

# OTIMIZAÇÃO NO CÁLCULO DA PARTE ATIVA DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS VISANDO MELHOR EFICIÊNCIA E MENOR CUSTO

K. N. SOUZA<sup>1</sup>, S. C. A. SOUZA<sup>1</sup>, A. P. S. BRAGA<sup>1</sup>, R. S. T. PONTES<sup>1</sup>, J. A. NASCIMENTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DEPTO. DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CAMPUS DO PICI, S/N, CAIXA POSTAL 6001, 60.455-760 FORTALEZA, CE, CEARÁ, BRASIL  
E-MAILS: KLEYMILSON@DEE.UFC.BR, SAULO@DEE.UFC.BR, ARTHURP@DEE.UFC.BR,  
RICTHE@DEE.UFC.BR, ALMEIDA@DEE.UFC.BR

**Abstract**— This work presents a more efficient methodology, if compared to the traditional methods used, of sizing of the active part of a three-phase distribution transformer using one of optimization methods from Computational Intelligence. The use of Genetic Algorithms (GA) will assist in sizing the transformer parameters which will lead to reducing the amount of raw material used in manufacturing and, consequently, on the production costs reduction. Further, it is considered the commitment with the transformer quality and efficiency, respecting the settled limits by the NBR 5440/1999, sometimes treated as a requirement by the regulatory agency and a constraint by the GA.

**Keywords**— Genetic Algorithms. Optimization. Three-phase Distribution Transformers. Efficiency. Economy.

**Resumo**— Este trabalho apresenta uma metodologia mais eficiente, se comparada aos métodos tradicionais utilizados, de dimensionamento da parte ativa de transformadores trifásicos de distribuição utilizando um dos métodos de otimização da Inteligência Computacional. O uso de Algoritmos Genéticos (AG) auxiliará na determinação dos parâmetros do transformador que levará à redução da quantidade de matéria-prima utilizada na sua fabricação e, conseqüentemente, na minimização dos custos de produção. Considera-se o comprometimento com a qualidade e eficiência dos transformadores respeitando os limites estabelecidos pela NBR 5440/1999, ora tratados como exigência pelo órgão normativo e restrição pelo AG.

**Palavras-chave**— Algoritmos Genéticos. Otimização. Transformadores Trifásicos de Distribuição. Eficiência. Economia.

## 1 Introdução

Um projeto de transformadores bem executado reflete no desempenho e processo construtivo da máquina, atendendo aos critérios e condições estabelecidas pelos clientes e pelas normas vigentes. O rendimento, que varia de acordo com a operação, e o custo de produção são pontos de grande relevância na elaboração do projeto do transformador. Alternativas de melhoria do rendimento dos transformadores têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores, dentre eles Poltosi (2009), Georgilakis (2007) e Souza (2004). O aumento no rendimento da máquina contribui diretamente na eficiência do Sistema Elétrico, melhorando o potencial energético do país. Ações vêm sendo tomadas para incentivar esta forma de melhoria do sistema, podendo ser citado como exemplo a criação de mecanismos regulatórios como a etiquetagem, ou declaração na placa, das perdas do transformador. De acordo com Targosz (2009), incentivos obrigatórios de economia de energia fomentarão o desenvolvimento de melhores projetos de transformadores

O trabalho propõe uma estratégia de dimensionamento que considera as principais características construtivas dos transformadores de distribuição. Automatizar a forma de desenvolvimento do projeto e buscar o melhor modelo de dimensionamento do transformador, oferecendo menor custo de fabricação (parte ativa) e economia da matéria-prima, são foco deste trabalho.

Os transformadores de distribuição são classificados pela NBR 5440 (1999) de acordo com as po-

tências de operação, ou seja, são selecionados por classes. Portanto, as soluções de projeto obtidas com a metodologia proposta devem satisfazer as especificações das normas vigentes para suas respectivas classes.

## 2 Metodologia

Ferramentas de otimização, como Algoritmos Genéticos (AG), podem ser utilizadas em diversas aplicações e proporcionar resultados satisfatórios. O AG no dimensionamento de transformadores trifásicos de distribuição determinará valores os parâmetros iniciais que influenciam todo o cálculo do projeto, de forma a obter informações e dados operacionais e construtivos, como as dimensões do transformador que atendem aos limites estabelecidos pelas normas, pelo cliente e fabricante. A seção do fio a ser utilizado para suportar a densidade de corrente de projeto especificada deve ser determinada considerando sua disponibilidade comercial.

Os valores de densidade de corrente utilizados foram iguais ou inferiores aos valores utilizados nos projetos de referência fornecidos pelo fabricante. A escolha da densidade de corrente implica na busca do fio ideal, conseqüentemente, na corrente que este suporta e no número de espiras necessárias para gerar a densidade de fluxo magnético (B) desejada no núcleo.

Ao dimensionar o transformador, além das especificações elementares requisitadas pelo cliente (potência nominal, tensão de entrada e saída, frequên-

cia), é necessário que o projetista especifique a máxima indução magnética desejada, a qual deve variar entre 1.5T e 1.8T, segundo Oliveira (1984).

Nesta etapa inicial, também é necessário indicar a densidade de corrente da bobina de alta (d\_AT) e da bobina de baixa tensão (d\_BT). Diante destes valores, calcula-se a indução magnética nas bobinas a fim de verificar se o valor correspondente encontra-se dentro da faixa considerada, corrigindo-o caso não esteja. Além disso, verifica-se a disponibilidade comercial dos fios das bobinas para obter a densidade de corrente. De acordo com o fio escolhido, faz-se a correção da densidade de corrente. Com estes valores determinam-se os parâmetros restantes do transformador, verificando se estes atendem às exigências do fabricante e aos limites normalizados pela ABNT quanto às perdas no núcleo (WT), perdas no cobre (Wcu), tensão de curto-circuito (Vcc) e corrente de excitação (Io). Caso um ou mais parâmetros não atendam às exigências estabelecidas, deve-se ajustar nova indução magnética e densidade de corrente para que sejam calculados novamente os parâmetros do transformador. A Figura 1 mostra, de forma simplificada, as etapas do algoritmo desenvolvido.

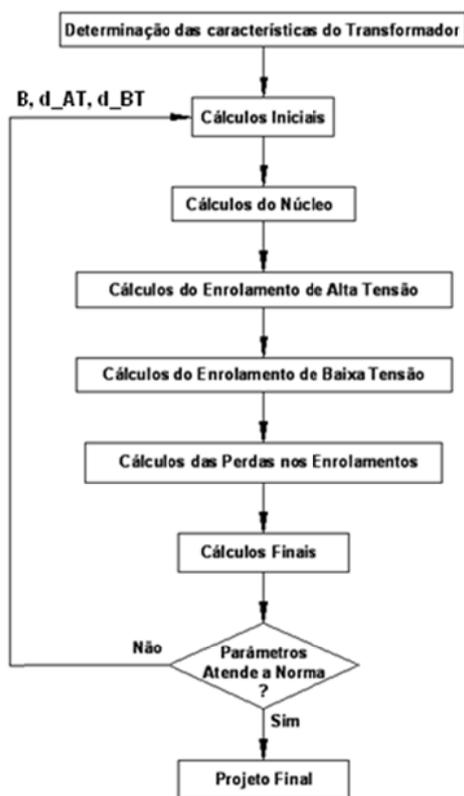


Figura 1. Busca dos parâmetros de projeto

O ajuste dos parâmetros iniciais B, d\_AT e d\_BT pode ser tratado como um problema de busca da melhor solução segundo um critério de avaliação que satisfaça às exigências impostas. Este problema pode ser solucionado com uso de AG, onde a função de fitness (1) descreve o critério que se deseja satisfazer (limites estabelecidos pela norma e redução dos custos).

$$A(i) = \{a_1 \cdot (CT) + a_2 [\text{máx}(0, (PN - PN_{nor}))] + a_3 [\text{máx}(0, (PT - PT_{nor}))] + a_4 [\text{máx}(0, (Ie - Ie_{nor}))] + a_5 [\text{máx}(0, (Vsc_{nor} - Vsc))]\} \quad (1)$$

Na equação 1, tem-se:

A(i) - função de avaliação ou *fitness* do indivíduo i

CT - custo total calculado

PN - perdas no núcleo calculada

PN<sub>nor</sub> - perdas no núcleo normalizada

PT - perda total calculada

PT<sub>nor</sub> - perda total normalizada

Ie - corrente de excitação calculada

Ie<sub>nor</sub> - corrente de excitação normalizada

Vsc - tensão de curto-circuito calculada

Vsc<sub>nor</sub> - tensão curto-circuito normalizada

a<sub>1,2,3,4,5</sub> = variáveis de normalização dos parâmetros

O AG implementado utiliza representação binária de 8 bits para cada parâmetro a ser ajustado. Dessa forma, cada indivíduo possui um cromossomo de 24 bits (Figura 2) e a busca ocorre num espaço de  $2^{24} = 16.777.216$  possíveis combinações.

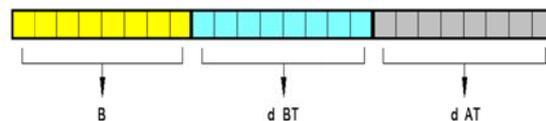


Figura 2. Representação de cada indivíduo/projeto

De acordo com dados fornecidos pela Construções Eletromecânicas S. A. – CEMEC, a indução magnética deve variar entre 1.69T e 1.81T enquanto a densidade de corrente deve variar entre 2.297 A/mm<sup>2</sup> e 3.436 A/mm<sup>2</sup>. Dessa forma, tem-se uma faixa de 0.12T para B e 1.139A/mm<sup>2</sup> para d\_AT e d\_BT.

A determinação dos valores de indução magnética e densidade de corrente torna-se difícil para o projetista tendo em vista a ampla faixa de valores e combinações possíveis destes parâmetros. Mesmo para o profissional experiente, a melhor combinação destes valores, ou seja, aquela que indica o melhor projeto do transformador, não é garantida. O AG também não garante a melhor solução, sendo uma heurística que consegue uma notável aproximação dos valores ótimos. O algoritmo desenvolvido testa 1000 gerações de 25 indivíduos, considerando que, à medida que as gerações evoluem, os indivíduos tendem a melhorar a combinação de seus genes, gerando indivíduos cada vez melhores (Figura 3).

Na metodologia proposta busca-se a combinação dos parâmetros B, d\_AT e d\_BT que satisfaz as restrições. Cada parâmetro influencia no resultado final. Dessa forma, caso a primeira variável esteja convergindo para um ponto melhor, a segunda variável pode estar mudando para um ponto no espaço de busca que levará a resultados ruins. Ainda, a primeira variável pode encontrar outro ponto de convergência melhor e diferente do ponto encontrado anteriormente e ainda sofrer influência da terceira variável.

O custo de fabricação do transformador é inversamente proporcional às perdas: quanto menor o custo, maiores são as perdas e vice-versa. Desta forma, a busca pelo melhor projeto consiste em determinar a perda associada ao menor custo.

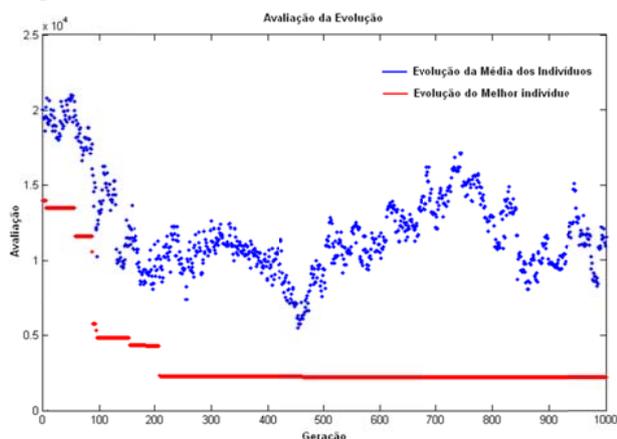


Figura 3. Evolução da avaliação da função de fitness

Conforme o objetivo do fabricante é possível fixar o custo e verificar a perda associada. A função de *fitness* é responsável pelas limitações na busca, podendo representar qualquer tipo de restrição.

### 3 Simulações e Resultados

A análise dos projetos desenvolvidos utilizando AG foi realizada através da comparação com os resultados encontrados pelo *software* APROC (Projeto Convencional), desenvolvido em Souza (2012), considerando as perdas totais e o custo da parte ativa do transformador.

A tabela 1 mostra os custos e as perdas calculadas para o mesmo projeto de transformador, utilizando o APROC e AG1. Seguindo limites de perdas estabelecidas por norma.

Analisando a tabelas 1 verifica-se que, quanto maiores as perdas, menor será o custo do transformador. A perda total representa a potência desperdiçada pelo transformador quando operando em condições nominais. Assim, apresentam-se tabelas que comparam os custos de fabricação da parte ativa e perdas do transformador utilizando metodologias diferentes para encontrar a melhor solução do transformador.

Tabela 1. Comparativo de perdas e custos entre APROC e AG1

kVA	Perda Total NORMA	Perda Total APROC	Perda Total AG1	Custo APROC (R\$)	Custo AG1 (R\$)
15	440	423	426	853,41	779,88
30	740	727	724	1.166,63	1.116,71
45	1000	1013	998	1.592,93	1.589,75
75	1470	1463	1449	2.241,42	2.210,85
112.5	1990	1979	1972	2.990,94	2.957,63
150	2450	2444	2390	3.936,37	3.450,49

A partir de perdas inferiores às definidas pela norma e de preços competitivos o fabricante agrega qualidade ao seu produto. Por outro lado, um transformador com perdas reduzidas ou maior eficiência utilizará maiores quantidades de matéria-prima, elevando seu custo de produção.

Ao utilizar AG, tem-se a liberdade de estabelecer como critério de preferência menor perda ou menor custo a fim de atender às normas vigentes e critérios de projeto. Para isso, considera-se tais critérios na função de *fitness*. A tabela 2 apresenta um comparativo das perdas totais e custo do transformador considerando o limite de perdas estabelecido por norma (AG1) e 95% deste limite (AG2). Os custos foram obtidos de acordo com o preço por peso (R\$/kg) da matéria-prima no mercado até a data de realização deste trabalho.

Tabela 2. Comparativo de perdas e custos entre AG1 e AG2

kVA	Perda Total Limite 1 NORMA	Perda Total Limite 2 95% NORMA	Perda Total AG1	Perda Total AG2	Custo AG1 (R\$)	Custo AG2 (R\$)
15	440	418	426	410	779,88	819,34
30	740	703	724	692	1.116,71	1.165,53
45	1000	950	998	932	1.589,75	1.672,77
75	1470	1397	1449	1395	2.210,85	2.274,69
112.5	1990	1891	1972	1888	2.957,63	2.993,31
150	2450	2328	2390	2319	3.450,49	3.674,35

### 4 Discussão

Ao comparar os valores de custo e perda total do transformador, obtidos nos dois modelos, observou-se que, em todos os casos simulados, o AG encontrou uma solução melhor em relação ao custo e que atendeu a todas as limitações impostas por normas. Entretanto, em alguns casos, o método convencional apresentou menores perdas. Isso implica dizer que os parâmetros apresentados no modelo convencional não são, economicamente, os melhores para determinação dos parâmetros do transformador. Através de mudanças na função de *fitness* do AG verifica-se que, mesmo com um custo inferior ao determinado pelo método convencional, é possível tornar as perdas dos projetos utilizando AG ainda menores.

### 5 Conclusões e Perspectivas Futuras

Torna-se evidente mais uma maneira de dimensionar o núcleo e as bobinas dos transformadores trifásicos de distribuição. O uso de Algoritmos Genéticos (AG) na otimização deste processo de dimensionamento proporcionou melhoria na escolha do projeto do transformador, reduzindo o custo de produção em até 12% e as perdas em até 8%. Modificações na função de *fitness* do AG adequam-se facilmente a

possíveis novas exigências e limites estabelecidos pelo órgão normativo.

Como trabalho futuro, pretende-se repetir o processo de dimensionamento da parte ativa dos transformadores trifásicos de distribuição utilizando Otimização por Nuvem de Partículas, a fim de comparar o desempenho dos métodos utilizados na solução do problema abordado.

### **Agradecimentos**

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Construções Eletromecânicas S. A. – CEMEC, Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

### **Referências Bibliográficas**

Georgilakis, P.S.; TSILI, M.A.; SOUFLARIS, A.T. "A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no. 1-3, pp. 260-266, January 2007.

Targosz R.; TOPALIS, F. V. "Eficiência energética de transformadores de distribuição", *Eletricidade Moderna*, vol. 37, no. 422, pp.106-113, Maio 2009.

NBR 5440 (Associação Brasileira de Normas Técnicas): Transformadores para redes aéreas de distribuição – Padronização. Rio de Janeiro, 1999.

Oliveira, J.C. Transformadores: Teoria e Ensaios, Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 1984.

Souza, A.N.; AMARAL, F.C.L.; PORTO, L.G.C.; MANFRIATO, J.W. de S.; SALGADO, M.H.; ZAGO, M.G. "Aplicação de redes neurais artificiais para melhorar a eficiência de transformadores de distribuição relacionada ao processo de fabricação", in XI SIMPEP, pp.1-10, 2004.

Souza, K. N.; BRAGA, A. P. S. ; SOUSA, R.; PONTES, R. S. T. ; ALMEIDA, O. ; MURTA, A. . Metodologia de Projeto para Redução de Perdas da parte Ativa do Transformador de Distribuição Trifásico Utilizando Algoritmos Genéticos. 2012.

Poltosi, L.A.C.; LEMKE, N. "Aplicação de Algoritmos Genéticos no projeto de transformadores", *Revista Liberato*, vol. 10, nº.14, pp.167-174, Julho/Dezembro 2009.