

Aplicação do Algoritmo Genético na Otimização do Projeto de Transformador Trifásico de Distribuição

Daniel S. Souza

Colegiado de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bom Jesus da Lapa, BA, Brasil
daniel.s2275@ufob.edu.br

Kleymilson N. Souza

Colegiado de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bom Jesus da Lapa, BA, Brasil
kleymilson.souza@ufob.edu.br

Layse S. Inocêncio

Colegiado de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bom Jesus da Lapa, BA, Brasil
inocenciolayse@gmail.com

Stefânia O. Silva

Colegiado de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bom Jesus da Lapa, BA, Brasil
stefania.silva@ufob.edu.br

Resumo—Diante da necessidade de equipamentos mais eficientes e com menor custo de fabricação, as indústrias de transformadores de distribuição buscam novas tecnologias para aprimorar seus projetos. Este trabalho tem como objetivo realizar o dimensionamento da parte ativa de um transformador trifásico de distribuição, utilizando a técnica de inteligência computacional com algoritmo genético, visando minimizar o peso total da matéria-prima e atender às normas de eficiência vigentes. Foram testadas e avaliadas três situações distintas, nas quais as funções de custo do algoritmo foram modificadas. No primeiro caso, o objetivo foi minimizar as perdas respeitando as normas. No segundo caso, buscou-se minimizar as perdas, mantendo-as 5% abaixo do limite estipulado por norma. No terceiro caso, procurou-se otimizar tanto as perdas quanto a massa do transformador. A partir dessa implementação, foi possível traçar a superfície de busca do algoritmo genético, revelando a dimensão do espaço de busca do projeto. Além disso, verificou-se que a redução das perdas implica em um maior custo. O algoritmo genético obteve sucesso na busca pelo transformador ótimo e é uma excelente ferramenta para auxiliar os projetistas.

Index Terms—Algoritmos Genéticos, Modelagem, Otimização, Perdas Elétricas, Transformadores Trifásicos.

I. INTRODUÇÃO

Os transformadores desempenham um papel fundamental nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles permitem a alteração dos níveis de tensão e corrente de um sistema elétrico de forma simples e eficiente, possibilitando a distribuição de energia em tensões economicamente viáveis e adequadas aos equipamentos dos consumidores [1]. No contexto específico dos transformadores de distribuição trifásicos, sua função é converter a energia proveniente de linhas de alta tensão para valores seguros utilizados em instalações de baixa tensão [2].

Os autores expressam seu agradecimento à instituição financiadora da bolsa de Iniciação Científica PIBIC - CNPq, bem como à UFOB (Universidade Federal do Oeste da Bahia), por proporcionarem o suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Nos últimos anos, tem havido um aumento significativo nas pesquisas que propõem abordagens para aprimorar e estabelecer os principais parâmetros nos projetos de transformadores. Dentre essas abordagens, destacam-se a otimização por programação quadrática sequencial aplicada a transformadores de distribuição, técnicas que utilizam algoritmos evolutivos [3] [4] [7] e a programação paralela para otimização do projeto global de transformadores de potência [8]. Além disso, os conceitos de otimização por Enxame de Partículas (EP) [9] também são dignos de destaque.

Uma das estratégias utilizadas para aprimorar esses projetos é a simulação computacional, como evidenciado nos estudos apresentados em [10] [12], que empregam métodos de elementos finitos no projeto de transformadores. Essa abordagem permite uma modelagem mais precisa do comportamento e das características desses dispositivos, fornecendo *insights* valiosos para a otimização dos parâmetros.

É relevante destacar dois estudos que integram os métodos de Algoritmos Evolutivos e Método de Elementos Finitos. Essas abordagens são empregadas com o objetivo de minimizar a massa total da parte ativa e/ou o custo do transformador, validando a eficácia das otimizações realizadas nos dispositivos, como evidenciado nos estudos [2] e [13]. Essas pesquisas demonstram a aplicação prática dessas estratégias de otimização e os resultados positivos obtidos.

Esses trabalhos representam um avanço significativo na área da otimização de transformadores. Ao utilizar abordagens como a otimização por programação quadrática sequencial, algoritmos evolutivos, programação paralela, métodos de elementos finitos e otimização por Enxame de Partículas, é possível aprimorar os projetos de transformadores, resultando em dispositivos mais eficientes e economicamente sustentáveis. Essas melhorias são de extrema relevância, uma vez que contribuem para o desenvolvimento de sistemas elétricos mais eficientes e sustentáveis, atendendo de maneira mais eficaz às crescentes demandas por energia.

Este artigo apresenta uma metodologia de modelagem e otimização para transformadores trifásicos de distribuição. O foco é o projeto da parte ativa do transformador, incluindo os parâmetros de entrada necessários para o cálculo adequado. Além disso, é introduzido um software desenvolvido com base no projeto analítico do transformador, que utiliza o Algoritmo Genético (GA) para otimização do projeto. Com essa ferramenta, é possível explorar o espaço de busca por meio de uma superfície que evidencia os máximos e mínimos locais aos quais o projetista pode estar limitado. Além disso, é realizada uma análise da curva de evolução e convergência do GA, comparando os projetos tradicionalmente realizados, sem a aplicação de técnicas de inteligência, com aqueles que receberam assistência do algoritmo.

Ao adotar essa metodologia de modelagem e otimização, espera-se alcançar resultados aprimorados no projeto de transformadores trifásicos de distribuição. A utilização do GA como ferramenta de otimização permite explorar um espaço de soluções mais amplo, levando em consideração os diversos parâmetros avaliados durante o projeto. Essa abordagem contribui para o aprimoramento dos projetos, buscando maior eficiência e desempenho dos transformadores de distribuição.

II. O TRANSFORMADOR

O transformador é composto por três elementos essenciais para o seu funcionamento: enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo. O enrolamento primário está conectado à fonte de energia e é constituído por um determinado número de espiras feitas de um material condutor, geralmente cobre ou alumínio. O enrolamento secundário está ligado à carga e também é composto por um material condutor semelhante ao do enrolamento primário [14]. O núcleo desempenha a função de conduzir o fluxo magnético e é feito de um material com baixa relutância magnética, como aço silício laminado ou metal amorfo com base em aço ou cobalto, o que ajuda a reduzir as perdas causadas pelas correntes de Foucault. É sobre o núcleo que os enrolamentos primário e secundário são dispostos [15].

A. Parte Ativa do transformador

A construção do transformador é dividida em parte elétrica e mecânica. O projeto elétrico engloba cálculos relacionados aos limites de tensão, corrente, dimensionamento do transformador, além da consideração de perdas e limites estabelecidos pelas normas [16]. Já a parte mecânica envolve principalmente cálculos estruturais e termodinâmicos [17]. A parte ativa do transformador, que consiste na composição do núcleo de ferro juntamente com as bobinas de cobre, é o foco de estudo deste trabalho. O dimensionamento do núcleo e das bobinas é influenciado por diversos fatores, como perdas, tensão de curto-circuito e corrente de excitação. Esses valores devem atender às exigências normativas, impactando nas dimensões finais da parte ativa e, conseqüentemente, no peso total do transformador. A previsão desses valores finais é obtida por meio de equações empíricas que são ajustadas de acordo com o

método de fabricação de cada empresa. Neste trabalho, adotouse o processo de cálculo da parte ativa e estimativa de perdas apresentado em [18].

B. Cálculo da parte Ativa

O dimensionamento adequado da parte ativa do transformador conforme ilustrado na Figura 1, requer seguir uma sequência de etapas que culminam no projeto final. As principais dimensões avaliadas no projeto são:

- 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 espiras da bobina de baixa Tensão;
- NE_AT: Número de espiras da bobina de alta Tensão.

Estas são as dimensões finais obtidas após a realização do projeto do transformador e são utilizadas para a sua fabricação.

C. Fluxo de Dimensionamento da Parte Ativa

O fluxo de trabalho para alcançar um projeto bem-sucedido do transformador é descrito no fluxograma apresentado na Figura 2. Nele, o projetista segue os passos de cálculo com base nas características especificadas pelo cliente e nas restrições normativas. O projetista verifica se os valores de perdas, tensão de curto-circuito e corrente de excitação estão de acordo com as normas. Caso contrário, o projetista deve ajustar um ou mais dos valores de entrada até que o projeto esteja em conformidade com as normas.

Com base no estudo do projeto da parte ativa do transformador, foi desenvolvido um software, conforme mostrado na Figura 3, que permite realizar esse dimensionamento de acordo com as diretrizes apresentadas em [18]. Essa ferramenta permite que o projetista varie os parâmetros de entrada para obter o projeto final. No entanto, encontrar a combinação perfeita desses parâmetros e obter uma solução otimizada ainda pode ser desafiador para o projetista. Portanto, é necessário implementar um algoritmo inteligente que auxilie na busca pelo transformador ideal.

III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos evolucionários que utilizam modelos computacionais inspirados nos processos naturais de evolução como uma ferramenta para a solução de problemas. Baseados no processo biológico de evolução, os algoritmos genéticos são técnicas heurísticas de otimização que visam encontrar o mínimo ou máximo global [19].

Esses algoritmos tratam-se de técnicas de busca otimizada baseadas em mecanismos de seleção genética, que devem ser aplicadas a problemas complexos em que métodos numéricos tradicionais não são viáveis devido à complexidade do problema ou à grande dimensionalidade do espaço de soluções, tornando os testes exaustivos e inviáveis.

Em princípio, os AGs utilizam técnicas que procuram encontrar boas soluções à medida que novas gerações são

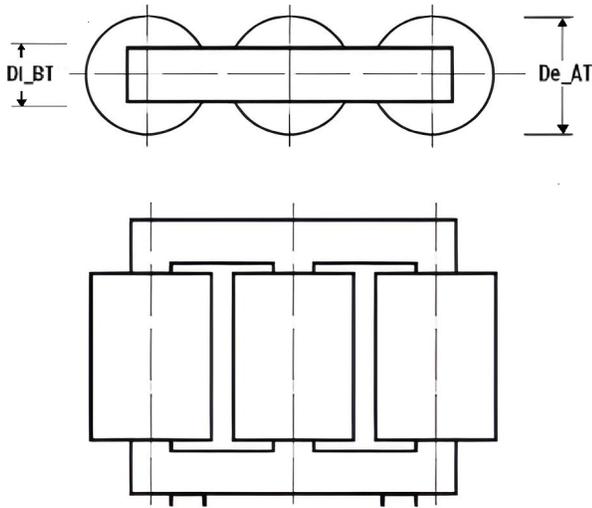


Figura 1. Dimensões da parte ativa do transformador.

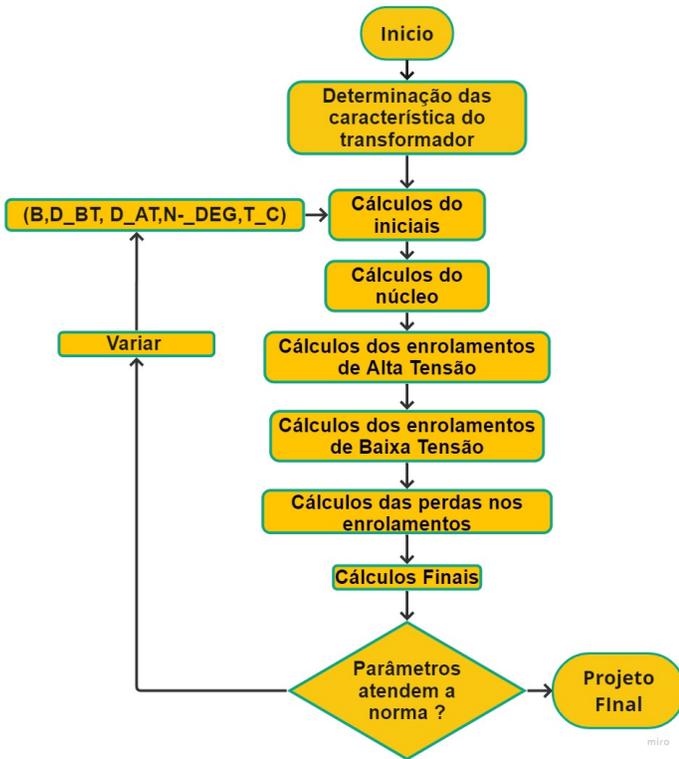


Figura 2. Fluxograma do cálculo da parte ativa.

The screenshot shows a software interface for transformer design. It is divided into several sections:

- DADOS DE ENTRADA:** Fields for Potência(KVA), Frequência(Hz), Perdas En (W), Perdas Fe (W), Tensão AT V (V), and Preço do Cobre (R\$).
- DADOS DE SAÍDA:** Fields for Enrolamento AT, N, I Fio, Tensão de Di ext, N°, d AT, PHLC, AC, E, Io %, N° Espiras, L_BT, secao, Di Int, Den I, Di ex, d BT, and Largura degraus.
- DADOS DO NÚCLEO:** Fields for N°, HU, B (T), Freq, HC, VCC %, KVA, and Enrolamento BT.
- PARAMETROS VARIÁVEIS:** Fields for Den co AT, Chapa M, B (Tesla), N° de Degraus, and Den Co BT.
- Summary:** Fields for PerdasAT, PerdasFe, PerdasBT, PesoAT, PesoFe, PesoBT, Peso Total, Perdas Total, Wca, and Preço.

 Buttons for 'CALCULAR' and 'FECHAR' are at the bottom.

Figura 3. Interface gráfica de dimensionamento do transformador

geradas, porém não é possível garantir que eles encontrarão a melhor solução ou a mesma solução em diferentes execuções [19].

O fluxograma ilustrado na Figura 4 representa os passos de simulação de um algoritmo do tipo mencionado. Populações de indivíduos, que correspondem a possíveis soluções para um determinado problema, são geradas e submetidas a operadores genéticos, como mutação e reprodução. Essas soluções são avaliadas pelo critério de adequação (*fitness*) que as classifica de acordo com seu desempenho. Esses processos dependem da caracterização da qualidade de cada indivíduo como solução e, ao longo das gerações, tendem a encontrar soluções cada vez mais adaptadas, sugerindo serem as melhores possíveis dentro do espaço de busca [19], [20].

O Algoritmo Genético apresenta diversas vantagens que o tornam adequado para lidar com problemas de otimização, como o dimensionamento de transformadores. Algumas dessas vantagens incluem:

- Realizar uma busca paralela no campo de soluções, uma vez que a população é avaliada simultaneamente;
- Ser um método de otimização global, não ficando restrito a mínimos e máximos locais;
- Embora possuam componentes de aleatoriedade, não são puramente aleatórios, pois utilizam a avaliação da população para determinar o próximo estado de busca;
- Não ser afetado por descontinuidades abruptas na função avaliada ou em suas variáveis;
- Ser capaz de lidar com funções tanto discretas como contínuas;
- Poder trabalhar com um grande número de variáveis;
- Ser facilmente adaptável e portátil, permitindo transferir os mecanismos de evolução de uma aplicação para outra;
- Ser flexível para lidar com restrições e objetivos múltiplos de otimização;
- Poder ser implementado em conjunto com outras técnicas, formando sistemas híbridos.

Devido às características específicas de um transformador, para uma mesma especificação existem inúmeras possibilidades de dimensionamento que podem atendê-la. Nesse sentido,

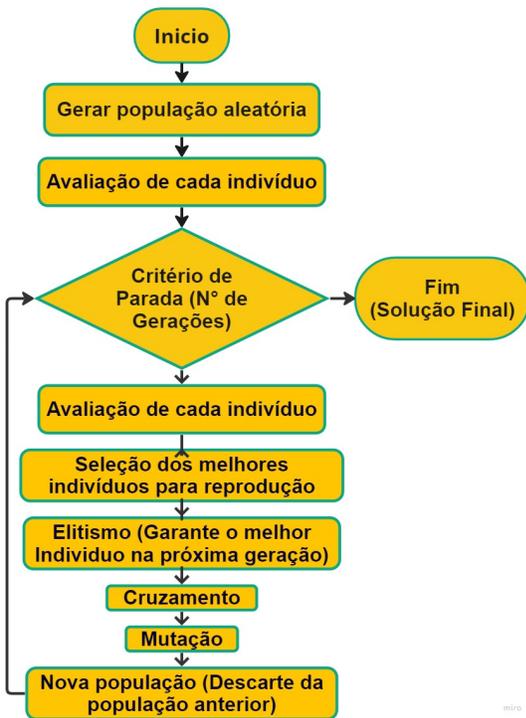


Figura 4. Fluxograma Algoritmo Genético.

o algoritmo genético é aplicado com o objetivo de encontrar o melhor transformador, levando em consideração critérios econômicos e de eficiência.

No AG implementado, as variáveis de projeto, B, D_AT, D_BT, N_DEG e TC, compõem um indivíduo do AG. A codificação desses parâmetros é fundamental no método, pois permite combinar as variáveis de projeto dos indivíduos aplicando os operadores genéticos. Neste estudo, foi empregada a técnica de codificação binária. A Figura 5 ilustra a configuração de um indivíduo do AG, em que cada espaço representa um bit. Estas variáveis constituem os parâmetros iniciais do projeto, a partir dos quais todos os cálculos da parte ativa do transformador são executados, resultando nas dimensões finais citadas na seção II-B.

- B: Indução magnética, com precisão de 0,002 (1,1 a 1,8 Tesla);
- D_AT: Densidade de corrente AT, com precisão de 0,005 (2 a 3.5A/mm²);
- D_BT: Densidade de corrente BT, com precisão de 0,005 (2 a 3.5A/mm²);
- N_DEG: Número de degraus, com precisão de 1 (1 a 10 Degraus);
- T_C: Tipo de chapa de material magnético, com precisão de 1 (M3, M4, M5 e M6).

Considerando apenas o passo (precisão) e a faixa de cada variável, o número total de combinações possíveis é de 2.147.483.648 (2 bilhões de possibilidades). Tornando-se impraticável testar todos os projetos.

A aplicação do AG no cálculo de um transformador é uma

busca pela combinação das variáveis de projeto, de acordo com o intervalo do espaço de busca, de modo a otimizar uma característica desejada no transformador final. A cada geração, os indivíduos passam pelos processos de avaliação, em que cada indivíduo é decodificado para as variáveis de ajuste do cálculo do transformador. Com base nos resultados, o transformador projetado recebe uma classificação de acordo com o critério de otimização. Os processos de (*crossover*) e mutação garantem a criação de novas gerações e diversidade genética. O elitismo assegura que o melhor indivíduo seja mantido para a próxima geração. Novas gerações são geradas até que o critério de parada seja satisfeito. No contexto apresentado, na Figura 4, no ponto em que encontramos o bloco *Gerar população aleatória*, são inseridas as variáveis de projeto que irão compor cada indivíduo. Isso resulta na adaptação eficaz deste método ao processo de projetar transformadores.

IV. CONFIGURAÇÃO DO AG ADOTADO

O Algoritmo Genético apresenta várias configurações disponíveis, as quais desempenham um papel fundamental e direto na eficiência do próprio algoritmo. No contexto do AG, uma abordagem comum envolve a geração de uma população inicial, a seleção de indivíduos, a aplicação de operadores genéticos como o cruzamento e a mutação, e a avaliação de indivíduos por meio de uma função específica. Essas etapas, quando bem definidas e configuradas, contribuem para moldar o desempenho global do algoritmo na busca por soluções otimizadas. Além disso, as escolhas realizadas ao longo dessas etapas podem impactar diretamente a qualidade das soluções encontradas e a rapidez com que o algoritmo converge para resultados satisfatórios.

A abordagem mais frequente para construir a população inicial é a aleatorização dos indivíduos. Se houver algum conhecimento prévio do problema, isso pode ser incorporado à inicialização. A codificação das variáveis desempenha um papel fundamental no método, pois possibilita a combinação das variáveis de projeto dos indivíduos, tornando-os compatíveis com os operadores genéticos. Para este estudo, optou-se pela utilização de uma população inicial aleatória com codificação binária. A Figura 5 apresenta a representação de um indivíduo do algoritmo genético.

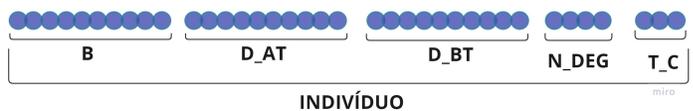


Figura 5. Composição de um indivíduo do AG.

A. Seleção

No que diz respeito à seleção dos indivíduos, várias técnicas estão disponíveis, incluindo a seleção por classificação, por roleta e por torneio. Nesse contexto, a abordagem adotada foi a seleção por torneio, onde um grupo de n (onde $n \geq 2$) indivíduos é selecionado aleatoriamente da população para competir entre si. O vencedor do torneio, ou seja, o indivíduo

com a melhor aptidão dentro do grupo, é escolhido para o cruzamento, enquanto os demais competidores são descartados.

B. Operadores Genéticos

O operador de cruzamento, também conhecido como operador de *crossover*, consiste na combinação do material genético de dois indivíduos para gerar dois descendentes. Essa operação permite misturar genes de diferentes indivíduos, criando descendentes com características potencialmente melhores (ou piores). A Figura 6 ilustra o funcionamento do operador de cruzamento. O ponto de corte para o cruzamento é selecionado aleatoriamente.

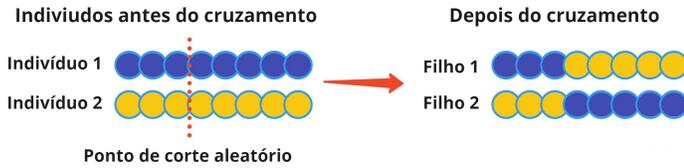


Figura 6. Cruzamento de dois Indivíduos.

O operador de mutação tem a função de introduzir modificações aleatórias em um ou mais genes do cromossomo. A taxa de mutação indica a probabilidade de ocorrer uma mutação em um gene específico. Normalmente, a taxa de mutação é mantida em valores baixos. O operador de mutação visa introduzir variabilidade adicional na população sem prejudicar o progresso alcançado até o momento. Além disso, ele promove a exploração aleatória no algoritmo genético, permitindo que diferentes regiões do espaço de busca sejam investigadas. A Figura 7 exemplifica a operação de mutação.

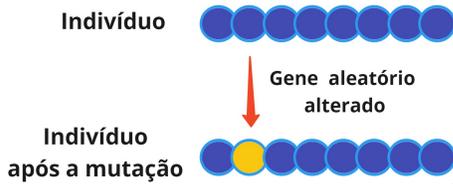


Figura 7. Mutação de Indivíduo.

C. Avaliação

A etapa de avaliação estabelece a ligação entre o algoritmo genético e o mundo externo. Uma função de avaliação, representativa do problema, quantifica a aptidão de cada indivíduo na população atual, orientando o processo de busca. No contexto do projeto de transformadores, um critério de avaliação pode ser construído com base em parâmetros como perdas, massa, tensão de curto-circuito e corrente de excitação. A função de avaliação adotada é expressa na Figura 8.

V. SUPERFÍCIE DE BUSCA DO AG:

Com a implementação do AG no projeto do transformador, foi possível construir a superfície de busca ilustrada na Figura 9, na qual o algoritmo genético opera, evidenciando os

$$\begin{aligned} & \text{SE } \text{Tensao_Curto_circuito} \geq \text{Tensao_Curto_circuito_Norma} \text{ FACA} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{Avaliacao}(i) + \\ & \quad K1 * (\text{Tensao_Curto_circuito} - \text{Tensao_Curto_circuito_Norma}) \\ & \text{FIMSE} \\ & \text{SE } \text{corrente_de_excitacao} \geq \text{corrente_de_excitacao_Norma} \text{ FACA} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{Avaliacao}(i) + \\ & \quad K2 * (\text{corrente_de_excitacao} - \text{corrente_de_excitacao_Norma}) \\ & \text{FIMSE} \\ & \text{SE } \text{Perdas_No_Nucleo} \geq \text{Perdas_No_Nucleo_Norma} \text{ FACA} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{Avaliacao}(i) + \\ & \quad K3 * (\text{Perdas_No_Nucleo} - \text{Perdas_No_Nucleo_Norma}) \\ & \text{FIMSE} \\ & \text{SE } \text{Perdas_Totais} \geq \text{Perdas_Totais_Norma} \text{ FACA} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{Avaliacao}(i) + \\ & \quad K4 * (\text{Perdas_Totais} - \text{Perdas_Totais_Norma}) \\ & \text{FIMSE} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{Avaliacao}(i) + K5 * \text{massa} \\ & \text{Avaliacao}(i) = \text{normalizar}(\text{Avaliacao}(i), A, B) \end{aligned}$$

Figura 8. Função de Avaliação.

mínimos locais nos quais o projetista pode facilmente ficar preso devido à grande quantidade de possibilidades.

Ao explorar a Figura 9, podemos obter informações valiosas. Ao analisar as bordas dessa superfície, observa-se que elas tendem a subir, indicando que nessas regiões existem indivíduos de baixa qualidade, ou seja, projetos de transformadores ruins. Levando isso em consideração, podemos impor uma restrição ao espaço de busca do Algoritmo Genético. Portanto, limitamos a indução magnética entre 1,1 e 1,8 Tesla e a densidade de corrente entre 2 e 3,5 A/mm².

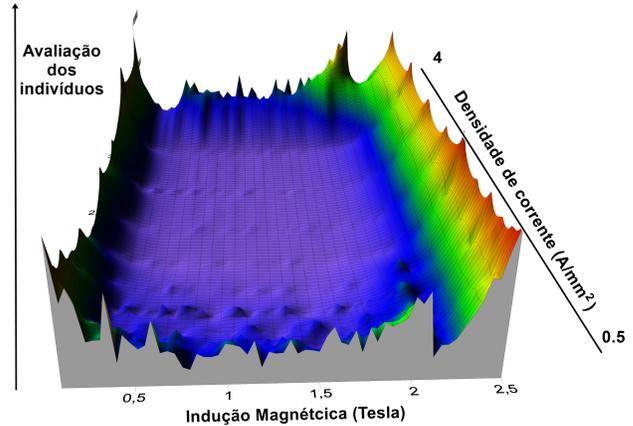


Figura 9. Superfície de busca

Em uma segunda análise, nota-se a presença de vales nessa superfície, que representam os mínimos locais nos quais o projetista pode acreditar ser o melhor projeto do transformador, quando na realidade está preso em um mínimo local. O Algoritmo Genético se torna vantajoso nesse tipo de superfície de busca, pois trabalha simultaneamente na exploração e exploração. No processo de exploração, investiga-se áreas novas e desconhecidas do espaço de busca, enquanto na exploração aproveita-se os pontos do espaço de busca já visitados. Dessa forma, evita-se que o Algoritmo Genético fique preso em mínimos locais.

VI. EXECUÇÃO DO AG NO PROJETO:

Para o projeto, considerou-se o transformador apresentado em [18], que será tratado aqui como o modelo de um fabricante nacional. As seguintes especificações de projeto foram consideradas:

- 1) Número de fases: 3
- 2) Potência contínua: 150 KVA
- 3) Tensões primárias: 13800 – 13200 – 12600 – 12000 – 11400 V
- 4) Tensões secundárias: 380/220 V
- 5) Tensão de curto circuito: 3,5
- 6) Corrente em vazio máxima: 2,2
- 7) Frequência: 60 Hz
- 8) Ligação primário: Delta
- 9) Ligação secundário: Estrela
- 10) Nível básico de impulso primário: 110 KV
- 11) Nível básico de impulso secundário: 30 KV
- 12) Perdas em vazio (ferro): 530 W
- 13) Perdas nos enrolamentos: 2100 W
- 14) Tipo de resfriamento: em óleo, LN
- 15) Classe: 105 °C
- 16) Deslocamento angular: Grupo 2; 30°

O Algoritmo Genético (AG) foi aplicado a essas especificações para otimizar o projeto do transformador. O AG utiliza as variáveis de projeto para formar indivíduos que são submetidos a operadores genéticos, como mutação e reprodução. Em cada geração, os indivíduos são avaliados com base em seu desempenho, classificados pelo critério de otimização. O AG busca encontrar a melhor combinação de variáveis de projeto para otimizar uma característica desejada no transformador final.

Ao executar o AG, é possível obter diferentes soluções que atendam às especificações do projeto do transformador. O algoritmo trabalha explorando e aproveitando simultaneamente o espaço de busca, evitando ficar preso em mínimos locais. Essa abordagem permite encontrar soluções cada vez mais adaptadas ao longo das gerações, buscando a melhor solução possível dentro do espaço de busca definido.

Portanto, ao executar o AG nesse projeto, é possível encontrar um transformador que atenda às especificações requeridas, levando em consideração os critérios de otimização estabelecidos.

Para esta simulação foi utilizada a seguinte configuração:

- Taxa de mutação de 0.01%;
- Número de indivíduos 20 (tamanho da população);
- Número de Gerações 5000.

Com base nos ensaios realizados, foi verificado que, após 5000 gerações, as modificações no melhor indivíduo tornam-se praticamente inexistentes, o que levou à definição do critério de parada em 5000 gerações. A Figura 10 ilustra a evolução do Algoritmo Genético ao longo desse período, demonstrando seu progresso na resolução do problema em questão. É observado que a busca se estabiliza após 486 gerações, indicando que não houve mais melhorias significativas. Portanto, os parâmetros desse indivíduo foram selecionados para o projeto

do transformador, Tabela I. Os valores definidos na norma [16] estabelecem os limites máximos para parâmetros como Perdas em Vazio, Perdas Totais, Corrente de Excitação e Tensão de Curto-Circuito. Dessa maneira, é esperado que os transformadores apresentem valores iguais ou inferiores aos especificados na norma.

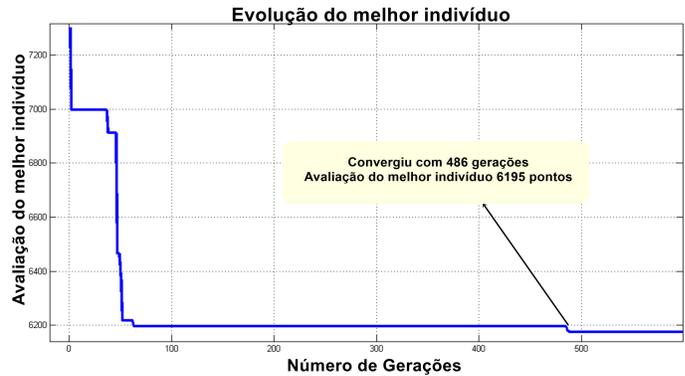


Figura 10. Evolução do AG

Tabela I
PROJETO FABRICANTE NACIONAL E AG.

Parâmetros de eficiência	Transformadores		
	Fabricante nacional	AG	Norma
Perdas em vazio (W)	530	526	≤ 540
Perdas Totais (W)	2050	2434	≤ 2450
Corrente de excitação (%)	2,2	1,87	≤ 2,6
Tensão de curto-circuito (%)	3,48	3,37	≤ 3,5
Massa Total (Kg)	417,60	409	-

A fim de avaliar a capacidade de otimização do Algoritmo Genético (AG), realizamos uma execução em que as perdas, conforme as especificações normativas, foram reduzidas em 5%. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela II.

Tabela II
AG 5% ABAIXO DA NORMA.

Parâmetros de eficiência	Transformadores		
	AG 5%	AG	Norma
Perdas em vazio (W)	459	526	≤ 540
Perdas Totais (W)	1658,48	2434	≤ 2450
Corrente de excitação (%)	1,59	1,87	≤ 2,6
Tensão de curto-circuito (%)	3,48	3,37	≤ 3,5
Massa Total (Kg)	509	409	-

Uma das características interessantes do AG é a sua capacidade de lidar com várias restrições. Nesse contexto, estabelecemos um limite de massa para o transformador de 400 kg. Os resultados desse cenário podem ser observados na Tabela III. Essa flexibilidade do AG em considerar e atender a diferentes restrições durante o processo de otimização é uma vantagem significativa, permitindo uma abordagem mais abrangente e adaptável ao projeto do transformador.

Tabela III
LIMITAÇÃO DO CUSTO.

Parâmetros de eficiência	Transformadores	
	AG Custo	Norma
Perdas em vazio (W)	526	≤ 540
Perdas Totais (W)	2434	≤ 2450
Corrente de excitação (%)	1,87	≤ 2,6
Tensão de curto-circuito (%)	3,37	≤ 3,5
Massa Total (Kg)	409	-

VII. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após analisar a Tabela I, constatamos que a utilização do Algoritmo Genético (AG) na otimização do projeto de transformadores resultou em uma redução de 8,6 kg na massa total em comparação com o método tradicional de projeto. Além disso, os valores de saída obtidos pelo AG, conforme apresentados na Tabela I, estão dentro dos limites estabelecidos pela norma.

É importante destacar que, nesse processo de otimização, houve um aumento na massa total do transformador, evidenciando a relação entre massa e perdas. Aumentar a massa pode aumentar os custos, enquanto diminuir a massa pode aumentar as perdas.

No entanto, alcançar o equilíbrio ideal entre massa e custo é uma tarefa complexa devido à dependência dessa relação em relação a vários parâmetros de entrada, que geram um amplo espaço de possibilidades. Essa complexidade é abordada e discutida nas seções III e V do artigo.

A Tabela II compara os resultados para os transformadores com o segundo objetivo de otimização. É possível perceber que há uma melhoria significativa nos parâmetros de eficiência do AG 5% em comparação com o AG, porém, apresenta um acréscimo na massa total de 100 kg em relação à massa do AG.

Além disso, a análise dos resultados revelou a capacidade do Algoritmo Genético de lidar com diferentes restrições durante o processo de otimização. No caso em questão, foi estabelecido um limite de massa de 400 kg para o transformador. Ao aplicar essa restrição, o AG conseguiu atingir uma massa mínima de 409 kg, demonstrando sua adaptabilidade e flexibilidade para considerar múltiplas restrições simultaneamente.

Essa abordagem mais abrangente e adaptável do AG no projeto de transformadores é uma vantagem significativa, permitindo que o algoritmo explore um espaço de soluções mais diversificado e efetivamente encontre um equilíbrio entre os objetivos de otimização e as restrições impostas.

Portanto, os resultados da análise confirmam a eficácia do Algoritmo Genético na otimização do projeto de transformadores, proporcionando reduções significativas na massa total e atendendo aos requisitos normativos. Essas descobertas reforçam a relevância e a aplicabilidade do AG como uma abordagem valiosa para o projeto eficiente de transformadores, considerando diversos critérios e restrições.

VIII. CONCLUSÃO

A utilização do Algoritmo Genético mostrou-se viável e eficaz na otimização do projeto de transformadores, aproveitando suas características de otimização multiobjetivo e busca paralela em espaços extensos de soluções. Essa aplicação prática do algoritmo resultou em uma significativa redução no tempo de busca desse complexo problema de otimização, evidenciando sua utilidade no campo da engenharia.

Ao empregar o Algoritmo Genético, foi possível encontrar parâmetros de projeto de transformadores mais eficientes e econômicos, reduzindo a quantidade de material necessário para sua fabricação e atendendo às normas de eficiência estabelecidas. Essa metodologia se apresenta como uma alternativa válida entre diversas abordagens de projeto de transformadores, fornecendo aos projetistas uma ferramenta interessante para a seleção dos parâmetros ótimos em um amplo espaço de busca. Uma das contribuições deste trabalho foi a capacidade do Algoritmo Genético em identificar os melhores parâmetros de fabricação, através da composição de uma superfície de busca que destacou os máximos e mínimos locais aos quais os projetistas poderiam estar restritos. Além disso, foi realizada uma análise da curva de evolução e convergência do algoritmo, comparando os projetos tradicionalmente realizados, sem a aplicação de técnicas de inteligência, com aqueles assistidos pelo Algoritmo Genético.

Como trabalho futuro, sugere-se a realização de simulações computacionais por meio de elementos finitos, utilizando as dimensões de projeto obtidas através do Algoritmo Genético, a fim de confrontar os resultados e realizar possíveis correções nos modelos adotados. Essa abordagem adicionaria um nível adicional de validação e refinamento aos projetos otimizados. Além disso, seria interessante conduzir estudos adicionais para explorar outras restrições e objetivos no projeto de transformadores. Por exemplo, requisitos específicos de temperatura, ruído ou vibração poderiam ser considerados, visando aprimorar ainda mais o desempenho e a confiabilidade dos transformadores otimizados. Outro aspecto a ser investigado é a aplicação do Algoritmo Genético em diferentes tipos de transformadores ou em outros problemas de otimização na área da engenharia elétrica. Isso permitiria avaliar sua eficácia e generalidade em diferentes contextos, ampliando seu potencial de aplicação. Além disso, é fundamental estabelecer uma comparação mais abrangente entre os projetos obtidos com o Algoritmo Genético e aqueles resultantes de outras técnicas de otimização disponíveis. Essa comparação possibilitaria uma análise mais abrangente das vantagens e limitações do Algoritmo Genético em relação a outras abordagens.

Em suma, o presente estudo evidenciou a eficácia do Algoritmo Genético na otimização do projeto de transformadores, demonstrando sua capacidade de reduzir a massa total e atender às normas de eficiência. Com as melhorias obtidas por meio dessa abordagem, espera-se contribuir para aprimorar a eficiência energética e a qualidade dos transformadores, beneficiando a indústria elétrica como um todo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos a todos os envolvidos neste trabalho. Em especial, aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB. Agradecemos também a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento e conclusão deste estudo. Seus esforços e apoio foram inestimáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] S. D. Umans, Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. AMGH Editora, 2014.
- [2] 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.
- [3] R. Amarasinghe, W. Kumara, R. Rajapaksha, R. Rupasinghe, and W. Wijayapala, "A transformer design optimisation tool for oil immersed distribution transformers," in 2015 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCCon), 2015: IEEE, pp. 100-105.
- [4] C. S. Righi, "Dimensionamento de transformadores monofásicos de baixa potência utilizando método analítico e algoritmo genético," 2018.
- [5] P. M. L. C. Alves, "Dimensionamento de transformadores de distribuição recorrendo a técnicas heurísticas," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2021.
- [6] A. F. V. Sprotte, "Contribuição à otimização evolucionária multiobjetivo: pesquisa aplicada a projetos de transformadores elétricos," 2021.
- [7] K. d. N. Souza, A. P. d. S. Braga, R. Oliveira, A. H. F. Murta, and O. d. M. Almeida, "Metodologia de projeto para redução de perdas da parte ativa do transformador de distribuição trifásico utilizando algoritmos genéticos," 2012: Congresso Brasileiro de Automática.
- [8] 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," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 5, pp. 590-597, 2008.
- [9] R. Aghmasheh, V. Rashtchi, and E. Rahimpour, "Gray box modeling of power transformer windings based on design geometry and particle swarm optimization algorithm," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 5, pp. 2384-2393, 2018.
- [10] B. d. S. Alves, "Projeto e modelagem de transformadores utilizando a técnica de subproblemas aplicada ao método de elementos finitos," 2016.
- [11] J. Henrique Júnior, "Otimização do projeto dielétrico de transformadores de distribuição por meio de simulações em elementos finitos," 2018.
- [12] S. Urooj, T. Singh, M. Amir, and M. Tariq, "Optimal Design of Power Transformer with Advance Core Material using ANSYS Technique," European Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 4, no. 5, 2020.
- [13] G. D. d. Souza, "Projeto e otimização de transformadores a seco," 2022.
- [14] A. Martignoni, "Transformadores. 8ª," ed: Edição, Editora Globo, São Paulo-SP, Brasil, 1991.
- [15] J. A. Malagoli, F. S. Lobato, J. R. Camacho, M. V. F. da Luz, and J. H. I. Ferreira, "Projeto de Transformador Monofásico Utilizando o Algoritmo de Evolução Diferencial," Blucher Mathematical Proceedings, vol. 1, no. 1, pp. 280-290, 2014.
- [16] N. ABNT, "5440. ABNT NBR 5440: 2014 Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição-Requisitos," Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 52, 2014.
- [17] K. d. N. Souza, "Otimização no cálculo da parte ativa do transformador de distribuição trifásico com uso de algoritmos genéticos visando melhor eficiência e menor custo," 2012.
- [18] L. L. M. Verde, "Teoria e prática no Projeto do Transformador de Distribuição," 2009.
- [19] R. Linden, Algoritmos genéticos (2a edição). Brasport, 2008.
- [20] L. A. C. Poltosi and N. Lemke, "Aplicação de Algoritmos Genéticos no projeto de transformadores," Revista Liberato, vol. 10, no. 14, pp. 167-174, 2009.