential Evolution for Problems of Kinetic Parameter Estimation and Dynamic Optimization of an Ethanol Fermentation Process*. Industry Engineering Chemical Research, Vol. 40, pp. 2876-2885.

## RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

## SINGLE PHASE TRANSFORMER DESIGN USING DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

Juliana Almansa Malagoli, [juliana.malagoni@gmail.com](mailto:juliana.malagoni@gmail.com)<sup>1</sup>  
Fran Sérgio Lobato, [fslobato@feq.ufu.br](mailto:fslobato@feq.ufu.br)<sup>2</sup>  
José Roberto Camacho, [jrcamacho@ufu.br](mailto:jrcamacho@ufu.br)<sup>1</sup>  
Mauricio Valencia Ferreira da Luz, [mauricio.luz@ufsc.br](mailto:mauricio.luz@ufsc.br)<sup>3</sup>  
Jacson Hudson Inácio Ferreira, [Jacson@iftm.edu.br](mailto:Jacson@iftm.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Uberlândia – Faculty of Electrical Engineering.  
Av.: João Naves de Ávila, nº 2121, Bairro: Santa Mônica, CEP: 38.408-100, Uberlândia-MG, Brazil.

<sup>2</sup>Federal University of Uberlândia – Faculty of Chemical Engineering.  
Av.: João Naves de Ávila, nº 2121, Bairro: Santa Mônica, CEP: 38.408-100, Uberlândia-MG, Brazil.

<sup>3</sup>Federal University of Santa Catarina – Department of Electrical Engineering.  
Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, Bairro: Trindade, CEP: 88.040-970, Florianópolis-SC, Brazil.

**Abstract.** Nowadays, the engineering systems design is configured as an interesting topic of research due to the numerous applications that can be found in different areas of engineering. In this scenario, single phase transformers are devices fundamental to the operation of power systems and can be considered as the type of electric machine responsible by performing the transformation of energy electrical, providing a reduction or increase of alternating voltage. In this contribution, the single phase transformer design through the volume minimization is considered. For this purpose, the Differential Evolution Algorithm is used as optimization tool. The results show that methodology proposed is configured as interesting strategy to the engineering system design.

**Keywords:** Differential Evolution, Optimization, Single Phase Transformer.