

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

OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO APLICADO AO PROJETO DE UM ESTATOR DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Juliana Almansa Malagoli, juliana.malagoli@gmail.com¹

Fran Sérgio Lobato, fslobato@feq.ufu.br²

José Roberto Camacho, jrcamacho@ufu.br¹

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, mauricio.luz@ufsc.br³

Jacson Hudson Inácio Ferreira, Jacson@iftm.edu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica.

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

²Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química.

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

³Universidade 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: O projeto de sistemas de engenharia configura-se como um problema multi-objetivo. Este por sua vez, é inerentemente conflitante, isto é, a melhora em um dos objetivos acarreta piora no outro. Dentre as inúmeras aplicações que podem ser encontradas na literatura, o projeto de estator, componente que faz parte do motor e cuja função base é conduzir o fluxo magnético, configura-se como um interessante tema de pesquisa, já que está diretamente relacionado aos custos de fabricação de motores. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo a formulação e a resolução de um estator de motor de indução trifásico considerando como objetivos a minimização do volume do estator e a maximização da eficiência via determinação do vetor de variáveis geométricas que caracterizam o modelo matemático apresentado. Para essa finalidade é utilizado o algoritmo MODE (Multi-objective Optimization Differential Evolution). Os resultados obtidos com o algoritmo MODE são confrontados com os aqueles obtidos pelo algoritmo NSGA II (Non-dominate Sorting Genetic Algorithm).

Palavras-chave: Projeto de Máquinas de Indução, Otimização Multi-objetivo, Evolução Diferencial.

1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos consomem mais da metade da energia elétrica produzida por estações de energia, quase três-quartos do consumo de energia em indústria e quase a metade do consumo comercial em países de desenvolvidos (Agarwal, 2000). Assim, os motores constituem os principais alvos para alcançar a economia de energia. Devido à sua construção simples e robusta, os motores assíncronos representam cerca de 93 (%) da energia elétrica consumida pelos motores elétricos, o qual é equivalente a cerca de 53 (%) do total do consumo de energia (Mittle et al., 2009). Por isso, é muito desejado por fabricantes e usuários otimizar o projeto para a melhoria da eficiência energética e reduzir o custo dos materiais ativos (ferro e cobre) do motor (Malagoli et al., 2014). A eficiência de um motor pode ser otimizada, reduzindo o volume do motor (reduzindo peso dos materiais), que podem ser obtidos pela redução do diâmetro e comprimento do motor.

O presente trabalho avalia o desempenho do algoritmo de evolução diferencial aplicado na minimização do volume e maximização da eficiência energética de um motor de indução trifásico. A seção 2 apresenta uma breve descrição e caracterização do projeto do estator dos motores de indução; 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 DO ESTATOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O estator é a parte estacionária do exterior do motor, que consiste (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009):

- ❖ A estrutura cilíndrica externa do motor é feita de chapa de aço soldada, ou de ferro fundido ou de liga de alumínio fundido;
- ❖ O núcleo magnético do estator é laminado para reduzir correntes de Foucault, reduzindo as perdas e o aquecimento;
- ❖ Um conjunto de enrolamentos elétricos isolados é colocado no interior das ranhuras do estator laminado. A área da seção transversal destes enrolamentos deve ser grande suficiente para a passagem de corrente que forneça a potência do motor. Para um motor trifásico, são necessários três conjuntos de enrolamentos, uma para cada fase conectada em estrela ou triângulo.

Equação de Saída: é a expressão matemática que dá a relação entre os vários parâmetros físicos e elétricos da máquina elétrica. A equação de saída refere a saída do motor de indução com as principais dimensões do estator e representa a ferramenta básica para iniciar o desenho. A saída do motor de indução trifásico é dada por (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$Q = C D^2 L N \quad (kW) \quad (1)$$

Onde: D é o diâmetro interno do estator em (m); L é o comprimento da máquina (m); N é a velocidade (r.p.m); C é o coeficiente de saída representado por:

$$C = 18,3 \cdot 10^{-5} k_{ws} B_{av} ac \eta \cos \varphi \quad (2)$$

Onde: k_{ws} é o fator de enrolamento do estator; η é a eficiência (%); $\cos \varphi$ é o fator de potência; ac é a carga elétrica específica (A/m); B_{av} é valor médio da carga magnética (T).

Na Eq. (1), D e L são as principais dimensões da máquina.

Separação do D e L : a equação de saída dá a relação entre o produto $D^2 L$ e a saída da máquina. Para separar D e L para este produto uma relação tem de ser assumida ou estabelecida. A seguir estão as variáveis de projeto com base em considerações em que uma razão adequada entre o comprimento bruto e passo-pólo pode ser assumida.

- ❖ Para obter o mínimo dos custos de 1,5 – 2,0;
- ❖ Para obter uma boa eficiência de 1,4 – 1,6;
- ❖ Para obter um bom projeto 1,0 – 1,1;
- ❖ Para obter um bom fator de potência 1,0 – 1,3.

Como o fator de potência tem um papel importante no desempenho de motores de indução trifásicos é aconselhável projetar um motor de indução com melhor fator de potência a menos que seja especificado no projeto. Assim, para obter o melhor fator de potência a seguinte relação normalmente será assumida para a separação de D e L (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009).

$$D = 0,135 P \sqrt{L} \quad (m) \quad (3)$$

Onde: P é o número de pólos;

E o passo-pólo é,

$$\tau_p = \frac{\pi D}{P} \quad (m) \quad (4)$$

Usando relação anterior D e L podem ser separados a partir do produto $D^2 L$. No entanto, os valores obtidos de D e L devem satisfazer a condição imposta sobre o valor da velocidade periférica.

Seção transversal do condutor: a área de seção dos condutores do estator pode ser estimada a partir da corrente do estator por fase e valor adequadamente assumido de densidade de corrente para os enrolamentos do estator (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009). A área de seção do condutor do estator é,

$$A_s = I_s / J_s \quad (mm^2) \quad (5)$$

Onde: J_s é a densidade de corrente no enrolamento do estator (A/mm²); e a corrente do estator por fase é $I_s = Q / (3V_{ph} \cos \varphi)$ em (A).

Tamanho da ranhura do estator: normalmente, os diferentes tipos de ranhuras são empregados para a inserção de enrolamentos do estator dos motores de indução. Geralmente, os enrolamentos de dupla camada são utilizados para o estator. Estes condutores são devidamente dispostos ao longo da profundidade e da largura do enrolamento (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009). Ranhuras do estator não devem ser muito grande, principalmente com largura do dente fina, o que torna o dente mecanicamente fraco e a densidade máxima de fluxo não pode ser superior ao

limite permitido. Como orientação, a razão da profundidade com a largura da ranhura pode assumir-se um valor entre 3 a 5.

Comprimento médio da volta: é calculado utilizando uma fórmula empírica (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$L_{mt} = 2L + 2,3\tau_p + 0,24 \quad (m) \quad (6)$$

Resistência do enrolamento do estator: a resistência do enrolamento por fase do estator é calculado usando a fórmula (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$r_s = \frac{(0,021 L_{mt} T_{ph})}{A_s} \quad (\Omega) \quad (7)$$

Onde: T_{ph} é o número de condutores por ranhura.

Usando a resistência do enrolamento do estator calculada, as perdas de cobre pode ser calculada como:

$$P_{cu} = 3 (I_s^2) r_s \quad (W) \quad (8)$$

Volume do estator: o volume total do estator é igual a soma do volume de cobre, de ferro e de isolamento. O isolamento é entre 15% a 20% do volume total de ferro e cobre do estator (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009).

❖ Volume de cobre:

$$Vol_{Cu} = 3 A_s L_{mt} N_{ph} \quad (m^3) \quad (9)$$

Onde: N_{ph} é o número de voltas por fase.

❖ Volume de ferro: é a soma dos volumes de ferro nos dentes e na coroa do estator:

$$Vol_{Dente} = S_s d_{cs} b'_t L_i \quad (m^3) \quad (10)$$

$$Vol_{Coroa} = \frac{\pi}{4} [D_o^2 - (D_o - 2d_{cs})^2] L_i \quad (m^3) \quad (11)$$

Onde: S_s é o número de ranhuras no estator; d_{cs} é a profundidade do núcleo (m); b'_t é a largura dos dentes (m); L_i é o comprimento real de ferro (m); D_o é diâmetro externo do estator (m).

❖ Volume do isolamento:

$$Vol_{isolamento} = 0,15 (Vol_{Cu} + Vol_{Dente} + Vol_{Coroa}) \quad (m^3) \quad (12)$$

❖ Volume total do estator:

$$Vol_{Estator} = Vol_{Cu} + Vol_{Dente} + Vol_{Coroa} + Vol_{Isolamento} \quad (m^3) \quad (13)$$

Perdas no ferro do estator: é a soma das perdas no ferro na coroa e nos dentes do estator (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$Perda_{iy} = P_{iy} B_{Fe} Vol_{Coroa} \quad (W) \quad (14)$$

$$Perda_{it} = P_{it} B_{Fe} Vol_{Dente} \quad (W) \quad (15)$$

Onde: $Perda_{iy}$ é a perda no ferro na coroa (W); P_{iy} é a perda específica na coroa (W/Kg); B_{Fe} é a densidade de ferro (Kg/m³); Vol_{Coroa} é o volume da coroa do estator (m³); $Perda_{it}$ é a perda no ferro nos dentes (W); P_{it} é a perda específica os dentes (W/Kg); Vol_{Dente} é o volume no dente do estator (m³).

Perdas no cobre do rotor: o comprimento médio de voltas do rotor pode ser calculado a partir da fórmula empírica (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009).

$$l_{mtr} = 2 L + 2,3 \tau_{pr} + 0,08 \quad (m) \quad (16)$$

Onde: τ_p é o passo-pólo do rotor (m).

A resistência do enrolamento do rotor é dada por,

$$R_r = (0,021 l_{mtr} T_r)/A_r \quad (\Omega) \quad (17)$$

Onde: T_r é o número de voltas do enrolamento do rotor; A_r é a área do condutor do rotor (mm^2).
Perda total no cobre no rotor é,

$$P_{cur} = 3 I_r^2 R_r \quad (W) \quad (18)$$

Onde: I_r é a corrente no rotor (A).

Perda total no motor: é a soma das perdas no cobre e no ferro no estator e rotor (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$Perda_{Total} = P_{cu} + P_{cur} + 2 (Perda_{iy} + Perda_{it}) \quad (W) \quad (19)$$

Eficiência energética: pode ser calculada como (Agarwal, 2000; Upadhyay, 2008; Mittle et al., 2009),

$$\eta = \frac{Q}{Q + Perda_{Total}} \quad (\%) \quad (20)$$

3. OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

3.1 Otimização Multi-objetivo

Devido ao sucesso obtido pela Evolução Diferencial (ED) em diferentes aplicações em ciências e engenharia, podem ser encontradas na literatura, várias tentativas que estenderam a ED para resolver problemas com vários objetivos. Neste trabalho, é utilizado o MODE (*Multi-objective Optimization Differential Evolution*) algoritmo proposto por (Lobato, 2008). Esta abordagem baseia-se no algoritmo de ED e tem a seguinte estrutura: uma população inicial de tamanho NP é gerada aleatoriamente. Todas as soluções dominadas são removidas da população através do operador rápido classificado não-dominado. Deste modo, a população é classificada em curvas não-dominadas f_j (conjuntos de vetores que não são dominados com respeito um ao outro). Este procedimento é repetido até que cada vetor é membro de uma curva. Três pais são selecionados aleatoriamente na população. Uma criança é gerada a partir dos três pais (este processo continua até que as crianças NP são geradas). A partir da população P_i de tamanho $2NP$, vizinhos são gerados para cada um dos indivíduos da população, da seguinte maneira (Hu et al., 2005):

$$X(x) = \left[x - \frac{D_k(g)}{2}, x + \frac{D_k(g)}{2} \right] \quad (21)$$

Onde:

$$D_k(g) = k/R [U - L] \quad (22)$$

$D_k(g)$ é um vetor e uma função de geração do contador g . R é o número de pseudo-curvas definido pelo usuário e o tamanho máximo de vizinhança numa população inicial é $D_k(0) = [U - L]$, onde L e U representam os limites inferiores e superiores das variáveis. O número pré-definido de indivíduos em cada uma das pseudo-curvas é dada por (Hu et al., 2005):

$$n_k = r n_{k-1}, k = 2, \dots, R \quad (23)$$

Onde: n_k é número de indivíduos da k -ésima curva; r é a taxa de redução. Para uma dada população com N indivíduos, n_k é dado por:

$$n_k = N \frac{1 - r}{1 - r^R} r^{k-1} \quad (24)$$

Para $r < 1$, o número de indivíduos na primeira pseudo-curva é alto. Pode-se observar na Eq. (24), o número de indivíduos vai diminuindo exponencialmente, o que enfatiza a busca local. Já para um valor maior de r , existem mais soluções na última pseudo-curva, o que enfatiza a busca global (Hu et al., 2005).

Dessa forma, os vizinhos gerados são classificados de acordo com o critério de dominância e apenas os vizinhos não-dominados (P_2) será colocado junto com (P_1) para formar (P_3). A população (P_3) é, então, classificada de acordo com o critério de dominância. Se o número de indivíduos da população (P_3) é maior do que um número definido pelo usuário é truncado de acordo com o critério chamado de distância aglomerada (Deb, 2001). A distância aglomerada descreve a densidade de soluções em torno de um vetor. Para a distância aglomerada para um conjunto de membros da população dos vetores são classificadas de acordo com seu valor da função objetivo para cada função objetivo. Os

vetores com os menores ou maiores valores de uma distância infinita aglomerada são atribuídos. Para todos os outros vetores da distância aglomerada é calculada de acordo com:

$$dist_{x_i} = \sum_{j=0}^{m-1} \frac{f_{j,i+1} - f_{j,i-1}}{|f_{j,max} - f_{j,min}|} \quad (25)$$

Onde: f_j corresponde à função objetivo e m é igual ao número de funções objetivo.

3.2 Evolução Diferencial

Evolução Diferencial (DE), proposto por Price e Storn (1997), é uma versão melhorada do Algoritmo Genético de Goldberg (Goldberg, 1989) para otimização mais rápida e apresenta as seguintes vantagens: estrutura simples, facilidade de uso, velocidade e robustez (Storn et al., 2005). A ideia fundamental por trás da ED é um esquema para gerar vetores de parâmetros de avaliação. Basicamente, ED adiciona a diferença ponderada entre dois vetores da população a um terceiro vetor. Os principais parâmetros de controle em DE são: tamanho da população (NP), a probabilidade de cruzamento (CR), e o peso aplicado ao diferencial aleatório (F). Price e Storn (1997) deram algumas regras simples para escolher os principais parâmetros da ED para qualquer aplicação. Normalmente, NP deve ser de cerca de 5 a 10 vezes a dimensão (número de parâmetros em um vetor) do problema. Tal como para o F , que se encontra no intervalo de 0,4 a 2,0. Inicialmente $F = 0.5$ pode ser julgado, em seguida, F e/ou NP é aumentada se a população converge prematuramente.

Na literatura, pode-se encontrar inúmeras aplicações do algoritmo de ED em áreas distintas da ciência, dentre as quais pode-se citar: projeto de sistemas de engenharia (Lobato, 2008), projeto de sistemas de engenharia com enfoque multi-objetivo (Lobato et al., 2007), estimação de parâmetros térmicos em transferência radiativa (Babu et al., 1999), procedimento de projeto de motor *brushless* de otimização baseado em algoritmos genéticos (Bianchi et al., 1997), otimização do projeto de motores elétricos por algoritmos genéticos (Bianchi et al., 1998), considerações sobre projeto de ranhura tolerante a falhas em motores síncronos (Bianchi et al., 2005), um estudo de algoritmos evolutivos de otimização multi-objetivo para o projeto do motor de indução (Yasodha et al., 2012), um estudo do projeto de motor de relutância comutado usando otimização por enxame de partículas (Phuangmalai et al., 2013), projeto e otimização de motor de indução trifásico utilizando algoritmo genético (Raghuram et al., 2013), além de outras aplicações (Storn et al., 2005).

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho consiste nas seguintes etapas:

- ❖ Os objetivos considerados são: minimização da função volume do estator ($Vol_Estator$) e maximização da eficiência energética do motor (η);
- ❖ As variáveis de projeto são: (ac) carga elétrica específica (A/m), (B_{av}) valor médio da carga magnética (T), (J_s) densidade de corrente no enrolamento do estator (A/mm^2), (J_r) densidade de corrente no enrolamento do rotor (A/mm^2), (L/τ_p) comprimento por passo-pólo do estator, (h_s) altura da ranhura do estator (mm), (h_{sr}) altura da ranhura do rotor (mm), (b_{ts1}) largura do dente do estator (mm), (b_{tr1}) largura do dente do rotor (mm), (b_s) largura da ranhura do estator (mm);
- ❖ Os parâmetros utilizados pelo algoritmo MODE: 50 indivíduos, 100 gerações, taxa de perturbação e probabilidade de cruzamento igual a 0,9 e estratégia $DE/rand/1/bin$ para a geração de potenciais candidatos, a taxa de redução e o número do pseudo-curvas é igual a 0,9 e 10, respectivamente;
- ❖ Critério de parada: um determinado número de gerações é definido para interromper o processo;
- ❖ Os parâmetros das variáveis de projeto foram obtidos através de tentativa e erro. Além disso, executaram-se os algoritmos 10 vezes para obter os melhores resultados das curvas de Pareto.

Para utilizar a metodologia proposta acima, usou-se um motor de indução trifásico de 28 (Kw), 410 (V), 60 (Hz), 8 pólos e 900 ($r.p.m$). A Tabela 1 mostra os resultados das variáveis de projeto e das funções objetivo, as equações foram baseadas no projeto de motor de indução trifásico.

Tabela 1. Resultado do cálculo analítico das variáveis de projeto.

Parâmetros	Cálculo Analítico	Parâmetros	Cálculo Analítico
ac	25000,00 (A/m)	h_{sr}	18,68 (mm)
B_{av}	0,45 (T)	b_{ts1}	13,15 (mm)
J_s	3,50 (A/mm^2)	b_{tr1}	17,67 (mm)
J_r	3,50 (A/mm^2)	b_s	10,54 (mm)
L/τ_p	1,60	$Vol_Estator$	0,014449 (m^3)
h_s	29,85 (mm)	η	87,12 (%)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estudo considera as Eq. (13) e (20) como as funções objetivo do problema estudado. As funções objetivo são minimizar o volume e maximizar a eficiência energética. A fim de avaliar a metodologia proposta neste trabalho, um caso de teste é apresentado: (i) minimizar a função volume e maximizar a função eficiência (analisa-se os pontos A, B, C, D e E nas curvas de Pareto). A seguir, apresentam-se as funções objetivo (FO) e os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto,

$$FO = \begin{cases} \min f_1 = Vol_{Cu} + Vol_{Dente} + Vol_{Coroa} + Vol_{Isolamento} \\ \max f_2 = \frac{Q}{Q + Perda_{Total}} \end{cases}$$

$$Variáveis = \begin{cases} 10000 \leq x(1) \leq 30000 \\ 0,30 \leq x(2) \leq 0,60 \\ 3,0 \leq x(3) \leq 6,0 \\ 3,0 \leq x(4) \leq 60 \\ 0,90 \leq x(5) \leq 2,0 \\ 15 \leq x(6) \leq 45 \\ 10 \leq x(7) \leq 25 \\ 5 \leq x(8) \leq 15 \\ 10 \leq x(9) \leq 25 \\ 5 \leq x(10) \leq 15 \end{cases}$$

As Tabelas 2 e 3 apresentam alguns pontos da curva de Pareto (ver Fig. 2(a)) obtidos pelo algoritmo MODE para o caso de teste estudado.

Tabela 2. Resultados obtidos pelo algoritmo MODE das variáveis de projeto $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ e $x(6)$, respectivamente.

Pontos	ac (A/m)	B_{av} (T)	J_s (A/mm ²)	J_r (A/mm ²)	L/τ_p	h_s (mm)
A	29959,03	0,5916	5,9908	3,1032	1,5423	15,1050
B	29851,02	0,5974	3,3314	3,0147	1,9626	15,5472
C	29764,21	0,5980	3,6171	3,0248	1,8550	15,4148
D	29752,54	0,5922	3,4631	3,0045	1,9629	16,0285
E	29789,25	0,5987	4,1390	3,0267	1,8666	15,2027

Tabela 3. Resultados obtidos pelo algoritmo MODE das variáveis de projeto $x(7)$, $x(8)$, $x(9)$, $x(10)$, $f(1)$ e $f(2)$, respectivamente.

Pontos	h_{sr} (mm)	b_{ts1} (mm)	b_{tr1} (mm)	b_s (mm)	$Vol_{Estator}$ (m ³)	η (%)
A	17,9261	5,0730	17,8773	8,0161	0,00904564	87,8287
B	18,6086	5,0452	20,7746	6,7212	0,01079685	90,1047
C	19,9584	5,0391	20,0856	14,1965	0,01049110	89,8743
D	24,1419	5,0224	10,9030	14,6100	0,01068962	89,9905
E	22,6749	5,1289	15,6488	10,2812	0,01007741	89,4683

As Tabelas 4 e 5 apresentam alguns pontos da curva de Pareto (ver Fig. 2(b)) obtidos pelo algoritmo NSGA II para o caso de teste estudado.

Tabela 4. Resultados obtidos pelo algoritmo NSGA II das variáveis de projeto $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ e $x(6)$, respectivamente.

Pontos	ac (A/m)	B_{av} (T)	J_s (A/mm ²)	J_r (A/mm ²)	L/τ_p	h_s (mm)
A	30000,00	0,6000	3,0000	3,0000	1,9650	15,0000
B	29888,40	0,6000	4,8181	3,0031	1,9497	15,0000
C	29891,90	0,6000	3,6988	3,0000	1,9547	15,0000
D	30000,00	0,6000	5,9640	3,0000	1,9657	15,0000
E	29888,40	0,5996	3,4135	3,0000	1,9497	15,0000

Tabela 5. Resultados obtidos pelo algoritmo NSGA II das variáveis de projeto $x(7)$, $x(8)$, $x(9)$, $x(10)$, $f(1)$ e $f(2)$, respectivamente.

Pontos	h_{sr} (mm)	b_{ts1} (mm)	b_{tr1} (mm)	b_s (mm)	$Vol_Estator$ (m ³)	η (%)
A	22,8594	5,0000	19,9020	6,3164	0,0111407	90,4086
B	23,5140	5,0000	19,1201	8,3037	0,0096052	89,0493
C	20,3481	5,0000	20,4955	6,6851	0,0103824	89,8778
D	21,4342	5,0000	20,7905	6,3164	0,0090961	88,2192
E	23,3043	5,0000	18,0833	7,2830	0,0106584	90,0950

A Figura 1 mostra os gráficos “Volume versus Eficiência” gerados no início da otimização (Geração 1/100) do problema estudado.

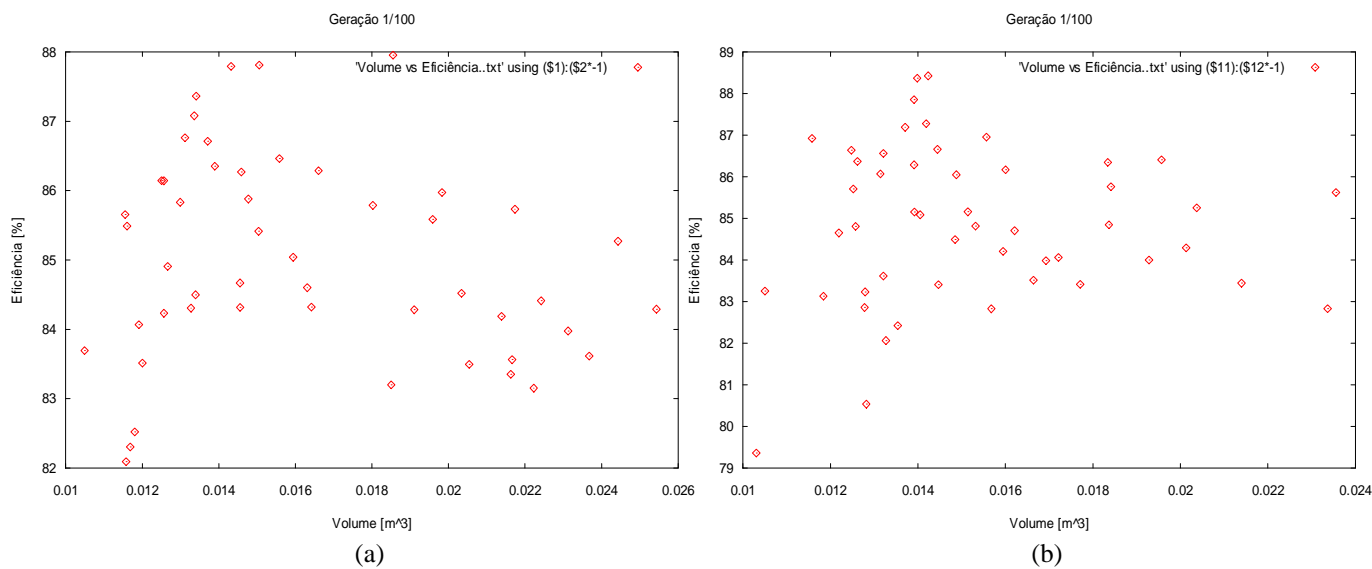


Figura 1. Gráficos da minimização do volume e maximização da eficiência na Geração 1/100 no MODE e NSGA II, respectivamente.

A Figura 2 mostra as curvas de Pareto “Volume versus Eficiência” geradas no fim da otimização (Geração 100/100) do problema estudado. Observa-se os pontos A, B, C, D e E destacados nas curvas, com os pontos foram obtidos os resultados analisados anteriormente.

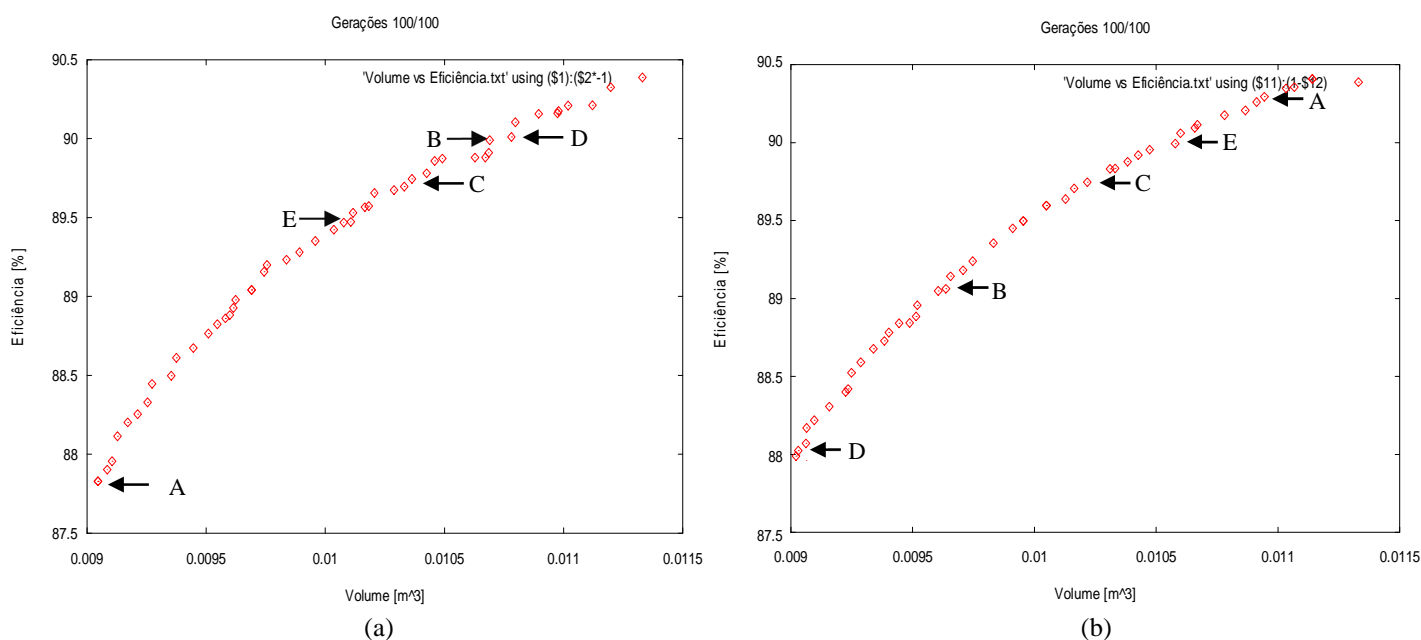


Figura 2. Curvas de Paretos na Geração 100/100 no MODE e NSGA II, respectivamente.

Destacaram-se os três melhores resultados das funções objetivo nas Tab. 3 e 5, observam-se que os valores estão em negrito. Além disso, por exemplo, os valores estão diferentes do comprimento por passo-pólo do estator nas Tab. 2 e 4 não influenciando em nada o projeto do estator. Na especificação do projeto o comprimento por passo-pólo deve ser entre 1,50 a 2,0 para reduzir os custos na fabricação do equipamento. Portanto, o resultado esperado é minimizar o volume do estator e maximizar a eficiência energética do motor estudado.

Observa-se na Fig. 2, que as execuções dos algoritmos MODE e NSGA II foram capazes de obter resultados satisfatórios com rápida convergência para minimizar o volume do estator e maximizar a eficiência do motor de indução trifásico. Os resultados dos dois algoritmos foram próximos. Comparando os resultados da Tab. 3 com a Tab. 1, houve uma redução do volume de aproximação 31,68 (%) e teve um aumento da eficiência energética de aproximação 3,30 (%). Conclui-se que, a metodologia usada é capaz de minimizar e maximizar as funções objetivo.

Analisando os dois algoritmos, o MODE teve melhor comportamento. Nota-se, por exemplo, as alturas e as larguras da ranhura do estator nos dois algoritmos das Tab. 2, 3, 4 e 5 constatou-se que os melhores resultados foram gerados pelo algoritmo MODE comparando com os parâmetros do motor antes da otimização.

6. CONCLUSÕES

Na presente contribuição, o algoritmo MODE é utilizado para otimizar o estator de um motor de indução trifásico. Neste sentido, duas funções objetivo foram consideradas: função volume do estator em função da eficiência energética. Os resultados obtidos mostram que a metodologia usada representa uma abordagem interessante para o tratamento do problema de otimização formulado.

Como propostas de trabalhos futuros, pode-se citar a aplicação da metodologia nas indústrias, e a otimização dos projetos 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

- Agarwal, R. K. 2000. *Principles of Electrical Machine Design*. Katson Books.
- 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.
- Bianchi, B., Bolognani, S. 1997. *Brushless DC Motor Design: An Optimization Procedure Based on Genetic Algorithms*, Conference Publication, nº 444, 1-3, September.
- Bianchi, N., Bolognani, S. 1998. *Design Optimization of Electric Motors by Genetic Algorithms*, IEE Proc. Electr. Power Application, Vol. 145, nº 5, September.
- Bianchi, N., Dai Pré, M., Grezzani, G., Bolognani, S. 2005. *Design considerations on fractional-Slot Fault-Tolerant Synchronous Motors*, IEEE.
- Deb, K. 2001. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, ISBN 0-471-87339-X.
- Goldberg, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, MA: Addison-Wesley.
- Hu, X., Coello Coello, C. A., Huan, Z. 2005. *A New Multi-Objective Evolutionary Algorithm Derived from the Line-Up Competition Algorithm*, Engineering Optimization, v. 37 (4), pp. 351-379.
- 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. 2008. *Multi-objective Optimization to Engineering System Design*. Tese, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 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.
- Mittle, V. N., Mittal, A. 2009. *Design of Electrical Machines*. Standard Publishers Distributors, Delhi.
- Phuangmalai, W., Konghirun, M., Chayopitak, N. 2013. *A Design Study of 4/2 Switched Reluctance Motor Using Particle Swarm Optimization*, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol. 11, nº 1, February.
- Price, K., Storn, R. 1997. *Differential Evolution – A Simple Evolution Strategy for Fast Optimization*, Dr. Dobb's Journal, v. 22 (4), pp. 18-24, April.
- Raghuram, A., Shashikala, V. 2013. *Design and Optimization of Three Phase Induction Motor Using Genetic Algorithm*, International Journal of Advances in Computer Science and Technology, Vol. 2, nº 6, June.
- Storn, R., Price, K., Lampinen, J. A. 2005. *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Springer: Natural Computing Series.

Upadhyay, K. G. 2008. *Design of Electrical Machines*. New Age International Publishers. New Delhi, India.
Yasodha, S., Ramesh, K., Ponnuragan, P. 2012. *Evolutionary Multi-objective Optimization Algorithms For Induction Motor Design – A Study*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2, Issue 11, November.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION APPLIED TO THE DESIGN OF A STATOR THREE PHASE INDUCTION MOTOR

Juliana Almansa Malagoli, juliana.malagoni@gmail.com¹

Fran Sérgio Lobato, fslobato@feq.ufu.br²

José Roberto Camacho, jrcamacho@ufu.br¹

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, mauricio.luz@ufsc.br³

Jacson Hudson Inácio Ferreira, Jacson@iftm.edu.br¹

¹Federal University of Uberlândia – Faculty of Electrical Engineering.

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

²Federal University of Uberlândia – Faculty of Chemical Engineering.

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

³Federal 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. *The design of engineering systems is configured as a multi-objective problem. This in turn, is inherently conflictual, that is, improvement in one objective results in worsening the other. Among the numerous applications which may be found in the literature, stator design, component which is part of the motor and whose function based is to conduct the magnetic flux, sets up as an interesting research topic, since it is directly related to motor manufacturing costs. In this context, this work aims the formulation and the resolution of a stator three phase induction motor considering as objectives to minimize the volume of the stator and maximize efficiency using determining the vector of geometric variables that characterize the mathematical model presented. For this purpose is used MODE (Multi-objective Optimization Differential Evolution) algorithm. The results obtained the MODE algorithm are compared with those obtained by the NSGA II (Non-dominate Sorting Genetic Algorithm) algorithm.*

Keywords: *Design of Induction Machines, Multi-objective Optimization, Differential Evolution.*