

Multiobjective Optimization Techniques Applied to Three-Phase Transformers Designs

Adelício M. Sobrinho, José. R. Camacho, *Senior Member, IEEE*, Rafael L. Carvalho, Sérgio M. R. Sanhueza, Stefani C. L. Freitas, *Member, IEEE*

Abstract— The aim of this research is to present the studies carried out to design three-phase core type distribution transformers, with the aid of optimization techniques. The minimization of losses is presented in two steps, first through the use of a mono-objective function, and second with the use of multi-objective function to minimize losses and the total mass of the active part of the transformer. The algorithms used are: Differential Evolution and Particle Swarm Optimization, their performances are compared through the results obtained. The main project parameters, such as core dimensions, total losses, no load current and the energizing current are estimated analytically through *OCTAVE* software. The analysis of magnetic flux density in the core is simulated using the Finite Element Method. Multiobjective optimization allows working with two or more conflicting objectives, and at each iteration, it stores the various non-dominant Pareto Front solutions, helping designers to choose the solution that best meets their needs. The results obtained with the mono-objective and multiobjective optimization techniques were interesting to minimize the losses and/or cost of the project.

Index Terms — Differential Evolution, Distribution Power Transformer, Particle Swarm Optimization, Transient Magnetizing Current.

I. INTRODUÇÃO

O transformador é um componente importante no processo global de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nos sistemas de potência. Trata-se de uma máquina elétrica estática que, por meio da indução magnética, permite a transferência de energia elétrica entre um ou mais circuitos eletricamente isolados, podendo alterar os níveis de tensão e corrente, mantendo a mesma frequência [1].

Neste contexto, esta pesquisa visa projetar um transformador de distribuição trifásico de 150 (kVA), 13800/ (V), do tipo núcleo envolvido, isolamento a seco, contemplando o cálculo das suas dimensões, das perdas no núcleo e nos enrolamentos, tendo como principal meta a utilização das técnicas de otimização multiobjetivo para minimização das perdas totais e da massa de sua parte ativa (composta por bobinas e núcleo).

A. M. Sobrinho, Federal University of Tocantins (UFT), Palmas, Tocantins, 77001-090, Brazil (e-mail: adelmax@uft.edu.br); J. R. Camacho, Federal University of Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, Brazil (jrcamacho@ufu.br); R. L. Carvalho, Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, Tocantins, 77001-090, Brazil (rafael.lima@uft.edu.br); S. M. R. Sanhueza, Federal University of Tocantins (UFT), Palmas, Tocantins, 77001-090, Brazil (e-mail: sergiorivera@uft.edu.br); S. C. L. Freitas, Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, Tocantins, 77001-090, Brazil (e-mail: stefaniclf@uft.edu.br).

Nos últimos anos diversos trabalhos propuseram metodologias para otimização, definição das principais dimensões dos projetos de transformadores e de motores, tais como: programação paralela para otimização do projeto global de transformadores de potência [2], desenvolvimento de um método analítico, de boa exatidão, para calcular a corrente máxima de energização de um transformador de distribuição monofásico, [3], outro que trata do projeto de um transformador toroidal [4], conceitos de otimização por Enxame de Partículas (EP) [5], projeto para um motor de indução trifásico utilizando as técnicas de otimização através do algoritmo Evolução Diferencial (ED) [6].

Por fim, destacou-se o projeto de um transformador de distribuição monofásico utilizando o método dos elementos finitos e as técnicas de otimização multiobjetivo via algoritmos EP e ED [7].

Neste artigo foram utilizadas técnicas de otimização multi-objetivos com restrições para minimizar as perdas totais e minimizar a massa total da parte ativa, com consequente redução de custos, do transformador trifásico.

As principais contribuições deste trabalho em relação às referências [7] e [8] foram as adaptações dos algoritmos multiobjetivos de Evolução Diferencial (MOED) e Enxame de Partículas (MOEP) com o uso das técnicas de restrições de desigualdades aplicadas para as grandezas de projeto de transformadores: Perdas totais, Massa ativa e Fator de carga para rendimento máximo do transformador. Essas técnicas de restrições foram utilizadas com a finalidade de que os algoritmos não insistam em respostas que não sejam interessantes, tais, como: respostas com perdas muito pequenas, porém com uma massa muito grande (custo elevado) ou vice-versa. De forma a não extrapolar os limites do fator de carga para rendimento máximo, visto que um transformador de distribuição trabalha com o fator de carga para rendimento máximo em torno de 50 a 60 %.

As próximas seções deste artigo são organizadas da seguinte maneira: na seção 2, é abordado o projeto do transformador; a seção 3 descreve os métodos de otimização aplicados ao projeto de transformadores trifásicos; a seção 4 mostra o conceito básico do método dos elementos finitos, em especial a modelagem magnetostática; a seção 5 aborda a metodologia adotada no desenvolvimento desta pesquisa; na seção 6 serão apresentados os resultados e discussões; e finalmente, a seção 7 apresenta as conclusões deste trabalho.

II. PROJETO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICOS

Nesta seção, com base em [4], são mostradas as principais equações utilizadas para o dimensionamento da parte ativa

(composta pelo núcleo e bobinas) e para o cálculo das perdas no transformador. O núcleo de um transformador trifásico do tipo núcleo envolvido é constituído por colunas, nas quais são encaixados os carretéis que abrigam as bobinas e pelas culatras que completam o retorno do fluxo mútuo no circuito magnético. Para uma melhor compreensão da parte ativa do transformador, a Fig. 1 ilustra as definições das dimensões do núcleo de um transformador trifásico [9].

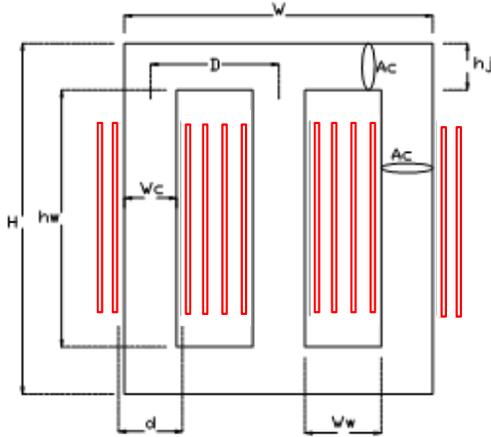


Fig. 1. Parte ativa do transformador trifásico do tipo núcleo envolvido.

Onde: A_j é a área da culatra do núcleo (m^2); d é o diâmetro interno da bobina de baixa tensão (m); D é a Distância entre os centros das colunas do núcleo (m); H é a altura total do núcleo (m); h_w é a altura da janela do núcleo (m); W_w é a largura da janela do núcleo (m); h_j é a altura da culatra do núcleo (m); W_c é a Largura da coluna do núcleo (mm); A_w é a área da janela (m^2); A_c é a área da coluna do núcleo (m^2), B_m é a indução magnética máxima ($Webers/m^2$).

A potência do transformador é dada pela equação (1) [9]:

$$S = 3,33 \cdot f \cdot A_c \cdot B_m \cdot J \cdot k_w \cdot A_w \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Onde:

f é a Frequência (Hz); J é a densidade de corrente nos condutores (A/m^2); k_w é o fator de espaçamento do núcleo.

Através das deduções da lei de Faraday a área da coluna é calculada por (2) [1, 4]:

$$A_c = \frac{Et}{4,44 \cdot f \cdot B_m} \quad (2)$$

O diâmetro interno da bobina é expresso por (3):

$$d = \sqrt{\frac{A_c}{k}} \quad (3)$$

Onde: k é a constante referente ao número de degraus do núcleo

O núcleo deste transformador é do tipo núcleo envolvido em degraus. O número de degraus (dentes) do núcleo é determinado de acordo com a área da seção bruta (Abc). A área bruta é dada pela relação entre a área da coluna e o fator de empilhamento das chapas (K_e), conforme (4) e Tabela II (UPADHYAY, 2008).

$$Abc = \frac{Ac}{K_e} \quad (4)$$

O núcleo do transformador é fabricado com chapas de aço silício revestidas por uma camada isolante. Para calcular a seção circunscrita do núcleo (So) essa área isolante é acrescida à área líquida por meio do termo denominado de fator de empilhamento (K_e) e dos espaços vazios nas chapas do núcleo denominados por fator de utilização (K_u), conforme (5) [20].

$$So = \frac{Ac}{K_e \cdot K_u} \quad (5)$$

A Tabela I mostra o número de degraus em função da área bruta da coluna.

TABELA I
NUMERO DE DEGRAUS DO NÚCLEO.

Abc ($m^2 \cdot 10^{-3}$)	< 3	[-5]	[5-7]	[7-15]	[15-45]	[45-80]
Degraus	1	2	3	4	5	6

O diâmetro circunscrito da coluna do núcleo (Dcn) é definido por (6).

$$Dcn = 2 \cdot \sqrt{\frac{So}{\pi}} \quad (6)$$

A Tabela II auxilia a determinar os valores da largura dos degraus (L_n), e n é o número do degrau, conforme (7).

TABELA II

DIMENSÕES DO NÚCLEO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE DEGRAUS.

Deg.	$\frac{L_1}{Dc}$	$\frac{L_2}{Dc}$	$\frac{L_3}{Dc}$	$\frac{L_4}{Dc}$	$\frac{L_5}{Dc}$	K_u
1	0,707					0,636
2	0,850	0,526				0,786
3	0,906	0,707	0,424			0,850
4	0,934	0,796	0,605	0,358		0,886
5	0,950	0,846	0,707	0,534	0,313	0,907

O número de degraus é definido em função da área da coluna, a relação $\left(\frac{Ln}{Dc}\right)$ é definida de acordo com o número de degraus do núcleo do transformador [20].

$$Ln = Dcn \cdot \frac{L_n}{Dc} \quad (7)$$

Sendo: Dcn é o diâmetro da coluna do núcleo [m]; L_1 é a largura do dente de índice 1 do núcleo do transformador (maior dente) [m]; L_n é a largura do degrau n da coluna do núcleo [m]; $\left(\frac{L_n}{Dc}\right)$ é o fator de multiplicação da coluna do núcleo, conforme Tabela 1; n é o índice do número de degraus da coluna do núcleo (este valor varia de 1 a n).

Os valores da largura do núcleo, da distância entre os centros das duas colunas e da largura da janela são expressas, conforme equações de (8) a (10).

$$Wc = L1 \quad (8)$$

$$D = Ww + Wc \quad (9)$$

$$W = 2 \cdot D + Wc \quad (10)$$

A relação entre a altura e a largura da janela do núcleo é calculada pela variável ($Rjan$), o seu valor varia entre 2 e 4,

conforme a equação (11) [9]:

$$R_{jan} = \frac{hw}{Ww} \quad (11)$$

Já a variável (*rel*) estabelece a relação ente a área da culatra (*A_j*) e a área da coluna do núcleo (*A_c*), conforme a equação (12):

$$rel = \frac{A_j}{A_c} \quad (12)$$

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que possuem perdas no núcleo (histerese e correntes parasitas) e nos enrolamentos (por efeito Joule) e dispersão de fluxo.

As perdas no núcleo são relacionadas às perdas por histerese e por correntes parasitas. Essas perdas podem ser representadas em função da densidade de fluxo magnético, e das massas nas colunas (*W_{ic}*) e culatras (*W_{ij}*) em (*W/kg*), conforme equações (13) a (15) [8, 11].

$$W_{ic} = (P_{ic} \cdot V_{ferc}) \quad (13)$$

$$W_{ij} = (P_{ij} \cdot V_{ferj}) \quad (14)$$

$$P_{03\phi} = (W_{ic} + W_{ij}) \cdot 1,05 \quad (15)$$

Sendo: *P_{03φ}* são as perdas a vazio do transformador trifásico (*W*); *P_{ic}* são as perdas específica a vazio na coluna (*W/kg*); *V_{ferc}* é a massa de ferro das colunas em (*kg*); *P_{ij}* são as perdas específica a vazio na culatra (*W/kg*); *V_{ferj}* é a massa de ferro das culatras em (*kg*).

As perdas nos condutores das bobinas de alta e baixa tensão, em operação nominal, são determinadas pela equação (16).

$$P_{j3\phi} = [(R_{BT} \cdot I_{f_{BT}}^2) + (R_{AT} \cdot I_{f_{AT}}^2) \cdot 3] \quad (16)$$

Sendo: *P_{j3φ}* as perdas trifásicas por efeito joule (*W*); *R_{BT}* é a resistência dos condutores na baixa tensão (Ω); *I_{f_{BT}}* é a corrente de fase nas bobinas na baixa tensão (*A*); *R_{AT}* é a resistência dos condutores na alta tensão (Ω); *I_{f_{AT}}* Corrente de fase nas bobinas na alta tensão (*A*);

III. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AOS TRANSFORMADORES

A solução proposta neste trabalho inclui a avaliação de dois métodos de otimização multiobjetivo a Otimização por Exame de Partículas (OIEP) e Evolução Diferencial (OED) [10], apresentadas a seguir.

A. Otimização por Exame de Partículas (OIEP)

A OIEP é inspirada na simulação e análise da dinâmica e interação social entre os membros de colônias organizadas, com uma população formada por indivíduos chamados partículas [12]. Basicamente, as partículas “voam” sobre a superfície multidimensional de otimização, enquanto o movimento de uma partícula é influenciado por forças de atração geradas pela melhor solução global do grupo e sua melhor solução local (guardada na memória geração após geração) [13, 14, 15]. O Fluxograma deste algoritmo está bem detalhado no trabalho [14].

Para cada partícula da população, existem duas principais propriedades: a dinâmica e sua rede de informação (vizinhança). Cada partícula do grupo possui uma localização e

velocidade. A velocidade é atualizada segundo (17) e a posição é atualizada por meio de (18).

$$v_{(k+1)}^i = wv_k^i + C_1r_1(pbest_k^i - x_k^i) + C_2r_2(pbest - x_k^i) \quad (17)$$

$$x_{(k+1)}^i = x_k^i + v_{(k+1)}^i \quad (18)$$

Onde *w*, *C₁* e *C₂* são hiperparâmetros do modelo, *r₁*, *r₂* são dois números gerados aleatoriamente, *pbest_kⁱ* e *pbest* indicam, respectivamente, a melhor posição encontrada pela partícula *i* e a melhor posição encontrada pela população. O parâmetro *k* indica o instante de simulação, de maneira discreta, e *x_kⁱ* é a posição da partícula *i*, no momento *k* do tempo.

B. Otimização por Evolução Diferencial (OED)

A Otimização por Evolução Diferencial (OED) é um tipo de busca baseada em direção, para a composição de indivíduos candidatos a compor uma nova geração, a saber, por meio da realização de operações vetoriais. Basicamente, o candidato a novo indivíduo é fabricado a partir da diferença ponderada entre dois indivíduos da população atual é adicionada a um terceiro indivíduo da mesma população [1].

Uma vez definida a taxa de perturbação *F*, um novo indivíduo candidato é estruturado de forma que seja o resultado da soma ponderada por *F*, do vetor diferença entre dois indivíduos \vec{x}_{r_2} e \vec{x}_{r_3} e então adicionada a um terceiro indivíduo \vec{x}_{r_1} [7].

O indivíduo gerado através deste esquema (\vec{v}_i) é chamado de mutante e este é cruzado com um elemento da população, gerando um *trial vector* (*vetor tentativa*). Este *trial vector* é então avaliado pela função objetivo e pode inclusive substituir um indivíduo com pior valor de função objetivo na geração atual ou em gerações posteriores. A estratégia básica de fabricação de indivíduos pode ser alterada [16]. Por exemplo, pode-se variar o tipo de indivíduo a ser modificado na formação do vetor, o número de indivíduos considerados para a perturbação e com o tipo de cruzamento a ser utilizado. Uma estratégia pode ser identificada como *ED/a/b/c*. Onde: *a* especifica o critério de seleção do vetor inicial, pode ser “*rand*” (vetor escolhido aleatoriamente na população corrente) ou “*best*” (o vetor mais otimizado na população); *b* determina o número de diferenças ponderadas usadas para a perturbação de *a*; *c* denota o tipo de cruzamento, que pode incluir “*exp*” (exponencial) ou “*bin*” (binomial). Utilizando-se destas convenções, é possível definir pelo menos dez estratégias diferentes para a configuração da simulação usando Evolução Diferencial [5].

A melhor estratégia pode estar vinculada ao problema que se deseja otimizar. Neste caso, é preciso analisar qual é a mais adequada de acordo com o problema de otimização. Especificamente no trabalho proposto, a estratégia *ED/rand/1/bin* foi a melhor configuração encontrada.

IV. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MODELAGEM MAGNETOSTÁTICA

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em métodos numéricos diferentes que aproximam a solução de problemas resolvidos por equações diferenciais parciais (EDP) ou ordinárias (EDO) através da subdivisão da geometria em

elementos menores, definidos como elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata resolve por interpolação de uma solução aproximada [17]. São três as etapas para aplicação do MEF: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Todos os fenômenos eletromagnéticos são descritos por equações clássicas de Maxwell. Estas constituem um sistema de equações diferenciais parciais que ligam os fenômenos magnéticos para os fenômenos elétricos e que unificam todos os princípios do eletromagnetismo. O modelo magnetostático é descrito em (19) e (20).

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} \quad (19)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (20)$$

A modelagem completa de fenômenos relacionados ao eletromagnetismo exige as leis de comportamento dos materiais (ou relações constitutivas), que estabelecem a relação entre campos elétricos e magnéticos e o meio em que estão inseridos. A relação constitutiva é dada por (21).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (21)$$

As grandezas magnéticas do transformador são definidas de acordo com as condições de contorno mostradas em (22) e (23) [17].

$$\vec{n} \times \vec{H}_c \Big|_{\Gamma_{Hc}} = 0 \quad (22)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{H} \Big|_{\Gamma_B} = 0 \quad (23)$$

Sendo: $\Gamma = \Gamma_H \cup \Gamma_B$; Γ é a fronteira do domínio Ω ; Γ_B é a fronteira densidade de fluxo magnético; Γ_{Hc} é a fronteira da intensidade de campo magnético no núcleo; Γ_B é a fronteira densidade de fluxo magnético; Γ_{Hc} é a fronteira da intensidade de campo magnético no núcleo; n é o vetor normal à superfície.

V. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO COM RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE PARA MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS E DAS MASSAS DA PARTE ATIVA

Neste trabalho, foi desenvolvido o projeto de um transformador de distribuição trifásico, com o auxílio das técnicas de otimização multiobjetivo, para minimizar as perdas totais (a vazio e em carga) e a massa total da parte ativa (núcleo e bobinas).

Foram utilizadas restrições de desigualdade para as grandezas: perdas totais, massa da parte ativa e o fator de carga para rendimento máximo do projeto de um transformador de distribuição trifásico via algoritmos: Multiobjetivos de Evolução Diferencial sem restrições (MOED) e Multiobjetivos de Enxame de Partículas sem restrições (MOEP).

Verifica-se também a interferência dessa otimização multiobjetivos na corrente de energização do transformador.

Para verificar as possíveis extrapolações das grandezas antes de inserir as restrições foram realizados 10 testes com o algoritmo MOEP, sem restrições de desigualdade. Foi escolhido o MOEP devido ao fato deste algoritmo ter obtido uma maior diversidade de soluções.

Em (24) e (25) são descritos os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto utilizadas para minimizar as duas

funções objetivo (FO): perdas totais e massa total da parte ativa do transformador trifásico.

Para minimizar as perdas do transformador com o auxílio dos algoritmos: MOEP e MOED foram inseridos os limites inferiores e superiores das variáveis do projeto e a sua função objetivo (FO), de acordo com (24) a (27).

$$\text{Variáveis} \begin{cases} 1,2 \leq J_{BT} \leq 1,4 \\ 1,4 \leq J_{AT} \leq 1,6 \\ 1,5 \leq B_m \leq 1,6 \\ 6,0 \leq k_{sw} \leq 7,0 \\ 0,45 \leq k_t \leq 0,55 \\ 3,4 \leq R_{jan} \leq 3,6 \\ 1,1 \leq rel \leq 1,2 \end{cases} \quad (24)$$

$$F0 = [\min(P_t), \min(Mativa)] \quad (25)$$

$$Mativa = M_n + M_{AT} + M_{BT} \quad (26)$$

$$P_t = P_{j3\phi} + P_{03} \quad (27)$$

Onde: $F0$: são as funções multiobjetivos; $Mativa$: é a massa ativa do transformador (kg); min : é a minimização da função; P_t : são as perdas totais (W); P_{03} : são as perdas no núcleo (W); $P_{j3\phi}$: são as perdas nos enrolamentos (W); M_n : é a massa do núcleo (kg); M_{AT} : são as massa das bobinas de alta tensão (kg); M_{BT} : é a massa das bobinas de baixa tensão (kg).

Justificativas na escolha das variáveis:

J_{BT} e J_{AT} : são as densidades de correntes nos condutores de baixa e alta tensão, respectivamente (A/mm^2). Interferem no dimensionamento dos condutores das bobinas da baixa e alta tensão; nas perdas nos enrolamentos; e no fator de carga para rendimento máximo do transformador. B_m : é a densidade de fluxo magnético máximo na coluna do núcleo [T]. É importante para o projetista selecionar adequadamente o tipo de material utilizado nas chapas do núcleo, isso irá interferir nas perdas a vazio, na corrente de magnetização de regime permanente e na corrente energização; k_{sw} : esta variável é utilizada na otimização para calcular o fator de espaço no núcleo do transformador, conforme mostra (28).

$$k_w = \frac{k_{sw}}{30 + kV} \quad (28)$$

O fator k_{sw} influencia no tamanho das janelas do núcleo e no tamanho dos condutores das bobinas dos enrolamentos; k_t : representa a relação de volt/espiras do transformador, influencia na isolamento, nas perdas nos enrolamentos, nas perdas a vazio e interfere também na magnetização do transformador; R_{jan} : é a relação entre a largura e altura da janela do transformador, influencia nas perdas totais; rel : representa a relação entre a área do núcleo e a área da culatra, vai interferir diretamente nas perdas a vazio e nos enrolamentos.

Os parâmetros utilizados para os algoritmos MOEP e MOED são: 02 objetivos; 07 variáveis; 100 iterações e o critério de parada é o número de iterações.

A Tabela III mostra os resultados obtidos para o transformador MOEP sem restrições. Os valores máximos obtidos para as grandezas perdas totais, massa ativa e fator de carga para rendimento máximo (f_c) foram respectivamente 2086 (W), 634,13 (kg) e 68 (%). Esses valores extremos não são interessantes para o projeto do transformador e para limitar esses resultados foram inseridas as restrições de desigualdade nos algoritmos

TABELA III
RESULTADOS - TRANSFORMADOR MOEP SEM RESTRIÇÕES

Arquivo	Máx. (Pt)	Desvio (Pt)	Máx. (Mativa)	Desvio (Mativa)	Máx. (fc)
MOEP1	2062,12	84,54	593,16	37,93	0,68
MOEP2	2062,12	84,48	610,39	41,05	0,67
MOEP3	2086,00	89,14	593,16	43,21	0,68
MOEP4	1947,21	55,09	634,13	43,34	0,68
MOEP5	1947,21	55,42	634,13	43,86	0,67
MOEP6	2062,12	85,35	593,16	39,05	0,68
MOEP7	2062,12	82,74	593,16	38,52	0,68
MOEP8	2062,12	85,73	593,16	38,03	0,67
MOEP9	2062,12	82,96	593,16	37,84	0,68
MOEP10	2062,12	84,78	593,16	38,11	0,67

As restrições de desigualdade inseridas para as grandezas: perdas totais (Pt), massa ativa ($Mativa$) e fator de carga para rendimento máximo (fc), são mostradas nas equações de (29) a (31), respectivamente. As justificativas das restrições (29) e (30) estão relatadas após a Fig. 2.

$$g(1) = Pt > 2000 \begin{cases} f_1 = Pt + (Pt - 2000) \times 100 \\ f_2 = Mativa + (Pt - 2000) \times 100 \end{cases} \quad (29)$$

$$g(2) = Mativa > 610 \begin{cases} f_1 = Pt + (Mativa - 610) \times 10 \\ f_2 = Mativa + (Mativa - 610) \times 10 \end{cases} \quad (30)$$

$$g(3) = fc > 0,60 \begin{cases} f_1 = Pt + (fc - 0,60) \times 1200 \\ f_2 = Mativa + (fc - 0,60) \times 1200 \end{cases} \quad (31)$$

O fator de carga para rendimento máximo de um transformador de distribuição deve ser próximo de 50%. Foi inserida uma restrição para que o fator de carga para rendimento máximo não exceda 60%.

Nesta etapa foram realizadas equações com grandezas diferentes, tais como, soma da potência em (w) com $Mativa$ em (kg) apenas com o propósito de penalizar as soluções que extrapolam as restrições.

O fluxograma mostrado na Fig. 2, permite uma visualização geral da metodologia utilizada para execução deste trabalho utilizando os algoritmos Multiobjetivos: Evolução Diferencial com restrições (MOEDCR) e Enxame de Partículas restrições (MOEPCR).

As funções Objetivos para minimizar as Perdas Totais e minimizar a massa ativa são funções objetivos conflitantes em que para melhorar uma a outra piora.

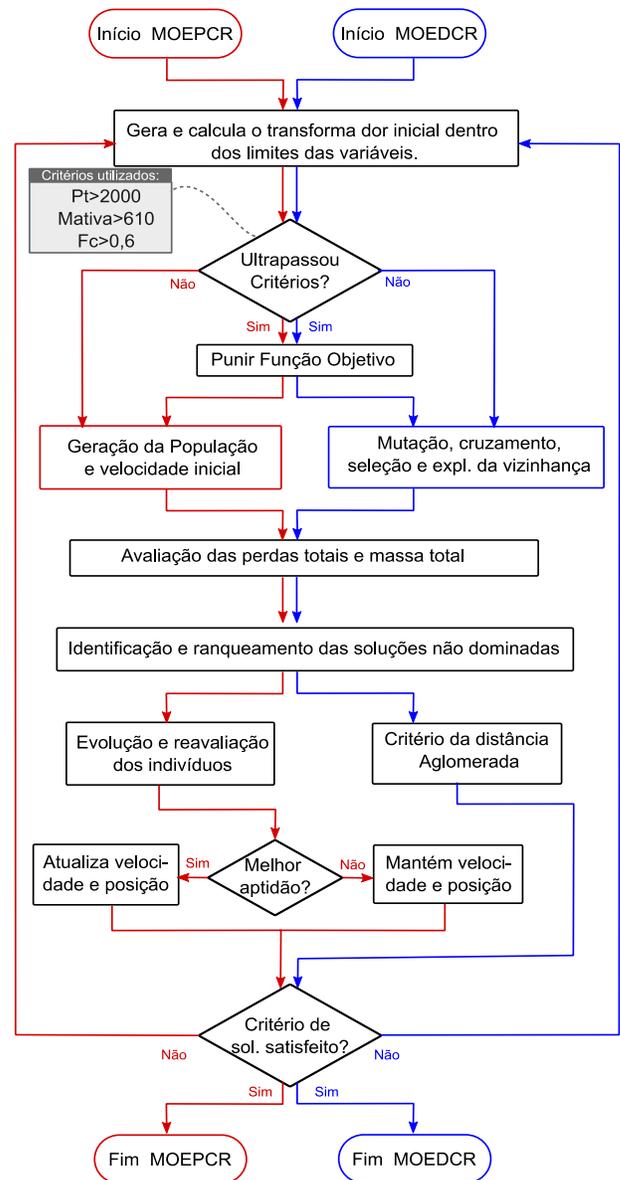


Fig. 2. Fluxograma da metodologia adotada.

Os projetos com funções multiobjetivos conflitantes normalmente convergem para pontos em que pelo menos uma das respostas seja a melhor, pode gerar projetos com uma função objetivo muito boa e a outra não desejável. A norma Técnica ABNT NBR 5356-11 2016 permite perdas até maiores que 2000 W. Foi inserido o valor de restrição para a grandeza Perda Total de 2000 W por observação dos resultados obtidos pelos projetos sem restrições, mostrados na Tabela III. Da mesma forma foi escolhida a restrição para a grandeza Mativa de 610 kg. Como por exemplo o Transformador MOEPCR6, da Tabela III, possui perdas de 2062,12 (W), Mativa de 593,16 kg. Esse transformador não é interessante, pois, tem perdas altas (2062,12 W) quando comparado a outros transformadores obtidos e apesar de ter uma massa baixa (593,16 kg), ficará muito difícil de projetá-lo com essas dimensões. Além disso, o fator de carga para rendimento máximo está em 0,68, considerado muito alto para um transformador de distribuição.

A Fig. 3 mostra os resultados obtidos para os algoritmos MOEPCR6 e MOEDCR5 com as restrições, conforme as Tabelas IV e V, respectivamente.

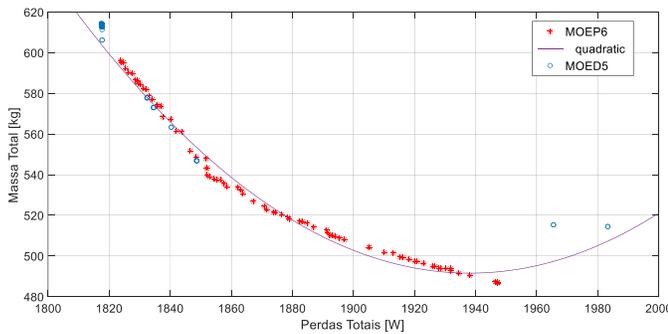


Fig. 3. Desempenho dos algoritmos com restrições.

De acordo com a equação de desigualdade (31), o fator de carga para rendimento máximo pode ser no máximo 60%. Os algoritmos MOEDCR e MOEPCR, foram elaborados para minimizar as perdas totais e a massa da parte ativa com as restrições de desigualdade descritas conforme as equações (29), (30) e (31), e fornecer até 80 soluções não dominadas.

Para escolha dos melhores resultados foram analisados 10 arquivos para cada algoritmo. Verifica-se através da Tabela IV que os valores máximos obtidos para as grandezas perdas totais (P_t), massa da parte ativa (M_{ativa}) e fator de carga para rendimento máximo (f_c) estão sendo respeitados pelos limites máximos estabelecidos pelas restrições de 2000(W), 610(kg) e 60(%), respectivamente. Os resultados obtidos com o uso do o algoritmo MOED também obedeceram aos limites de restrições.

As Tabelas IV e V mostra os resultados obtidos para os algoritmos multiobjectivos MOEPCR e MOEDCR com restrições de desigualdade, respectivamente (Revisor B–item2).

TABELA IV
RESULTADOS TRANSFORMADOR MOEPCR

Arquivo	Máx. (P_t)	Desvio (P_t)	Máx. (M_{ativa})	Desvio (M_{ativa})	Máx. (f_c)
MOEPCR1	1999,07	49,11	599,80	34,46	0,603
MOEPCR2	1994,23	48,72	610,28	37,41	0,604
MOEPCR3	1947,21	38,96	611,08	36,62	0,603
MOEPCR4	1996,38	48,62	596,69	34,63	0,602
MOEPCR5	1947,21	35,90	607,43	30,62	0,604
MOEPCR6	1947,21	31,73	595,95	24,03	0,602
MOEPCR7	1928,93	31,93	607,43	27,62	0,603
MOEPCR8	1948,61	35,58	595,66	30,13	0,603
MOEPCR9	1947,16	39,72	605,32	35,58	0,603
MOEPCR10	1947,21	34,38	595,83	29,73	0,600

TABELA V
RESULTADOS TRANSFORMADOR MOEDCR

Arquivo	Máx. (P_t)	Desvio (P_t)	Máx. (M_{ativa})	Desvio (M_{ativa})	Máx. (f_c)
MOEDCR1	1837,79	38,23	589,33	31,47	0,611
MOEDCR2	1844,13	58,74	592,72	39,21	0,606
MOEDCR3	1862,29	62,55	566,85	55,47	0,606
MOEDCR4	1928,61	46,92	505,79	40,56	0,607
MOEDCR5	1828,94	34,46	600,51	26,99	0,605
MOEDCR6	1891,42	50,46	530,00	47,70	0,606
MOEDCR7	1840,25	64,12	593,17	36,29	0,606
MOEDCR8	1915,43	82,71	541,72	51,85	0,608
MOEDCR9	1845,21	59,70	598,39	36,23	0,606
MOEDCR10	1853,67	43,96	582,90	48,36	0,608

Utilizou-se o *software* OCTAVE para o desenvolvimento dos algoritmos MOEP e MOED. Além disso, os cálculos analíticos também foram escritos em Linguagem C. A geometria dos transformadores: padrão e otimizado foi realizada com o uso dos métodos de elementos finitos através do *software* FEMM. O MEF é utilizado para validar os resultados obtidos através da análise das densidades de fluxo magnético no núcleo do transformador, perdas a vazio, perdas nos enrolamentos e perdas totais.

Os projetos MOEPCR e MOEDCR escolhidos obtiveram geometrias e grandezas elétricas com valores bem próximos.

Em consequência, desses fatos, as densidades de fluxos magnéticos máximos no núcleo dos transformadores calculados via *software* OCTAVE apresentaram valores semelhantes.

A Fig. 4 mostra as cotas das geometrias do transformador MOEDCR5.

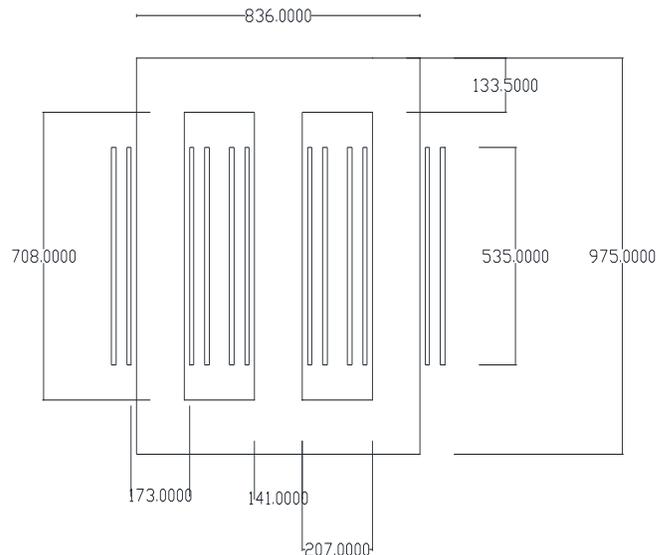


Fig. 4. Cotas do projeto MOEDCR5.

Foram inseridas cotas para facilitar o entendimento, para o leitor, de como foram realizadas as simulações via *software* FEMM. O valor da corrente de magnetização a vazio e os demais resultados das dimensões do projeto foram usadas para construir a geometria do desenho e simular os valores das densidades de fluxo magnético no núcleo do transformador via *software* FEMM.

A Fig.5 mostra o resultado obtido para a densidade de fluxo magnético máximo simulada via *software* FEMM para o transformador MOEDCR5.

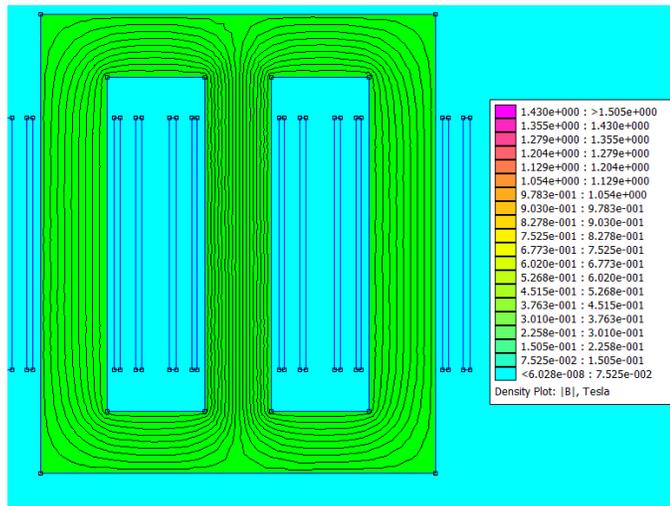


Fig. 5. Resposta eletromagnética do transformador.

A densidade de fluxo magnético máxima calculada para o transformador MOEDCR foi de $1,587(T)$ e a simulada via software FEMM foi de $1,505(T)$, a diferença entre o calculado e o simulado foi de aproximadamente $5,45(\%)$.

Para o transformador MOEPCR com restrições, a densidade de fluxo magnético máxima calculada foi de $1,587(T)$ e a simulada via software FEMM foi de $1,517(T)$, a diferença entre o calculado e o simulado foi de aproximadamente $4,61(\%)$.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A otimização multiobjetivo com restrições de desigualdade foi programada para gerar até oitenta soluções, não dominadas, com a finalidade de minimizar as perdas totais e a massa da parte ativa. Foram inseridas as restrições de desigualdade para as três grandezas: perdas totais com limite de $2000(W)$, massa da parte ativa com limite máximo de $610(kg)$ e o fator de carga para rendimento máximo com limite máximo de 60% .

Entre os 80 projetos otimizados foram escolhidas pelo projetista as soluções em que as perdas estão no intervalo entre 1830 e $1850 W$, dentro deste intervalo foi escolhido o projeto de menor custo em reais.

De acordo com os preços em reais do mercado em reais. O Preço das bobinas de alumínio era $R\$ 22,00/kg$ e o Preço núcleo $R\$ 10,50/kg$. Por exemplo o transformador MOEPCR6 escolhido tem os seguintes dados: Massa das bobinas de Baixa tensão foi de $26,313$ e Massa das bobinas de Alta tensão foi de $51,71 kg$ e a massa o núcleo foi de $469,2375$. Logo o preço total foi: $78,023 \cdot 22,00 + 469,2375 \cdot 10,50 = R\$ 6643,50$.

Os resultados obtidos para as grandezas perdas totais (P_t) e massa da parte ativa (M_{ativa}) referentes aos projetos: referência, MOEPCR e MOEDCR utilizando as restrições de desigualdades estão apresentados na Fig. 6.

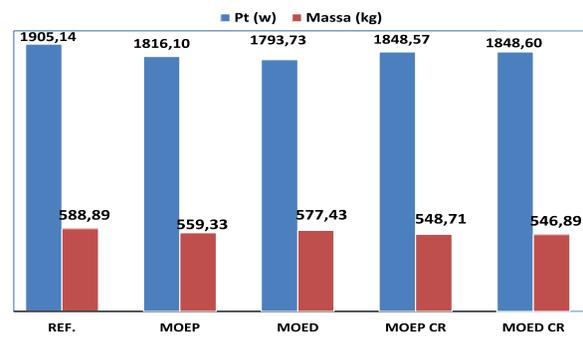


Fig. 6. Resultados otimização multiobjetivo MOEP e MOED.

Verifica-se que, com a otimização multiobjetivo via algoritmo MOEPCR, as perdas diminuíram de $1905,14W$ para $1848,57W$, redução de aproximadamente $2,97\%$, o fator de carga para rendimento máximo diminuiu de $0,6220$ para $0,6011$.

O custo de materiais da parte ativa para fabricação do transformador de referência é de aproximadamente $R\$7050,79$ contra $R\$6643,50$ do transformador MOEPCR com restrição, diminuição do custo em aproximadamente $5,77\%$.

Enquanto os resultados alcançados via algoritmo ED o fator de carga para rendimento máximo diminuiu de $0,6220$ com o MOED para $0,6018$ utilizando o MOEDCR. O custo de materiais da parte ativa para fabricação do transformador de referência é de aproximadamente $R\$7050,79$ contra $R\$6657,69$ do transformador MOEDCR, diminuição do custo em aproximadamente $5,58\%$. Através do algoritmo multiobjetivo ED as perdas diminuíram de $1905,14W$ com o uso do MOED para utilizando o MOEDCR $1848,60(W)$, redução de aproximadamente $2,97\%$ quando comparado com o transformador de referência.

A Tabela V mostra os resultados das perdas a vazio (P_0), perdas totais (P_t), impedância percentual (Z_p) e fator de carga para rendimento máximo (f_c) dos transformadores referência (Ref.), MOEDCR e MOEPCR.

Grandezas	Ref.	MOEDCR	MOEPCR	ABNT NBR 5356-11 2016
$P_0(w)$	531,46	489,06	490,28	450-750
$P_t(W)$	1905,46	1848,60	1848,57	3070-3800
$I_o(w)$	2,28	8,82	8,83	3,0
Z_p	3,91	4,50	4,49	5,0
f_c	0,6365	0,6018	0,6011	Não informado

Ambos os projetos multiobjetivos conseguiram diminuir as perdas e custo. Além disso, entre as 80 soluções possíveis, foram filtrados os maiores fatores de carga para rendimento máximo. Verificando de acordo com a Tabela IV que os resultados máximos se mantiveram conforme a sua restrição, menores ou muito próximos do limite máximo de 60% . Constatou-se que os resultados alcançados, antes e após a minimização das perdas, estão de acordo com a Norma ABNT NBR 5356-11 2016, na qual baseia-se na IEC 60076-11:2004.

A Tabela VI mostra os resultados das principais grandezas referentes aos transformadores: referência e os otimizados. De

acordo com a Tabela VI os transformadores multiobjetivo MOEPCR e MOEDCR (com restrições) foram os que apresentaram os melhores resultados, pois, conseguiram reduzir as duas funções objetivo perdas totais e massa ativa, além disso, obedeceram às restrições inseridas.

Os algoritmos foram implementados para produzir até 80 projetos. Os resultados obtidos apresentados na Fig. 3 mostram que o algoritmo MOEPCR foi mais eficiente, pois, apresentou soluções com a mesma convergência e maior diversidade de soluções (apresentou respostas praticamente em todo o universo), quando comparado com as respostas obtidas pelo algoritmo MOEDCR que apresentou algumas respostas mais concentradas mais nas extremidades dos objetivos: Valores mínimos de Perdas totais e valores mínimos de Massa Ativa. Essa maior diversidade de soluções amplia as possibilidades de escolha do projetista em busca da solução que melhor atende às suas necessidades.

TABELA VI
AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.

Projeto	Perdas Totais (W)	Mativa (kg)	f_c	Custo (R\$)
Ref.	1905,14	588,89	0,6220	7050,79
MOEP	1816,10	559,33	0,6542	6782,73
MOED	1793,73	577,43	0,6683	6971,78
MOEPCR	1848,57	548,71	0,6011	6643,50
MOEDCR	1848,60	546,89	0,6018	6657,69

VII. CONCLUSÕES

O transformador deste projeto possui as seguintes características: transformador de distribuição trifásico, isolamento a seco de 150 kVA, 13,8 kV, 220/127 V, *delta/estrela*, 60 Hz, tipo núcleo envolvido, lâminas do núcleo são de aço silício com chapas de 0,27 mm, grão orientado, densidade de fluxo magnético máximo (B_m) de 1,55 T, densidade de corrente na baixa e alta, respectivamente, iguais a 1,31 e 1,51 (A/mm²), fator de empilhamento (K_e) de 0,945 e constante de transformação (k_t) igual a 0,52.

Os parâmetros do transformador foram calculados analiticamente via *software OCTAVE* e os resultados adquiridos foram utilizados para realizar a análise eletromagnética via *software FEMM*, na qual analisou-se as densidades de fluxos magnéticos do núcleo do transformador.

Para ambos os algoritmos multiobjetivos MOEPCR e MOEDCR houve uma diminuição das perdas totais, diminuição do custo do transformador e os resultados estão de acordo com a norma Técnica ABNT 5356-11/2016. Conclui-se que a otimização multiobjetivo auxilia muito na busca de várias soluções não-dominadas da Frente de Pareto, ficando a critério do projetista a escolha que satisfaça o denominado projeto otimizado.

REFERÊNCIAS

[1] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr. and S. D. Uman, "Transformers" in *Electric Machinery*, 6th ed. New York, NY, USA, McGraw-Hill Higher Education, 2013, ch. 2, pp. 57-104.

[2] J. Faiz, B. M. Ebrahimi and T. Noori, "Three- and Two-Dimensional Finite-Element Computation of Inrush Current and Short-Circuit Electromagnetic Forces on Windings of a Three-Phase Core-Type Power Transformer," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 5, pp. 590-597, May 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.917819.

[3] S. Jazebi, F. de León and N. Wu, "Enhanced Analytical Method for the Calculation of the Maximum Inrush Currents of Single-Phase Power Transformers," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2590-2599, Dec. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2443560.

[4] K. G. Upadhyay. "Conventional Design of machines" in *Design of Electrical Machines*. New Age International Publishers. New Delhi, India, 2008, ch. 3, sec. II, pp. 31-53.

[5] R. Aghmasheh, V. Rashitchi and E. Rahimpour, "Gray Box Modeling of Power Transformer Windings Based on Design Geometry and Particle Swarm Optimization Algorithm," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 5, pp. 2384-2393, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2808518.

[6] J. Almansa Malagoli, J. R. Camacho, M. Valencia Ferreira da Luz, J. H. Inacio Ferreira and A. Maximiano Sobrinho, "Design of Three-Phase Induction Machine Using Differential Evolution Algorithm," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2202-2208, July 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273778.

[7] A. M. Sobrinho, J. Roberto Camacho, J. A. Malagoli and A. C. F. Mamede, "Analysis of the Maximum Inrush Current in the Optimal Design of a Single Phase Transformer," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 12, pp. 4706-4713, Dec. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7817001.

[8] A. M. Sobrinho *et al.* Optimization of losses in a three-phase transformer design with inrush current analysis, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, August 2018. DOI:10.1007/s40313-018-0413-8.

[9] R. Yacamini and H. Bronzeado, Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model. *IET Journals Magazines, IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, v. 141, n. 6, p. 491-498, 1994. DOI: 10.1049/ip-smt:19941450.

[10] X. Ma, Y. Yu, X. Li, Y. Qi and Z. Zhu, "A Survey of Weight Vector Adjustment Methods for Decomposition-Based Multiobjective Evolutionary Algorithms," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 24, no. 4, pp. 634-649, Aug. 2020, doi: 10.1109/TEVC.2020.2978158.

[11] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, N. Chiesa and H. K. Hoidalen, "Topology-Correct Reversible Transformer Model," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2037-2045, Oct. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2205275.

[12] Y. G. Petalas, K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis. Memetic particle swarm optimization. *Ann Oper Res* **156**, 99-127 (2007). DOI 10.1007/s10479-007-0224-y.

[13] C. Blum and D. Merkle. "Swarm Intelligence in Optimization", in *Swarm Intelligence: Introduction and Applications*. Natural Computing Series. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 43-86.

[14] A. M. Sobrinho. "Uma Contribuição aos Projetos de Transformadores Via Algoritmos Naturais e Elementos Finitos". Ph.D. dissertation Universidade Federal de Uberlândia, PPGEELT, Uberlândia-MG, 2019.

[15] B. Jian, C. Chen, C. Lin and H. Yau, "Optimization Method of IR Thermography Facial Image Registration," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93501-93510, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927747.

[16] Z. -H. Zhan, Z. -J. Wang, H. Jin and J. Zhang, "Adaptive Distributed Differential Evolution," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 50, no. 11, pp. 4633-4647, Nov. 2020, doi: 10.1109/TCYB.2019.2944873.

[17] J. A. Malagoni. "Os Elementos Finitos no Estudo de Eletromagnetismo Utilizando os Software Gmsh/GetDP". M.S. thesis, PPGEELT, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2012.



Adelfcio M. Sobrinho é natural de Ituiutaba-MG, graduado em engenharia elétrica pela Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG) Campus Ituiutaba (1998), doutor (2019) em Ciências, pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). É professor adjunto III no colegiado da Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins (UFT). Tem experiência em comissionamento e ensaios de equipamentos de subestações de energia elétrica.



José R. Camacho concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica na University of Canterbury, Nova Zelândia em 1993. Atualmente, é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia. Membro Senior do IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas, Dispositivos de Potência, Geração Distribuída, Fontes Alternativas de Energia para o meio rural.



Rafael L. Carvalho possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Tocantins - UFT (2006), mestrado em Sistemas e Computação pelo Instituto Militar de Engenharia (2008) e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2016). Atua como professor adjunto UFT, curso de ciência da computação.



Sergio M. R. Sanhueza é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1998), Mestre (2002) e Doutor (2007) em Qualidade da Energia e Dinâmica de sistemas elétricos respectivamente. Atualmente é professor da Universidade Federal do Tocantins e suas linhas de pesquisa são tarifação de energia elétrica e impacto da geração distribuída no sistema de distribuição.



Stefani C. L. Freitas é Engenheira Eletricista pela Universidade do Estado de Minas Gerais - Campus da Fundação Educacional de Ituiutaba (2008). Mestre (2011) e Doutora (2014) em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Realizou estágio de doutoramento na Universidade do Minho - Portugal (2012). É professora no curso de bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins - UFT - Campus de Palmas. Suas atividades consistem em pesquisas relacionadas à implementação de supressores de distorções harmônicas, dispositivos eletromagnéticos, sistemas de tarifação, transmissão e distribuição de energia.