

METODOLOGIA DE PROJETO PARA REDUÇÃO DE PERDAS DA PARTE ATIVA DO TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

KLEYMILSON N. SOUZA, ARTHUR P. S. BRAGA, RAFAEL OLIVEIRA, ARTHUR H. F. MURTA, RICARDO S. T. PONTES, OTACÍLIO M. ALMEIDA

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará
Caixa Postal 6001 - Campus do Pici, 60.455-760 Fortaleza - CE*

E-mails: {kleymilson, arthursp, rafael_oliveira, ricthe, otacilio} @dee.ufc.br, murta@alu.ufc.br

Abstract — The work proposes a methodology for the active part (the scaling of the core and coils) three phase distribution transformers which aims to reduce the electrical losses of equipment. To this end, we use Genetic Algorithms (GA) to optimize the choice of input parameters of the project. The simulation results are promising, with an estimated reduction of up to 6.8% in losses of equipment designed with the proposed method in comparison with the conventional method. With changes in the fitness function of genetic algorithm (GA) can be incorporated in a simple, new design requirements and any updates to standards.

Keywords — Project Transformers, Power Losses, Computational Intelligence, Genetic Algorithms, Distribution Transformer Three Phase.

Resumo — O Trabalho propõe uma metodologia para projeto da parte ativa (o dimensionamento do núcleo e das bobinas) de transformadores de distribuição trifásicos que visa reduzir as perdas elétricas do equipamento. Para tal, utiliza-se Algoritmos Genéticos (GA) para otimizar a escolha dos parâmetros de entrada do projeto. Os resultados em simulação são promissores, com redução estimada de até 6,8% nas perdas dos equipamentos projetados com a metodologia proposta em comparação com a metodologia convencional. Com modificações na função de *fitness* do Algoritmo Genético (GA) pode-se incorporar, de maneira simples, novas exigências de projeto e eventuais atualizações em normas.

Palavras-chave — Projeto de Transformadores, Perdas Elétricas, Inteligência Computacional, Algoritmos Genéticos, Transformador de Distribuição Trifásico.

1 Introdução

O sistema elétrico do mundo inteiro depende de transformadores para viabilizar a transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo, portanto necessário o estudo desses equipamentos para tornar mais eficiente o sistema como um todo. Assim, o projeto de um transformador de distribuição deve satisfazer especificações normatizadas que buscam estabelecer um patamar mínimo satisfatório para eficiência destes equipamentos. Entre essas especificações estão as perdas elétricas esperadas. Cada transformador apresenta perdas no núcleo e nas bobinas que dependem do dimensionamento de sua parte ativa.

Ao se reduzir perdas de energia dissipadas quando o transformador encontra-se em operação, ou simplesmente ligado à rede de distribuição, tem-se uma contribuição na redução de energia desperdiçada e também preservação do meio ambiente. Pensando nisso normas [1] que regulamentam padrões para os transformadores vem sendo atualizadas com o intuito de diminuir esses desperdícios. Além disso, ações do Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL) e do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) vêm atuando junto às empresas fabricantes de transformadores para que se realize a etiquetagem com o nível de eficiência do equipamento, de forma semelhante ao que já ocorre com outros equipamentos como Geladeiras e Ar-condicionado.

O grande desafio hoje é fabricar transformadores com maior rendimento e que seu custo não fique elevado. Segundo estudos da Confederação Nacional da Indústria (CNI), as empresas brasileiras têm condições técnicas para produzir transformadores 30% mais eficientes que os disponíveis no mercado.

Para buscar maior eficiência no projeto de transformador e rendimento para redução de perdas pode-se seguir basicamente duas abordagens: (i) Mudanças na matéria prima construtiva como, por exemplo, o uso de liga amorfa ou bobinas com fio de alumínio. (ii) Mudanças no dimensionamento da construtiva com a matéria prima já utilizada na fábrica. No artigo proposto foi desenvolvida a segunda opção (mudança dimensionais), pois não faz necessário mudanças na linha de produção.

Ao projetar um transformador de maneira convencional o projetista não explora todas as possibilidades para saber qual a que possui menor perda, maior rendimento e viabilidade de produção das milhares de soluções possíveis. Ao utilizar ferramentas de busca como Algoritmos Genéticos (GAs) o projetista também não pode garantir que a solução encontrada é a ideal, porém a busca direcionada e o número de testes na escolha do melhor projeto são bem maiores sendo grandes as chances de sucesso comparado com o projeto feito de maneira tradicional [2].

O trabalho possui, além desta, mais cinco seções assim divididas: Seção 2 (Dimensionamento da Parte

Ativa sob normas) descreve a parte ativa, quais os passos para realizar o cálculo do transformador e quais são os parâmetros de entrada utilizados no cálculo do transformador, a Seção 3 (Ambiente de Projeto Convencional - APROC), mostra um *software* desenvolvido para o cálculos e simular o transformador seguindo o modelo da empresa local, a Seção 4 (Algoritmos Genéticos - GAs), apresenta a forma como esta ferramenta é implementada no Cálculo do transformador e de que forma é possível fazer milhares de projetos avaliando-os, a Seção 5 (Análise dos resultados), analisa tabelas comparando a previsão de perdas nos projetos realizados das duas maneiras.

2 Dimensionamento da Parte Ativa sob norma

Ao projetar um transformador, diversas variáveis dependem de decisões tomadas pelo projetista: características construtivas da forma pela qual o enrolamento é projetado, tipo de núcleo do transformador, características dimensionais, tipo de ligação das bobinas, tipo de isolante, líquido isolante, local de instalação do transformador. São inúmeras as variáveis que pode influenciar no projeto final do transformador [3].

Como ponto de partida têm-se valores estipulados pela norma NBR-5440 a qual deve ser seguida.

2.1 Parte Ativa

Os Transformadores de modo geral são divididos em partes Elétrica e Mecânica. O projeto Elétrico está destinado a fazer todos os cálculos relativos aos limites de tensão, corrente, dimensionamento do transformador, além da previsão de perdas e limites fornecidos pela norma NBR-5440 [1]. A parte mecânica destina-se, principalmente, ao cálculo estrutural e termodinâmico. Para este trabalho, o projeto da parte ativa do transformador, formada pelo núcleo e pelas bobinas, é o foco de estudo.

Para o correto dimensionamento do Núcleo e das Bobinas se fazem necessários os cálculos dimensionais destas partes e da previsão de valores estabelecidos por Normas. A Previsão, por exemplo: de perdas no núcleo, perdas nos enrolamentos, tensão de curto-circuito e corrente de excitação são alguns pontos importantes que influenciarão nas dimensões do núcleo e das bobinas (Parte Ativa) [5].

As previsões de perdas são baseadas em equações empíricas, essas equações são particulares de cada empresa, pois dependem do processo, equipamentos e das limitações disponíveis nas fábricas. Neste trabalho, a previsão das perdas e equações para os cálculos dimensionais foram feitas tendo por base os cálculos dos transformadores projetados pela empresa CEMEC (Construções Eletromecânicas S.A.).

2.2 Cálculo do Transformador

Passos devem ser seguidos para o cálculo do transformador e para correto dimensionamento da parte ativa.

As principais dimensões do equipamento e a previsão de perdas deste obedecem aos parâmetros presentes na Figura 1 e as variáveis assim discriminados: DN, SF_BT, SF_AT, NE_BT, NE_AT.

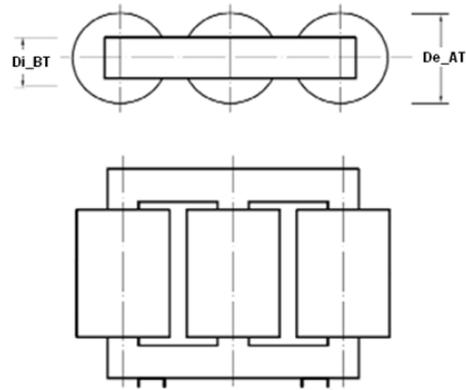


Figura 1. Núcleo e Bobina do Transformador (Parte Ativa)

Sendo:

Di_BT = Diâmetro interno da bobina de baixa tensão.

De_AT = Diâmetro externo da bobina de alta tensão.

DN = Diâmetro do núcleo.

SF_BT = Seção do fio da bobina de baixa tensão.

SF_AT = Seção do fio da bobina de alta tensão.

NE_BT = Número de espira da bobina de baixa Tensão.

NE_AT = Número de espira da bobina de alta Tensão.

Os cálculos são realizados de acordo com os parâmetros de entrada e de dados principais para o correto dimensionamento do transformador.

2.3 Parâmetros de Entrada

Sabendo-se das especificações estabelecidas pelo cliente, as correntes, tensões do sistema e fio utilizado, faz-se a determinação do dimensionamento do núcleo, levando em consideração o fluxo magnético induzido, estabelecendo e tendo uma previsão das perdas no núcleo seguindo a sequência conforme a Figura 2.

Os cálculos de maneira tradicional são realizados conforme Figura 2. no qual, ao termino, é verificado se atende as especificações estabelecidas por norma. Caso contrário, pela experiência do projetista altera-se a densidade de fluxo magnético (B) desejado, ou a densidade de Corrente na Bobina de Baixa tensão (d_BT) ou a densidade de corrente da Bobina de Alta Tensão (d_AT). Fazendo estas devidas alterações o projetista esta mudando características construtivas como a seção do núcleo e a espessura do fio da bobina.

na de baixa tensão e alta tensão [6], [7].

Quando os parâmetros de entrada (B , d_{AT} , d_{BT}) que satisfazem a norma são encontrados, o projeto está completo, ainda que isso não seja suficiente para garantir que o projeto finalizado é o melhor.

Com uso de ferramentas computacionais, como Algoritmos Genéticos (GA), é possível fazer uma busca onde tem a possibilidade de encontrar o melhor projeto de forma mais eficiente e com melhor chance de garantia que a feita de forma tradicional.

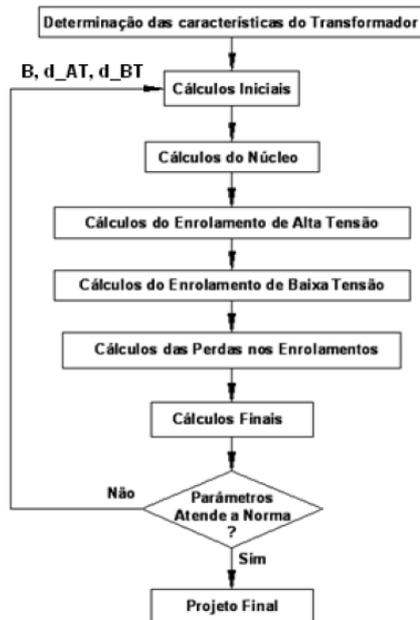


Figura 2. Sequencia de cálculos para dimensionamento da Parte Ativa e previsão de perdas

3 Ambiente de Projeto Convencional - APROC

Durante o estudo do cálculo da parte ativa do transformador de distribuição foi gerado um *software* o qual foi nomeado como Ambiente de Projeto Convencional – APROC, sendo possível o cálculo do transformador seguindo os padrões da empresa local fabricante de transformadores. Com uso do APROC, pode-se facilmente mudar os parâmetros iniciais de cálculo e obter valores dimensionais de transformadores e previsão de perdas do equipamento, similar aos fabricados [11].

Diversos testes feito com o *software* mostrou que o nível de acerto em relação à empresa é de 98%. Na Figura 3 pode-se observar a interface do *software*.

Com uso do *software* desenvolvido para o trabalho foi possível adicionar ferramentas como Algoritmos Genéticos – GAs, facilitando encontrar os melhores valores iniciais de calculo que os propostos e

apresentados pela empresa fabricante.

Para validar o *software* feito utilizando o MATLAB® e o Ambiente de Projeto Convencional, foram comparados os valores de saída do *software* com os valores de projetos feitos pelo fabricante CEMEC (Construções Eletromecânicas S. A.). Os valores não são exatos, pois a forma utilizada pela empresa tem mais detalhes empíricos que depende do processo de fabricação. Pode-se comparar os valores de saída e entrada na Tabela 1.

Tabela 1. Tabela Comparando dados de Entrada da Empresa CEMEC e Saída do APROC para o Trafo de 15 kVA.

Trafo de 15 kVA (220)		
VARIÁVEIS	CEMEC	APROC
Dados de entrada		
kVA	15	15
AT	13800	13800
BT	220	220
f	60	60
Ndeg	4	4
B	1,710	1,711
d _{BT}	2,297	2,297
d _{AT}	2,809	2,809
EF	7	7
Dados de Dimensionamento		
DN _{mm}	79	82
DiBT	81	85
DeBT	103	113
DiAT	116	126
DeAT	159	172
SF _{BT}	17,14	17,19
SF _{AT}	0,128	0,163
NE _{BT}	69	64
NE _{AT}	7497	6954
Dados de Material		
Peso _{BT}	9,4	9,09
Peso _{AT}	11	14,16
Peso _{Fe}	41,4	44,71
Dados Normas		
Wcu	332	320
Wfe	96	102
WT	428	423
Vcc	3,53	3,58
lo	4,36	4,35

Figura 3. Ambiente de projeto convencional - APROC

4 Algoritmos Genéticos - GAs

Algoritmos Genéticos são especialmente usados para encontrar solução de problemas com um grande espaço de busca, problemas com muitas restrições e com diversos parâmetros com grande possibilidade de combinações. Que é o caso do projeto do transformador [3], [8].

A ideia ao utilizar Algoritmo Genético (GA) é que ele seja capaz de evoluir uma população de soluções candidatas de um determinado problema, de modo que um operador inspirado por variação genética natural e seleção natural encontrará melhor solução [4]. Dessa forma, na Figura 3, pode-se observar como é desenvolvido o processo de busca e escolha da melhor solução.

O GA implementado utiliza representação binária de 8 bits, ou seja, cada indivíduo possui um cromossomo de 24 bits conforme Figura 4. Assim, a busca ocorrerá em um espaço de $2^{24} = 16.777.216$ possíveis combinações. No caso da Indução magnética, que varia de 1,69 a 1,81 Tesla, tem-se uma faixa de $(1,81 - 1,69 = 0,12 \text{ T})$ e no caso da densidade de corrente tem uma faixa de $(3,436 - 2,297 = 1,139 \text{ A/mm}^2)$.

Cada indivíduo gera uma solução das dimensões do transformador e, também, de previsão das perdas no transformador: a partir disso, será avaliado como melhor indivíduo aquele que melhor atender às normas. Os indivíduos com melhores avaliações serão selecionados para gerar novos indivíduos, formado, assim, uma nova geração de soluções [9].

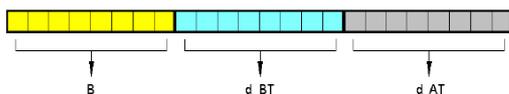


Figura 4. Indivíduo ou cromossomo formado por 24 bits

Quando gera-se um conjunto de soluções (população) utilizando algoritmo genético, esses projetos são avaliados individualmente, recebendo uma nota de acordo com a necessidade e limitações impostas pelo fabricante e pelas normas. Para fazer essa avaliação,

o Algoritmo Genético (GA) utiliza uma equação de *fitness* (Equação 1) a qual possui a forma ao avaliar cada projeto e associar uma nota. A Avaliação do melhor indivíduo está apresentada na Figura 6.

$$Avaliação(i) = \{\alpha_1 \cdot (\text{Custo total}) +$$

$$\alpha_2 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda no Núcleo} - \text{Norma Perda no Núcleo}))] +$$

$$\alpha_3 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda Total} - \text{Norma Perda Total}))] +$$

$$\alpha_4 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Corrente de Exitação} - \text{Norma Corrente de Exitação}))] +$$

$$\alpha_5 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Norma Tensão de Curto circuito} - \text{Tensão de Curto circuito}))]$$

Equação 1. Função de avaliação

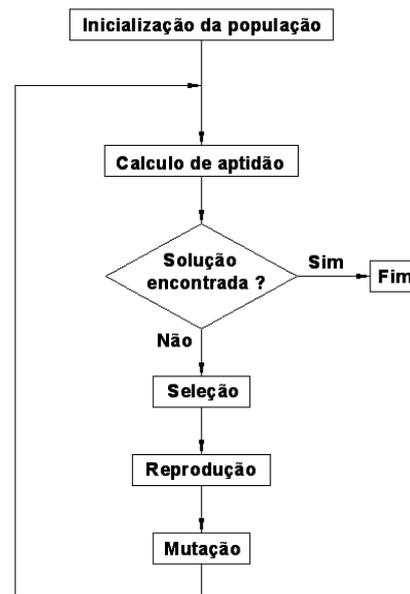


Figura 5. Passos para implementação do GA

Nesse trabalho, em diversos ensaios, observou-se que após a geração 500 quase não há mais modificação no melhor indivíduo; sendo o critério de parada escolhido o número de gerações, no qual 1000 foi a escolha do número de gerações e o critério de parada para este problema. Pode-se observar na Figura 5 que este número de geração atende às necessidades de busca [11].

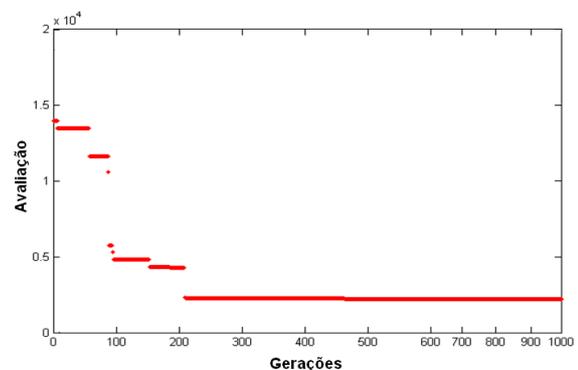


Figura 6. Avaliação da Evolução do Melhor Indivíduo utilizando GA

Outra consideração no algoritmo é que existe elitismo, ou seja, o melhor indivíduo sempre permanece na próxima geração, essa é uma forma de não perder a melhor solução caso esta já tenha sido encontrada [10].

Tabela 2. Solução encontradas pela forma tradicional e pelo uso de GA.

Trafo de 15 kVA (220 V)		
VARIÁVEIS	APROC	GA
Dados de entrada		
KVA	15	15
AT	13800	13800
BT	220	220
f	60	60
Ndeg	4	4
B	1,711	1,788
d_BT	2,297	2,735
d_AT	2,809	1,980
EF	7	7
Dados de Dimensionamento		
DN_mm	82	80
DiBT	85	83
DeBT	113	107
DiAT	126	120
DeAT	172	170
SF_BT	17,19	14,38
SF_AT	0,163	0,183
NE_BT	64	64
NE_AT	6954	6953
Dados Normas		
Wcu	320	313
Wfe	102	97
WT	423	410
Vcc	3,58	3,57
Io	4,35	4,02

5 Análise dos Resultados

Simulando-se o algoritmo utilizando GA para vários projetos de transformadores com potências diferentes montou-se a Tabela 2 na qual podem comparar dados gerados pelo GA com valores calculados de forma tradicional. Como resultado para um transformador de 15 kVA pode-se comparar os parâmetros de entrada e Dados Dimensionais e cálculo das perdas de forma tradicional e pelo Algoritmo Desenvolvido utilizando GA.

Ao desenvolver vários projetos utilizando a meto-

dologia pode-se montar a Tabela 3 comparando as diversas saídas indicando o quanto melhorou as perdas em cada projeto de transformador.

Verifica-se na Tabela 3 a previsão de perda total dos transformadores projetados de forma convencional em comparação com os projetados com uso de GA em seu processo. Dessa forma, é possível comparar a norma [1] com o valor total das perdas.

Tabela 3. Resultado comparativo das simulações com uso do APROC e GA comparando com a NORMA.

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES				
kVA	Perda Total NORMA	Perda Total APROC	Perda Total GA	Melhora (%)
15	440	423	410	3,1
30	740	727	692	4,8
45	1000	1000	932	6,8
75	1470	1463	1395	4,6
112.5	1990	1979	1888	4,6
150	2450	2444	2319	5,1

6 Conclusão

Nesse trabalho, partiu-se do projeto do transformador, utilizando equações fornecidas pelo fabricante, entretanto, incorporou-se o diferencial de buscar melhorar a solução tradicional com uso de Algoritmo Genético, possibilitando compatibilizar eficiência ao realizar uma busca de valores de parâmetros iniciais que levassem ao melhor transformador e que atendessem às limitações impostas.

Ao comparar os valores da perda total dos transformadores, obtidos nos dois modelos, observou-se que, em todos os casos simulados, o GA encontrou uma solução mais satisfatória e que atendeu às limitações impostas por normas.

O uso de outras ferramentas metaheurísticas, como o PSO (Otimização por enxame de partículas), foi testado assim como os de GAs, segue Tabela 4 com dados comparativos dos resultados com uso do APROC, PSO e GA para o Transformador de 15 kVA.

Tabela 4. Resultado de simulações com uso do APROC, GA, PSO comparado com a NORMA.

TRANSFORMADORES DE 15 kVA				
	APROC	GA	PSO	NORMA
Perda no Cobre	320	313	330	340
Perda a Vazio	102	97	96	100
Perda Total	422	410	426	440

Agradecimentos

Os autores agradecem aos envolvidos no trabalho os quais fazem parte do grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Agradece ao grupo de pesquisa da empresa CEMEC pelas instalações disponibilizadas e apoio nos cálculos dos transformadores. E também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- [1] NBR 5440 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS): Transformadores para redes aéreas de distribuição – Padronização. Rio de Janeiro, 1999.
- [2] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis and E. Litsos, “Methodology for the optimum design of power transformers using minimum number of input parameters”, in Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM 2006), pp. 1-6, 2006.
- [3] N. D. Doulamis, A. D. Doulamis, P. S. Georgilakis, S. D. Kollias and N. D. Hatzirygiou, “A synergetic neural network-genetic scheme for optimal transformer construction”, Integrated Computer-Aided Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 37-56, 2002.
- [4] K. N. SOUZA; T. N. CASTRO, T. M. PEREIRA, R. S. T. PONTES and A. P. S. BRAGA, “Prediction of Core Losses on a Three-Phase Transformer using Neural Networks”, in ISCAS, pp.1105-1108, 2011.
- [5] L.H. GEROMEL, “Aplicação de sistemas inteligentes em projetos de transformadores de potência”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003,144p.
- [6] P. S. GEORGILAKIS, “Recursive genetic algorithm-finite element method technique for the solution of transformer manufacturing cost minimisation problem”, IET Electric Power Applications, vol. 3, no. 6, pp. 514-519, 2009.
- [7] P. S. GEORGILAKIS, Spotlight on Modern Transformer Design, Springer, London, UK, 2009.
- [8] I. A. ELEFThERIOS, A. T. MARINA and G. K. ANTONIOS, “Transformer Design and Optimization: A Literature Survey”, Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp 1999-2024, october 2009.
- [9] R. LINDEN, Algoritmos Genéticos, 1ª Edição, Ed. Brasport, 2008.
- [10] D. E. GOLDBERG, K. Milman, and C. Tidd, “Genetic Algorithms: A Bibliography”, Department of General Engineering, University of Ollinois, report n° 92008, july, 1992.
- [11] SOUZA, K. N. Otimização no Cálculo da Parte Ativa do Transformador de Distribuição Trifásico com Uso de Algoritmos Genéticos Visando Melhor Eficiência e Menor Custo. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2012.