



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LAYSE DA SILVA INOCÊNCIO

**DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA DE UM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

BOM JESUS DA LAPA

2021

LAYSE DA SILVA INOCÊNCIO

DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA DE UM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
da Universidade Federal do Oeste da Bahia,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Elétrica .

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento
Souza (Orientador)
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Prof. Dr. Leandro Brito Santos
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Prof. Dr. Manoel Messias da Silva Junior
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Prof^ª. Ma. Andressa Perreira Oliveira
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

LAYSE DA SILVA INOCÊNCIO

DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA DE UM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica .

Orientador: Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza

BOM JESUS DA LAPA

2021

LAYSE DA SILVA INOCÊNCIO

FICHA CATALOGRÁFICA

I35

Inocêncio, Layse da Silva

Dimensionamento da parte ativa de um transformador de distribuição trifásico utilizando algoritmo genético. / Layse da Silva Inocêncio. – 2021.

62f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2021.

1. Transformadores. 2. Inteligência Artificial. I. Souza, Kleymilson do Nascimento. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.314

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

Ao meu tio Ednilton Olivio, que não está mais entre nós, mas sua lembrança me inspira, por sua alegria e força, e me faz persistir.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por permitir que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho. Aos amigos e familiares, em especial aos moradores da “Republica de Seu Tião”, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho. Obrigada ao meu namorado, Victor, por todo carinho e por me incentivar nos momentos difíceis ao longo desses anos.

Ao professor Kleymsom, por ser meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade. A todos os professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Agradeço às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, aos meus colegas, aos integrantes da Equipe Aero Chico, aos membros da ABU e demais estudantes e servidores da UFOB que de alguma maneira me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Este trabalho apresenta o cálculo do dimensionamento de um transformador trifásico de distribuição de forma otimizada. Para desenvolver o trabalho, utilizou-se técnicas de Inteligência Computacional, mais especificamente Algoritmo Genético, para definir os principais parâmetros dimensionais de fabricação. Deste modo, foi possível obter um ganho de eficiência e redução do gasto com material em relação a modelos usados pela indústria, diferente do método tradicional, onde o projeto é idealizado com o objetivo de atender principalmente as normas de eficiência vigentes, sem grande preocupação em minimizar os custos de material. O método proposto busca encontrar parâmetros ótimos de dimensionamento, mostrando a eficácia da técnica. O algoritmo também objetiva minimizar as perdas no ferro e no cobre, o que possibilita obter valores menores que as definidas por normas com o uso mínimo de matéria-prima, consequentemente reduzindo o peso do transformador. Os resultados das perdas e custo são comparados com projetos reais calculados de forma tradicional.

Palavras-chave: Projeto de Transformador. Transformador Trifásico. Inteligência Computacional. Algoritmo Genético. Otimização.

ABSTRACT

This work presents the calculation of the dimensioning of a three-phase distribution transformer, in an optimized way. To develop the work, Computational Intelligence techniques were used, more specifically Genetic Algorithm, to define the main dimensional parameters of fabrication. In this way, it was possible to obtain better efficiency and less expense with material. Different from the traditional method, where the project is conceived with the objective of meeting mainly the current efficiency standards, without great concern to minimize material shortages. The proposed method seeks to find optimal design parameters, showing the effectiveness of the technique. The algorithm also aims to minimize iron and copper losses, which makes it possible to obtain values lower than those defined by norms with the minimum use of raw material, consequently reducing the transformer's weight. Loss and cost results are compared to actual projects calculated in the traditional way.

Keywords: Transformers Project. Computational intelligence. Genetic Algorithm. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura clássica do SEP	14
Figura 2 – Transformador teórico com secundário aberto	22
Figura 3 – Transformador com núcleo de ar, magneticamente acoplado. (a) circuito 1, primário e (b) circuito 2, secundário	22
Figura 4 – Esquemático de transformadores (a) núcleo envolvido (b) núcleo envolvente	23
Figura 5 – Esquemático de conexão de um autotransformador ideal	24
Figura 6 – Ciclo de histerese de um material ferromagnético	25
Figura 7 – Transformador trifásico de distribuição	27
Figura 8 – Etiqueta padronizada para transformadores	27
Figura 9 – Fluxograma de Projeto de um Transformador Trifásico	32
Figura 10 – Características iniciais de projeto	34
Figura 11 – Cálculos iniciais do projeto	35
Figura 12 – Cálculos das Variáveis do Núcleo	36
Figura 13 – Sequência de cálculo do enrolamento de alta tensão	38
Figura 14 – Sequência de cálculo do enrolamento de baixa tensão	39
Figura 15 – Sequência de estimativa das perdas nos enrolamentos	39
Figura 16 – Sequência de estimativa das perdas nos enrolamentos	40
Figura 17 – Fluxograma: Algoritmo Genético.	42
Figura 18 – Representação do processo de recombinação	43
Figura 19 – Representação do processo de mutação.	44
Figura 20 – Indivíduo do AG no projeto de transformadores	47
Figura 21 – Fluxograma AG no projeto de transformadores	48
Figura 22 – Gráficos de desempenho do melhor indivíduo para (a) 1000 gerações, (b) 10 000 gerações e (c) 100 000 gerações	49
Figura 23 – Gráficos de estabilidade de desempenho do melhor indivíduo em um determinado número de gerações para (a) 50 gerações estáveis, (b) 100 gerações estáveis	50
Figura 24 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para massa, com 1000 gerações	52
Figura 25 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para massa, com 10 000 gerações .	52
Figura 26 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para perdas, com 5000 gerações .	53
Figura 27 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para perdas, com 10 000 gerações	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Valores de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores trifásicos com tensões máximas de 15 kV	28
Tabela 3 – Disponibilidade no mercado. Fabricantes de transformadores no Brasil.....	29
Tabela 4 – Principais Características do Alumínio e do Cobre.....	31
Tabela 5 – Tipos de Chapas de Alta Permeabilidade	32
Tabela 6 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação à Norma	55
Tabela 7 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação Massa	55
Tabela 8 – Tabela Comparativo dos Transformadores para o Segundo Objetivo de otimização com Relação a Norma	56
Tabela 9 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação Massa para o segundo objetivo de otimização	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmos Genéticos
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
IC	Inteligência Computacional
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão
V_1	Tensão aplicada no primário, em volts
r_1	Resistência no circuito primário, em ohms
L_1	Indutância do circuito primário, em henries
X_{L1}	Reatância indutiva do circuito primário, em ohms
Z_1	Impedância do circuito primário, em ohms
I_1	Valor médio quadrático da corrente drenada da fonte pelo primário, em amperes
E_1	Tensão induzida do circuito primário, em volts
V_2	Tensão que aparece nos terminais do secundário, em volts
r_2	Resistência no circuito secundário, em ohms
L_2	Indutância do circuito secundário, em henries
X_{L2}	Reatância indutiva do circuito secundário, em ohms
Z_2	Impedância do circuito secundário, em ohms
I_2	Valor médio quadrático da corrente drenada da fonte pelo secundário, em amperes
E_2	Tensão induzida do circuito secundário, em volts
φ_1	Fluxo que concatena a bobina 1
φ_2	Fluxo que concatena a bobina 2
φ_{12}	Fluxo mútuo que concatena as bobinas 1 e 2
M	Indutância mútua
$Y - \Delta$	Ligação estrela-triângulo
$\Delta - Y$	Ligação triângulo-estrela
$\Delta - \Delta$	Ligação triângulo-triângulo
$Y - Y$	Ligação estrela-estrela
B	Indução Magnética em tesla
d_{AT}	Densidade de corrente enrolamento de alta tensão

d_{BT} Densidade de corrente enrolamento de baixa tensão

μ Permeabilidade magnética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.3	Revisão Bibliográfica	17
1.4	Metodologia do Trabalho	19
1.5	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Fundamentos Gerais de um Transformador	21
2.1.1	<i>Perdas em Transformadores</i>	25
2.2	Transformador de Distribuição	26
2.2.1	<i>Características gerais</i>	26
2.2.2	<i>Normas</i>	26
2.2.3	<i>Disponibilidade no Mercado</i>	28
2.2.4	<i>Materiais para Construção</i>	30
2.2.4.1	<i>Materiais Isolantes</i>	30
2.2.4.2	<i>Materiais Condutores</i>	31
2.2.4.3	<i>Materiais Magnéticos</i>	31
2.3	Calculo da Parte Ativa de um Transformador de Distribuição	32
2.4	Cálculos do núcleo e Enrolamentos	35
2.5	Cálculos Finais	40
2.6	Algoritmos Genéticos	41
3	METODOLOGIA	46
3.1	Algoritmo Genético Aplicado ao Dimensionamento de Transformadores	46
3.1.1	<i>Definição do Critério de Parada</i>	48
3.1.2	<i>Função de Avaliação</i>	51
4	RESULTADOS	55
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58

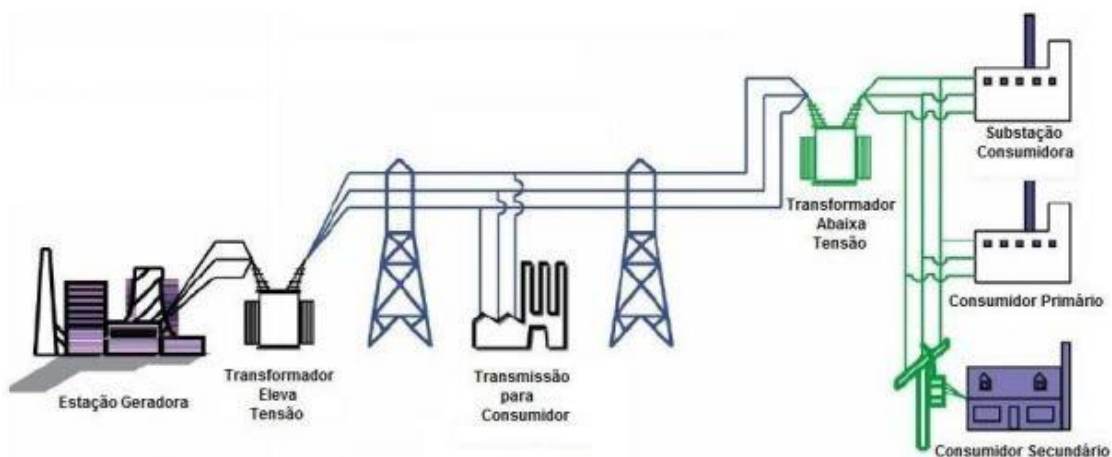
1 INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta, a eletricidade proporcionou o avanço no desenvolvimento e ocupa um lugar de destaque na indústria, economia e na sociedade. Com o passar dos anos tornou-se um item indispensável na qualidade de vida dos usuários, gerando produtividade e sustentabilidade econômica.

A primeira estação elétrica construída foi a de Thomas Edson, que operava com Corrente Contínua (CC), e supria as necessidades locais da época. Entretanto, com a crescente demanda, o modelo enfrentava problemas no sistema de transmissão de energia CC por longas distâncias do sistema de geração e em converter para níveis de tensão de forma simples. Surgiu então a proposta do sistema elétrico em Corrente Alternada (CA), impulsionada pela possibilidade da aplicação em transformadores para adequar os níveis de tensão, o uso em motores de indução e circuitos polifásicos, em meados dos anos de 1880 a 1890 (SILVA, 2011).

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é dividido em geração, transmissão e distribuição, a maioria destes funcionando em sistemas de energia CA (LEÃO, 2009; SILVA, 2011). O transformador é um dispositivo robusto que possibilita a adequação dos níveis de tensão em diferentes estágios do sistema de transmissão. Ao elevar a tensão é possível transmitir grandes potências por longas distâncias sem perdas significativas (SILVA, 2011). A Figura 1 representa a estrutura do SEP.

Figura 1 – Estrutura clássica do SEP



Fonte: (LEÃO, 2009)

A Figura 1 ilustra os três principais estágios do SEP, geração, distribuição e transmissão, observa-se que os transformadores estão presentes ao longo do sistema, adequando os níveis de tensões. O primeiro transformador (transformador elevador) conecta a estação geradora

ao sistema de transmissão; o segundo (transformador abaixador) está no final da transmissão para adequar as tensões em níveis mais baixos sendo utilizados em fábricas e nas linhas que circulam pela cidade; o terceiro (transformador de distribuição) estão espalhados pela cidade, abaixando para níveis comuns de uso residencial. É notória a importância do transformador, seja na adequação dos níveis de tensão ou nas interconexões (HAAS *et al.*, 2011). No Brasil, a transmissão opera nominalmente entre 138 kV e 765 kV, muito superior às tensões das gerações que variam dependendo da matriz energética. A distribuição opera em torno de 13,8 kV e uso 127 V ou 220 V por fase, na maior parte do país.

Em geral os transformadores são utilizados tanto no SEP, quanto em aplicações na eletrônica ou em sistemas de telecomunicação (KOSOW, 1985) e podem ser classificados conforme sua operação (distribuição, transmissão, instrumentação), número de fases (monofásico, trifásico) ou utilização (aéreo, subterrâneo e submerso).

As principais características dos transformadores trifásicos de distribuição são:

1. Faixa de Potência: de 15 kVA a 3000 kVA;
2. Tensões Primárias: Classe (15, 24,2 e 36,2) kV;
3. Tensões Secundárias: (220/127) V, (380/220) V, (440/254) V (outras, sob consulta);
4. Frequência: 50 Hz ou 60 Hz;
5. Imersos em óleo isolante mineral ou vegetal;
6. Com condutores em cobre ou alumínio;
7. Convencionais ou auto protegidos;
8. Aéreos, subterrâneos ou submersíveis.

Na última década, notou-se a necessidade de avaliar os transformadores de distribuição de acordo com seu rendimento, surgindo assim um processo de etiquetagem, que classifica-o de acordo com a eficiência do equipamento. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) tem entorno de dezenove fabricantes de transformadores registrado no mercado brasileiro (INMETRO, 2019).

As empresas fabricantes de transformadores tem buscado, devido à crescente competitividade, atender as demandas atuais do mercado e questões ambientais, econômicas e qualidade. A sustentabilidade e a responsabilidade ecológica estão atualmente no centro do debate no desenvolvimento de novas tecnologias. Empresas como a ITAIPU Transformadores tem destaque por iniciativa com o uso de óleo vegetal em parte dos equipamentos produzidos, onde é pioneira (ITAIPU, 2019). Os óleos que são comumente utilizados nos transformadores

são derivados do petróleo, tóxicos e não biodegradáveis.

O programa brasileiro de etiquetagem coordenado pelo INMETRO fornece informações sobre o desempenho dos produtos. Tal propósito estimula a competitividade da indústria, que busca fabricar equipamentos mais eficientes, tentando reduzir os custos envolvidos.

1.1 Motivação

A maioria dos fabricantes de transformadores realizam os projetos buscando atender as normas, baseado na experiência de fabricação, não é comum o uso de técnicas de otimização computacional. A técnica clássica utiliza equações empíricas e dados de projetos já realizados e ensaiados (AGUIAR, 2005 apud SOUZA, 2012). Esse método de realização dos cálculos, necessita de profissional experiente, para modificar os parâmetros corretos, fazendo com que o projeto obtido atenda as normas.

Devido à necessidade de modelos mais eficientes e econômicos, o uso de inteligência computacional proporciona realizar os cálculos do projeto de forma otimizada, permitindo uma maior competitividade no mercado. Diversas pesquisas tem-se dedicado a otimização de máquinas elétricas, em especial transformador, devido sua importância em SEP e custo elevado (POLTOSI; LEMKE, 2009; MALAGOLI *et al.*, 2014; SOUZA, 2012; RIGHI *et al.*, 2018; SOBRINHO *et al.*, 2019).

Os transformadores trifásicos de distribuição representam uma parte expressiva do sistema. Modelos de projetos otimizados que utilizam técnicas de inteligência computacional, possibilita explorar o espaço de busca, dentre os milhões de possibilidades no caso deste projeto. Ao encontrar o melhor projeto, possibilita grande economia no setor. Este trabalho limita-se ao dimensionamento da parte ativa do transformador trifásico de distribuição, de 150 KVA, com uso de Algoritmos Genéticos (AG) para minimização das perdas e custos.

1.2 Objetivos

Realizar o dimensionar da parte ativa de um transformador trifásico, utilizando a técnica de Inteligência Computacional (IC), Algoritmo Genético.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Buscar minimizar as perdas totais no transformador projetado;

- Atender a norma vigente;
- Buscar minimizar o material que é utilizado no projeto do transformador, implicando em menor custo final;
- Comparar os resultados de perdas e peso no transformador dimensionado da forma clássica (sem uso de algoritmo de busca) com o modelo proposto (otimizado com uso de AG).

1.3 Revisão Bibliográfica

O projeto de um transformadores requer conhecimentos multidisciplinares, tais como tecnologia dos materiais, eletromagnetismo, análises computacionais, técnicas de otimização dentre outros (SOBRINHO *et al.*, 2019). Este trabalho busca realizar o projeto da parte ativa de um transformador trifásico com otimização, utilizando o AG. Este tópico apresenta-se um rápido levantamento bibliográfico apresentando o uso de técnicas de inteligência computacional aplicadas a projeto de transformadores. Abaixo é pontuada uma breve descrição das contribuições de cada pesquisa ao tema de interesse:

O autor (AMOIRALIS *et al.*, 2009) apresenta a combinação do uso de AG para a minimização dos custos o cálculo numérico de campos eletromagnéticos térmicos. A abordagem tem considerável superioridade se comparada a métodos heurísticos tradicionais, além da expansão do espaço de soluções.

A pesquisa de (GEORGILAKIS, 2009) propõe devido à característica não linear e de grande complexidade da otimização do projeto de transformadores, no quesito da minimização dos custos, a aplicação de uma combinação entre o algoritmo genético (AG) e o método de elementos finitos. Tem como diferencial a utilização de estratégia de elitismo que torna o GA mais eficiente, além da associação com o método de elementos finitos com grande precisão e velocidade computacional. Desta forma consegue obter um ótimo global, enquanto outras soluções obtiveram resultados inferiores.

No artigo desenvolvido por (POLTOSI; LEMKE, 2009) empregou-se um modelo analítico do projeto de transformadores, otimizado através do uso de algoritmo genético. A redução do custo é dada pela relação entre o peso dos materiais utilizados. As perdas no material magnético e o rendimento desejado foram tratados como restrição ao projeto. Desta forma obteve-se uma minimização dos custos mantendo os níveis de eficiência.

No trabalho apresentado por (KHATRI *et al.*, 2012) mantendo em vista as restrições impostas pelos padrões internacionais e pelas especificações dos transformadores de potência,

foram aplicadas as técnicas de Algoritmo Genético e Recozimento simulado, visando um comparativo entre os métodos de otimização e o procedimento tradicional de projeto de transformadores de potência, reduzindo as dimensões e os custos.

O autor (SOUZA, 2012) usa o algoritmo genético para dimensionamento da parte ativa do transformador de distribuição trifásico, buscando atender a exigências da norma NBR 5440 para os parâmetros de entrada do projeto. E mostra que é minimizando as perdas e o custo, quando comparado aos métodos tradicionais de cálculo.

Os pesquisadores (COELHO *et al.*, 2014) tendo em vista os múltiplos objetivos da otimização de um projeto de transformador, visto que deve-se considerar não só a redução dos custos, mas também requisitos de eficiência, regulação, elevação da temperatura e a transferência de potência. Recorre a técnicas de busca biologicamente inspirada, dado que apresentam um bom desempenho nos problemas de otimização com multiobjetivos e obtém uma resposta satisfatória ao projeto de transformados de potência.

O trabalho de (MALAGOLI *et al.*, 2014) usa um algoritmo de evolução diferencial, uma técnica de computação evolucionária assim como o algoritmo genético, minimiza o volume de um transformador monofásico, que implica na redução dos custos do cobre e ferro empregados na construção.

No trabalho de (ADLY; ABD-EL-HAFIZ, 2015) conforme a globalização do mercado e a crescente competitividade entre os fabricantes de transformadores, técnicas que buscam reduzir custos do projeto tornam o produto final mais competitivo. É de grande interesse econômico otimizar o uso de materiais, sem prejuízo na eficiência final do produto. A partir disso, propõe a aplicação de uma função multiobjetivo de otimização com algoritmo genético.

A autora (COLL *et al.*, 2015) diz que a busca pelo projeto de transformador de custo ótimo dentre as inúmeras possibilidades, é um problema de natureza complexa, devido a enorme variedade de soluções possíveis. Para a solução do problema desenvolve um *software* capaz de calcular o núcleo e o enrolamento do transformadores, que atendem às especificações e normas do cliente a um custo mínimo. O programa produzido recebe o nome de DISTRANA, possui banco de dados associados com as informações sobre variáveis, materiais, custos, etc. A técnica de otimização de AG's é estudada para a implementação pelo *software*.

Em (RIGHI *et al.*, 2018) o método de algoritmo genético (AG) faz o dimensionamento de transformador monofásico para comparar com o método analítico. A comparação é feita através do uso de simulação para cada uma das soluções, obtendo um melhor desempenho

no método via otimização.

Na tese de(SOBRINHO *et al.*, 2019) para projetar transformadores de distribuição trifásicos, tipo núcleo envolvido, com o auxílio de técnicas de otimização, promoveu um estudo da aplicação de métodos de inteligência computacional associados a funções de otimização mono e multi objetivos. Onde as funções mono objetivos buscavam minimizar perdas magnéticas e elétricas, a multiobjetivos perdas e a massa da parte ativa (que lhe concerne está diretamente relacionada aos custos). Os métodos utilizados foram Evolução Diferencial (ED) e o Enxame de Partículas (EP).

1.4 Metodologia do Trabalho

As etapas de realização deste trabalho primeiro consiste em dimensionar o projeto de maneira convencional, com base em projetos pré-existentes, utilizados na indústria para o cálculo da parte ativa de um transformador trifásico. A segunda etapa consiste em fazer a otimização do projeto com o uso de AG, visto que, a proposta do algoritmo genético é realizar um busca guiada no espaço de possíveis soluções, de modo a obter a configuração dos melhores parâmetros de fabricação do transformador, nas quais as perdas e o custo do equipamento são minimizados. Por último, a validação dos resultados a partir da comparação entre os valores das perdas do transformador projetado de maneira convencional e o otimizado, verificando se o método tem resultados que correspondem ao esperado.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho é estruturado em capítulos, conforme segue abaixo:

- O capítulo 2, traz a fundamentação geral de transformadores, suas características e classificações, apresenta o transformador de distribuição que será o alvo desse trabalho. Mostra como é feito o projeto da parte ativa do transformador de maneira convencional, destacando as variáveis que podem ser otimizadas e apresenta a técnica, características gerais e fundamentos do Algoritmo Genético.
- O capítulo 3, realiza o cálculo do transformador com uso de Algoritmo Genético, mostrando os resultados de simulações, com uso de uma plataforma de trabalho desenvolvida no *MatLab*[®].
- O capítulo 4, apresenta os resultados obtidos no trabalho, fazendo a comparação e justifi-

cando a eficiência do método adotado.

- O capítulo 5, apresenta as conclusões obtidas do trabalho realizado e propõe ideias para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A forma de realizar o dimensionamento de um transformado, pode ser dividida em dois grupos. O primeiro, se refere ao projeto que atenderá as perdas impostas pelas normas, a qual chamaremos maneira clássica de projeto. O segundo método é com uso de IC, neste caso o AG, que busca os melhores dados de projeto, atendendo as normas e minimizando os custos.

2.1 Fundamentos Gerais de um Transformador

O Transformador é um componente importante de um sistema CA, ele torna possível o sistema de transmissão e geração de energia em tensões adequadas reduzindo o custo global do sistema. São dispositivos de funcionamento simples com aplicações variadas, podem ser elevadores, abaixadores ou simplesmente isoladores cada um com uma finalidade, construção e tamanho específicos. O transformador é encontrado em praticamente todos os setores da engenharia elétrica (KOSOW, 1985). Nos sistemas de potência os transformadores utilizados podem ser monofásicos ou trifásicos a depender da aplicação.

No projeto de transformadores, dados os parâmetros desejados, deve-se considerar alguns requisitos básicos (MOURA, 2009):

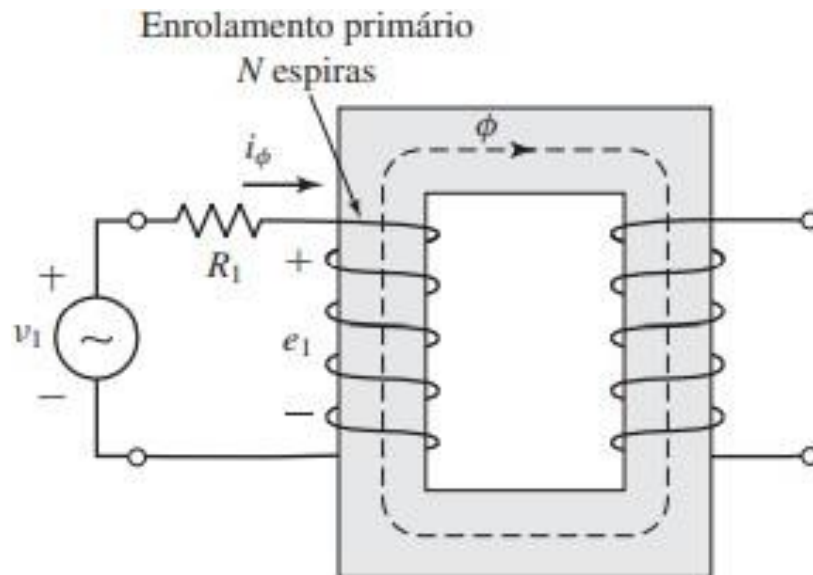
1. Concordância entre o projeto, os resultados previstos e os obtidos após a conclusão do processo construtivo;
2. Menor custo dos materiais na fabricação;
3. Menores perdas em operação;
4. Menor custo de produção;
5. Atender as normas vigentes.

Para fins de otimização do dimensionamento da parte ativa de transformadores, esse trabalho está direcionado a atender as normas vigentes para o projeto de transformadores (ABNT, 2014), reduzindo os custos com material utilizado e as perdas, utilizando inteligência artificial em uma otimização de multiobjetivos.

Em uma definição geral, um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. A aplicação de uma tensão alternada em um dos enrolamentos, produz um fluxo magnético alternado cuja intensidade depende da tensão aplicada, frequência e número de espiras neste enrolamento. O fluxo gerado produz uma tensão alternada dependente do número de espiras (relação de transformação) nos enrolamentos

acoplados. A Figura 2 mostra um transformador teórico com dois enrolamentos acoplados (UMANS, 2014).

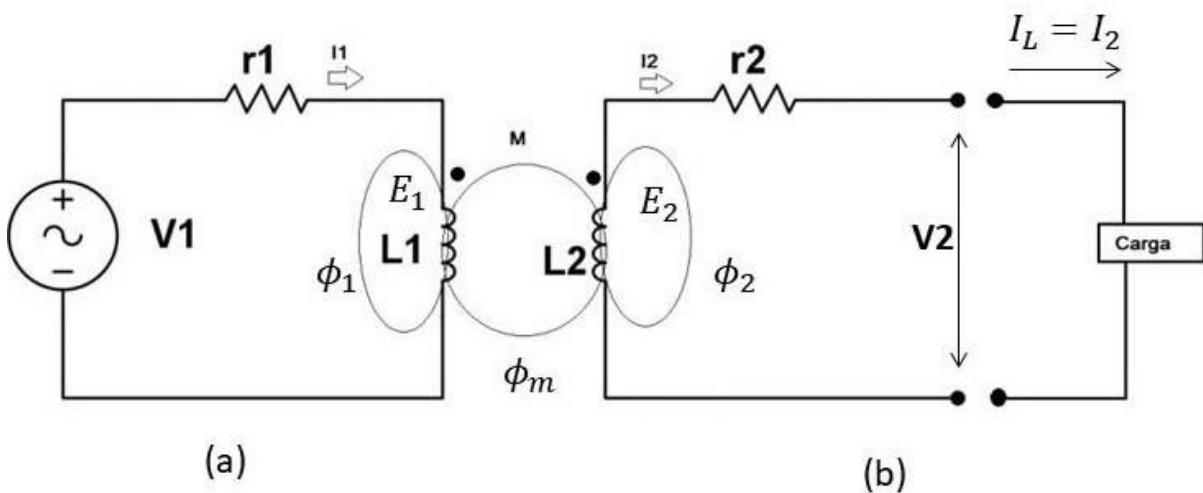
Figura 2 – Transformador teórico com secundário aberto



Fonte: (UMANS, 2014)

A Figura 3 ilustra o circuito de um transformador, com acoplamento magnético entre dois circuitos, nos quais não há conexão física entre eles (KOSOW, 1985).

Figura 3 – Transformador com núcleo de ar, magneticamente acoplado. (a) circuito 1, primário e (b) circuito 2, secundário



Fonte: (KOSOW, 1985)

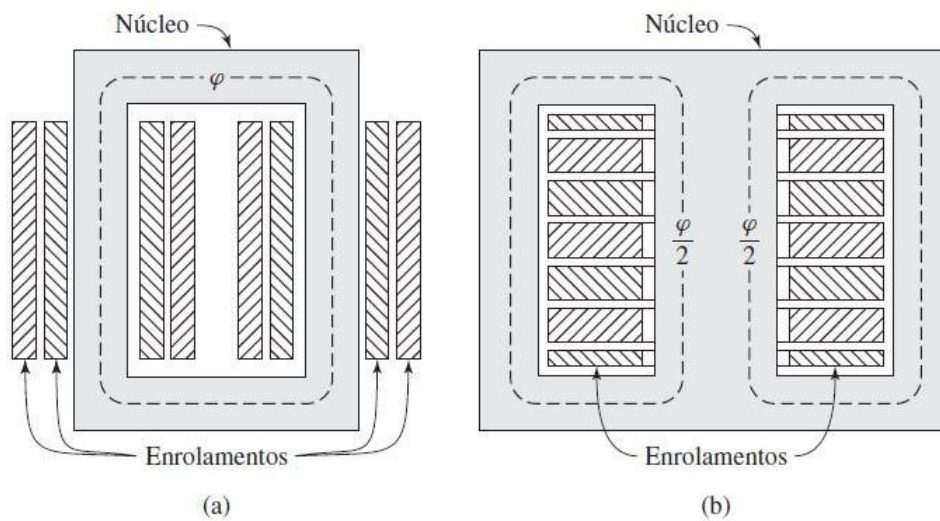
Na Figura 3 (a), o circuito 1 é chamado primário e recebe energia de uma fonte

alternativa de tensão V_1 . O grau de acoplamento magnético entre os dois circuitos define o quanto essa energia é transferida. No caso do núcleo de ar, como na Figura 3, é descrito com pouco acoplamento magnético. Devido alta relutância (R) do meio, transfere-se apenas uma pequena porcentagem da energia. Se as bobinas estão enroladas sobre um núcleo comum de ferro ou material ferro-magnético, elas estão fortemente acopladas e uma grande parte da energia é transferida (KOSOW, 1985).

A maioria dos transformadores possui núcleo de ferro, cuja alta permeabilidade magnética (μ), faz com que a maior parte do fluxo fique confinado em um caminho delimitado, enlaçando os enrolamentos (UMANS, 2014).

Dois tipos comuns de construção estão mostrados na Figura 4. No tipo núcleo envolvido, Figura 4 (a), os enrolamentos envolvem o núcleo que tem a forma retangular, no tipo núcleo envolvente, Figura 4 (b) os enrolamentos envolvem uma perna central (UMANS, 2014).

Figura 4 – Esquemático de transformadores (a) núcleo envolvido (b) núcleo envolvente



Fonte: (UMANS, 2014)

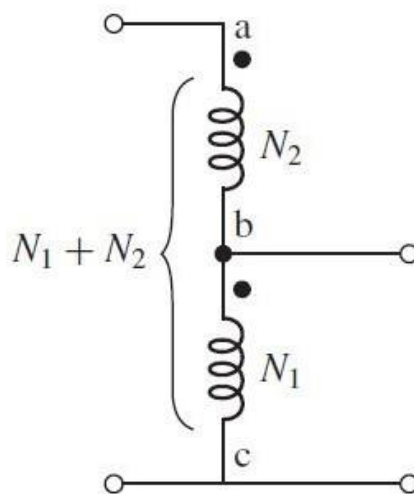
As Figuras 3 e 4 são referências a transformadores de dois enrolamentos, monofásico, mas os mesmos princípios discutidos, podem ser aplicados a outras configurações de enrolamentos. Um transformador monofásico é composto de um circuito primário acoplado magneticamente a um secundário que compartilha o mesmo núcleo magnético, geralmente dois enrolamentos, assim como nos exemplos anteriores. Em transformadores reais, embora acoplados em um núcleo de ferro, material de baixa relutância, uma pequena porção do fluxo é disperso. Esse fluxo disperso produz reatâncias indutivas (X_{L1} e X_{L2}) nos enrolamentos, que no que lhe concerne, são constituídos de condutores de cobre, que têm certa resistência. Essas resistências

internas no primário e secundário são r_1 e r_2 , respectivamente. As resistências e reatâncias dos enrolamentos, produzem quedas de tensão no interior do transformador, implicando em perdas no ferro e no cobre (UMANS, 2014).

Uma configuração distinta de enrolamentos é o caso dos autotransformadores. Uma diferença importante entre um autotransformador e um transformador de dois enrolamentos é que o de dois enrolamentos estão eletricamente isolados, ao passo que o autotransformador está conectado diretamente entre si. A Figura 5, em que o enrolamento bc é comum a ambos os circuitos secundário e primário, representa a forma de ligação de um autotransformador ideal eletricamente (UMANS, 2014). Na teoria, um autotransformador é definido como um transformador de um único enrolamento. Assim, um transformador de enrolamentos múltiplos pode ser considerado um autotransformador, se todos os seus enrolamentos estão ligados em série (KOSOW, 1985).

Transformadores com três ou mais enrolamentos são conhecidos como transformadores de múltiplos enrolamentos ou de múltiplos circuitos. Três transformadores monofásicos ligados entre si em estrela-triângulo ($Y \Delta$), triângulo-estrela (ΔY), triângulo-triângulo ($\Delta\Delta$) ou estrela-estrela (YY), para transformar correntes trifásicas, são chamados bancos trifásicos. Um banco trifásico pode ser substituído por um único transformador trifásico tendo seis enrolamentos em um núcleo comum de pernas múltiplas, custando menos, pesando menos e ocupando um espaço menor (UMANS, 2014).

Figura 5 – Esquemático de conexão de um autotransformador ideal



Fonte: (UMANS, 2014)

2.1.1 Perdas em Transformadores

Os tipos de perdas que podem ocorrer nos transformadores são:

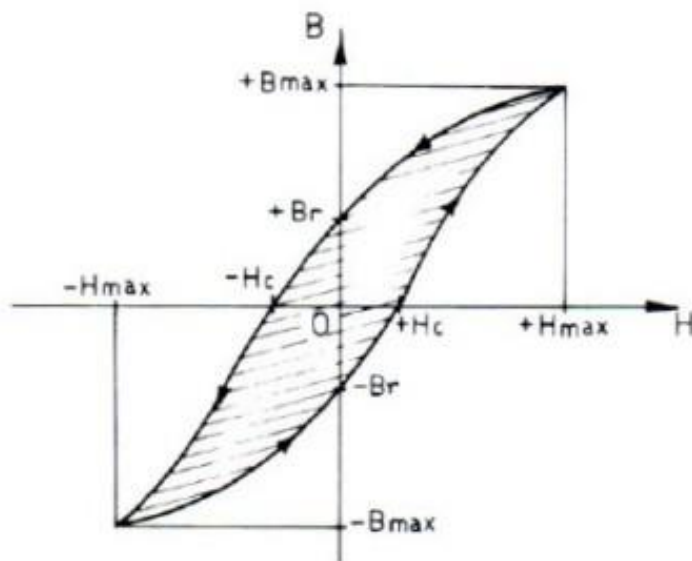
- Perdas Magnéticas no Núcleo;
- Perdas ôhmicas nos Enrolamentos.

As primeiras, perdas magnéticas no núcleo, também são conhecidas como perdas no ferro sendo causadas pelas correntes de Foucault e histerese do material (FALCONE, 1979).

As correntes de Foucault acontecem visto que é aplicada uma tensão alternada a um dos enrolamentos de um transformador, o mesmo reage com uma tensão induzida alternada, gerando um fluxo e densidade de fluxo alternados no núcleo ferromagnético. Essa alternância do fluxo gera pequenas correntes induzidas na massa do núcleo e por consequência perdas por efeito 'joule' (UMANS, 2014) e (FALCONE, 1979).

Já as perdas por histerese magnética acontecem, pois, materiais ferromagnéticos tem respostas não lineares ao serem submetidos a uma magnetização cíclica, apresentam um ciclo como o da Figura 6 com a relação entre o campo magnético H e indução B . Isso significa que a energia absorvida durante a magnetização não é totalmente devolvida na desmagnetização, dessa forma as perdas por efeito de histerese representam o consumo de energia necessário para vencer a reação interna das partículas do material ao serem magnetizadas (FALCONE, 1979).

Figura 6 – Ciclo de histerese de um material ferromagnético



Fonte: (FALCONE, 1979)

Nos enrolamentos os condutores possuem resistências associadas e apresentam

aquecimento (efeito Joule) (MOURA, 2009). Neste trabalho, ao considerar o objetivo de otimização em relação à minimização das perdas, são consideradas as perdas totais de acordo os parâmetros da norma vigente, desconsiderando, portanto, a origem dessas perdas.

2.2 Transformador de Distribuição

2.2.1 Características gerais

O sistema elétrico de potência nacional é, em sua maioria, CA, trifásico e dividido entre geração, transmissão e distribuição. A distribuição se caracteriza como o segmento do setor elétrico dedicado ao rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão, à conexão de centrais geradoras e ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor. Isso só é possível devido aos transformadores de distribuição trifásicos, que ajustam os níveis de tensão para o uso dos consumidores. Os transformadores trifásicos de distribuição atuam numa faixa de potência de 15 kVA à 300 kVA, tensões primárias na classe (15, 24,2 e 36,2) kV, e tensões secundárias entre (220/127) V, (380/220) V, (440/254) V (Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição, 2019).

A Figura 7 ilustra um transformador trifásico clássico de distribuição fabricado pela ITB dispositivos elétricos. Na parte superior do transformador, conforme o destaque, aparece uma placa metálica referente ao Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) de equipamentos elétricos que informa dados da eficiência do aparelho. A portaria 488 do INMETRO, de novembro de 2014, estabelece um modelo para essas etiquetas em transformadores. A Figura 8 ilustra a padronização da etiqueta nacional de conservação de energia de transformadores de distribuição em líquido isolante.

2.2.2 Normas

A NBR 5440, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 2014, regulamenta os requisitos dos transformadores para redes aéreas de distribuição.

No projeto de um transformador existem variáveis que modificam características como as perdas elétricas na parte ativa do transformador. A norma limita essas variáveis a medida que estabelece níveis mínimos de qualidade. A norma também define características como:

- Potências nominais que devem ser para transformadores de distribuição de:
 - Transformadores monofásicos: 3 kVA; 5 kVA; 10 kVA; 15 kVA; 25 kVA; 37,5 kVA;

Figura 7 – Transformador trifásico de distribuição



Fonte: ITB (2019)

Figura 8 – Etiqueta padronizada para transformadores

	70,00	60,00		
60,00	Energia (Elétrica) Fornecedor Modelo Tipo Potência (kVA) Classe de Tensão (kV)	TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO EM LÍQUIDO ISOLANTE	PERDAS MÁXIMAS (tap nominal) - Vazio (W) 00000 - Totais (W) 00000 - Relação Transformação 00000	30,00
	INMETRO	PERDAS MÁXIMAS (tap crítico) - Vazio (W) 00000 - Totais (W) 00000 - Relação Transformação 00000	30,00	
	70,00	60,00		

Fonte: INMETRO (2014)

50 kVA; 75 kVA e 100 kVA;

– Transformadores trifásicos: 15 kVA; 30 kVA; 45 kVA; 75 kVA; 112,5 kVA; 150 kVA; 225 kVA e 300 kVA;

- Os níveis de isolamento e os espaçamentos mínimos no ar;
- Derivações e suas tensões nominais;

- Frequência nominal;
- Limites de elevação de temperatura;
- Diagramas fasoriais;
- Tensão de radiointerferência;
- Capacidade de resistir a curtos-circuitos;
- Nível de ruído;
- Perdas, corrente de excitação e tensão de curto.

As perdas de corrente de excitação, tensão de curto, as perdas a vazio e totais, são definidas pela norma, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores trifásicos com tensões máximas de 15 kV

Potência do transformador (kVA)	Perda em vazio (W)	Perda total (W)	Corrente de excitação (%)	Tensão de curto-circuito (%)
15	85	410	4,0	3,5
30	150	695	3,6	3,5
45	195	945	3,2	3,5
75	295	1395	2,7	3,5
112,5	390	1890	2,5	3,5
150	540	2450	2,6	3,5
225	650	3260	2,1	4,5
300	810	4060	1,9	4,5

Fonte: (ABNT, 2014)

2.2.3 Disponibilidade no Mercado

Devido às normas regulamentadoras e o próprio PBE, os transformadores comercializados no Brasil devem possuir uma etiqueta com os dados de eficiência energética.

Esses dados são disponibilizados pelo INMETRO, o qual informa a eficiência do transformador de distribuição em líquido isolante. Assim, é possível listar e classificar os principais fabricantes:

Tabela 3 – Disponibilidade no mercado. Fabricantes de transformadores no Brasil.

Fabricante	Descrição
CGC	Localizada na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, interior do estado do Espírito Santo, a CGC TRANSFORMADORES atua desde 1999 no seguimento de industrialização, comercialização e reparo de transformadores elétricos (CGC, 2019)
COMTRAFO	Desde 1994 produz transformadores de distribuição e força para o mercado nacional e internacional (COMTRAFO, 2019)
ENERTRAFO	Além de fabricar e vender transformadores, oferece manutenções preventiva, preditiva e corretiva, garantindo o pleno funcionamento dos equipamentos (ENETRAFO, 2019)
ISOTRAFO	Fundada em 1983, na cidade de Mogi Mirim, estado de São Paulo, a Isotrafo é uma empresa de tradição no mercado de materiais elétricos para alta tensão. É hoje uma das principais distribuidoras de materiais elétricos de distribuição (ISOTRAFO, 2019)
ITAIPU	Fundação da empresa em Indaiatuba, no estado de São Paulo, em 1975. Em 2007 iniciou o comércio e fabricação de transformadores ecológicos (ITAIPU, 2019)
ITAM	A Indústria de Transformadores Amazonas Ltda, ITAM, é uma empresa de médio porte especializada na produção de transformadores de distribuição, bem como prestadora de reparos em transformadores em geral (ITAM, 2019)
ITB	Fundada em 1974, a ITB Equipamentos Elétricos é uma empresa de referência e uma das maiores fabricantes de transformadores elétricos de distribuição da América Latina. Dispõe de uma diversificada linha de transformadores de distribuição para as diversas aplicações nas redes urbanas, rurais e industriais. Também produz as linhas de reguladores automáticos de tensão monofásicos e compensadores dinâmicos de potência reativa (ITB, 2019)
ITR	A ITR foi criada em 1997 e em abril de 2014 recebeu a Certificação ISO 9001:2008 (ITR, 2019);
RIO PRETO	Especializados na fabricação de transformadores de média e alta tensão, de distribuição e força. São Transformadores à óleo e à seco, monofásicos, bifásicos, trifásicos, de distribuição e força, isoladores, rebaixadores, fabricação de tanques, dentre outros (TRP, 2019)
ROMAGNOLE	A Romagnole Produtos Elétricos S.A. é uma das maiores fabricantes de produtos elétricos do Brasil. Atuando neste mercado desde 1962, a empresa oferece uma vasta linha de transformadores de distribuição, industriais e de força, cabines de entrada, medição, transformação, seccionamento e proteção, ferragens eletrotécnicas, estruturas para usinas solares, torres de transmissão, postes e demais artefatos de concreto utilizados em redes elétricas (ROMAGNOLE, 2019)
SIGMA	A Sigma transformadores iniciou suas atividades em 1990 e está instalada na área industrial na cidade de Lagoa Vermelha - RS. Inicialmente, a empresa tinha o propósito de prestar serviços de manutenção de máquinas elétricas bobinadas, especialmente, motores e transformadores. No ano de 1995 a empresa iniciou a prestação de serviços de manutenção de transformadores para uma grande concessionária do Rio Grande do Sul. A partir de ano de 2002, a empresa iniciou a fabricação de transformadores de distribuição, sendo que os primeiros modelos construídos foram os monofásicos (SIGMA, 2019)
TOSHIBA	É conglomerado multinacional japonês sediado em Tóquio, Japão. Em Março de 2018, a Toshiba transferiu todas as ações em circulações da Toshiba-América do Sul Ltda para TSEA Participações S.A.; A Toshiba América do Sul Ltda deixou de ser subsidiária da Corporação Toshiba desde 29 de Março de 2018 e o nome da companhia foi modificado para Transformadores e Serviços de Energia das Américas LTDA (TOSHIBA, 2019)
UNILUZ	Participa do mercado elétrico nacional há mais de 35 anos, recuperando e fabricando transformadores de alta tensão e insumos correlatos. Iniciou sua trajetória no segmento de eletrificação rural em 1983, no município de São Borja/RS. Alguns anos depois se especializou na recuperação de transformadores, credenciada junto a concessionária Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e atendendo ao setor agrícola (UNILUZ, 2019)
WEG	A WEG S.A é uma empresa multinacional brasileira com sede na cidade de Jaraguá do Sul, no estado de Santa Catarina. A empresa é uma das maiores fabricantes de equipamentos elétricos do mundo, atuando nas áreas de comando e proteção, variação de velocidade, automação de processos industriais, geração e distribuição de energia e tintas e vernizes industriais, entre outros produtos (WEG, 2019)
ZAGO	A Transformadores ZAGO está localizada na cidade de Jaú, interior do estado de São Paulo, foi fundada em 1975 e é especializada na fabricação de transformadores de distribuição, força, autotransformadores e especiais com a finalidade de atender às necessidades específicas de cada cliente, além dos serviços de reforma e manutenção em transformadores de todas as marcas (ZAGO, 2019);
TRAEEL	A TRAEEL iniciou suas atividades em 1992 com a fabricação de transformadores de distribuição, força e especiais. Desde então, a empresa atende concessionárias de energia elétrica, segmentos industriais, comerciais, agrícolas e de serviços em eletrificação rural (TRAEEL, 2019)

2.2.4 *Materiais para Construção*

Os materiais empregados em um projeto de transformador podem ser dividido em três grandes grupos:

- Isolantes;
- Condutores;
- Magnéticos.

2.2.4.1 *Materiais Isolantes*

Para o isolamento das partes energizadas os materiais mais utilizados são:

1. Papel e papelão: nos tipos Kraft e Presspan;
2. Algodão: para o enfaixamento de condutores sensíveis;
3. Fibra de vidro: para o isolamento e amarração de condutores, quando a temperatura supera 12 °C;
4. Madeira: usada para bloquear enrolamentos, amarrar derivações e construção de calços é empregada na maioria das vezes impregnada em óleo;
5. Porcelana: em isoladores e buchas;
6. Neopreme: como guarnição nas junções entre partes moveis;
7. Teflon: a base de politetrafluor-etileno, que pela dureza e resistência mecânica ao desgaste, é empregado como guarnição a elevadas pressões e tormento mecânico;
8. Laminados Fenólicos: são compostos a base de resinas fenólicas e celulosa prensadas a quente, inatacáveis pelo óleo mineral, são facilmente encontráveis em chapas;
9. Resina Epox: visto que antes do endurecimento apresenta-se como um líquido viscoso, tal material é facilmente moldável, portanto, muito utilizada na confecção de peças como calços especiais;
10. Óleo Mineral: desempenha um papel importantíssimo em transformadores, seja como isolante ou como elemento que ao realizar movimentos convectivos, seja natural ou forçados, subtrai calor da parte ativa.
11. Cloro-difenilos: são isolantes líquidos, sintéticos, inoxidáveis e incombustíveis.
12. Vernizes e Isolantes: muito usados nos condutores dos enrolamentos isolados com papel ou algodão.

Os materiais citados são os mais comuns na fabricação de transformadores de

distribuição (MOURA, 2009).

2.2.4.2 *Materiais Condutores*

Dos materiais condutores utilizados, o mais importante e de maior uso é o cobre eletrolítico. O alumínio, pelo seu menor custo, também é largamente utilizado (MOURA, 2009).

Os condutores são utilizados na forma de fios de seção circular isolados entre si. A Tabela 4 mostra as principais características do cobre e do alumínio.

Tabela 4 – Principais Características do Alumínio e do Cobre

Característica	Cobre	Alumínio	Unidade de Medida
Peso específico	8,9	2,7	kg/dm ³
Resistividade a 0°	0,016	0,0265	ohm.mm ² /mt
Coefficiente de Temperatura	0,00426	0,00426	-
Calor específico	0,0952	0,21	kcal/kg.°C
Condutibilidade Térmica	3,86	2,04	W/cm.°C
Coefficiente de Dilatação Linear	1,67 × 10 ⁻⁵	2,3 × 10 ⁻⁵	mm.°C/mm
Carga de Ruptura e Tração - cru	39	15-25	kg/mm ²
Carga de Ruptura e Tração - Recozido	25	-	”
Carga ao Limite de Elasticidade - crú	25	-	”
Carga ao Limite de Elasticidade - Recozido	5-8	-	”
Temperatura de fusão	1083	656	°C
Modulo de Elasticidade	1300	6300	kg/mm ²

Fonte: Adaptado de (MOURA, 2009)

2.2.4.3 *Materiais Magnéticos*

Para a construção dos circuitos magnéticos dos transformadores de distribuição e força, são utilizadas chapas especiais de alta permeabilidade. Os tipos mais comumente utilizados estão descritos na Tabela 5. O efeito de encurtamento que se verifica nas chapas quando percorridas por um fluxo magnético é chamado magnetostrição. Essa variação física de dimensões acontecerá com frequência de duas vezes a frequência da fonte de alimentação gerando ruídos e vibrações que não podem ser desprezados, especialmente em transformadores de grande porte com potências superiores a 300 KVA (MOURA, 2009).

Tabela 5 – Tipos de Chapas de Alta Permeabilidade

Tipo	Espessura mm	Perda Máxima em W por quilo a 1500 Gauss e 50Hz	Perda Máxima em W por quilo a 1500 Gauss e 60Hz
M3	0,254	0,815	1,08
M4	0,28	0,88	1,16
M5	0,305	0,97	1,27
M6	0,35	1,10	1,45

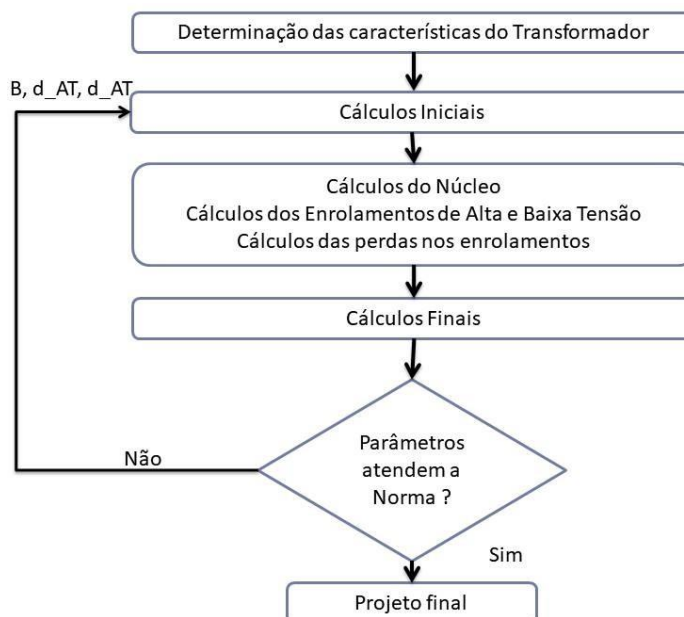
Fonte: Adaptado de (MOURA, 2009)

2.3 Cálculo da Parte Ativa de um Transformador de Distribuição

Esta seção apresenta uma das formas de projeto da parte ativa de transformador de distribuição. Existem diversas sequências de executar o dimensionamento do transformador, cada fabricante tem suas técnicas para chegar as dimensões que atenda as limitações estabelecidas pela norma, NBR 5440. Inicialmente, o projeto foi convencionalmente implementado no *software MATLAB*[®]. Posteriormente, a implementação do algoritmo genético para a otimização do projeto.

O roteiro clássico da implementação do projeto de transformadores, conforme a formulação básica para os cálculos de transformador, são encontrados em vários autores como em (SOUZA, 2012), (MOURA, 2009), (UMANS, 2014), (MARTIGNONI, 1991) e é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma de Projeto de um Transformador Trifásico



Fonte: Adaptado de SOUZA (2012)

As variáveis de ajuste do sistema B , d_{AT} e d_{BT} representam respectivamente, indução magnética (em tesla), densidade de corrente enrolamento de alta tensão e densidade de corrente enrolamento de baixa tensão.

No fluxograma da Figura 9 é apresentado o roteiro geral do cálculo do transformador de distribuição. Os cálculos têm início com as determinações das características do transformador por especificações do cliente. Posteriormente, os cálculos iniciais relacionando as correntes e tensões das bobinas. Seguido pelos cálculos relacionados ao núcleo, os cálculos dos enrolamentos de alta tensão e dos enrolamentos de baixa tensão. Conclui-se o projeto com a previsão de perdas e a previsão da tensão de curto-circuito e corrente de excitação. As expressões dos cálculos do transformador, como utiliza várias variáveis empíricas, são restritas e de propriedade do fabricante, sendo por isso expressas apenas a dependência destas variáveis (AGUIAR, 2005), (MARTIGNONI, 1991) e (SOUZA, 2012).

Aspectos como o número de fases, potência, tensão da bobina primária e secundária, e frequência de operação do equipamento são determinados pela necessidade do cliente. Além dessas exigências, há padrões regulados pela NBR 5440 que devem ser obedecidas. A Figura 10 mostra o conjunto dos dados iniciais que devem ser conhecidos pelo projetista.

De posse das especificações, pode-se iniciar a fase dos cálculos básicos relacionados a correntes e tensões, determinando a categoria de fio e densidade de corrente, se este for o almejado. Figura 11 mostra a sequência dos cálculos a serem realizados nesta etapa.

A densidade de corrente relaciona a corrente no condutor na seção do mesmo. Conhecida à densidade de corrente, é possível determinar o condutor mais adequado, conforme a tabela de fios comerciais. A seção do condutor para cada uma das bobinas podem ser determinada pelas Equações 2.1 e 2.2

$$S_1 = \frac{I_1}{d_{AT}} \quad (2.1)$$

$$S_2 = \frac{I_2}{d_{BT}} \quad (2.2)$$

onde:

S_1 é a seção do condutor do enrolamento primário, em mm^2 ;

S_2 é a seção do condutor do enrolamento secundário, em mm^2 ;

I_1 é a corrente nominal primária, em A;

I_2 é a corrente nominal secundária, em A;

Figura 10 – Características iniciais de projeto

Características iniciais para o projeto de um transformador	
Necessidade do Cliente	Valores estabelecidos pela norma
<ul style="list-style-type: none"> • Numero de Fases (NF) • Potência (kVA) • Tensões primárias (AT) • Tensões secundárias (BT) • Frequência (F) 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdas em Vazio (Wfe) • Perdas Totais (WT) • Tensão de curto-Circuito (Vcc) • Corrente Máxima de excitação (I_0)

Fonte: Adaptado de SOUZA (2012)

d_{AT} é a densidade de corrente do fio de alta tensão, em A/mm²

d_{BT} é a densidade de corrente do fio de baixa tensão, em A/mm².

Conforme a Figura 11, o passo seguinte é a obtenção da corrente de linha, dada pela Equação 2.3.

$$I_{L_{AT}} = \frac{kVA}{\sqrt{3} * V_L} \quad (2.3)$$

onde:

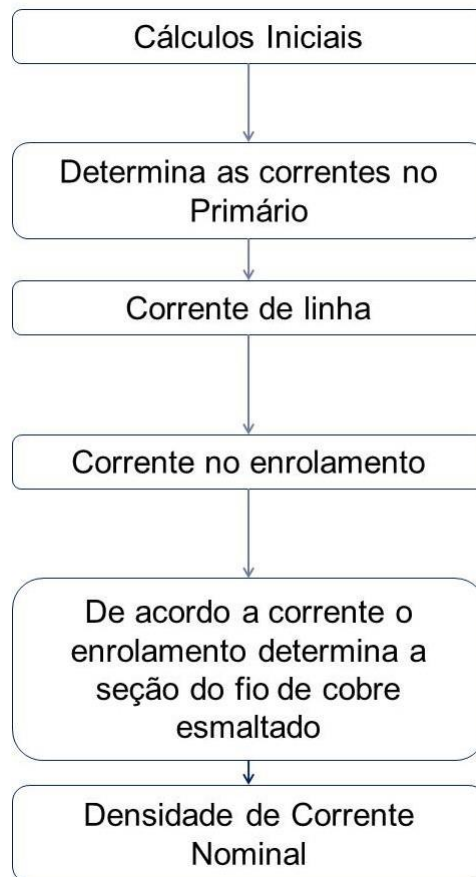
kVA é a Potência do Transformador; enquanto V_L é a Tensão de linha;

Dessa forma, a corrente no enrolamento é dada pela Equação 2.4.

$$I_{AT} = \frac{I_{L_{AT}}}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

As tabelas dos fabricantes relacionam as correntes com as secções dos fios, com a secção do fio corrigida é possível determinar a densidade de corrente corrigida nas Equações 2.1 e 2.2.

Figura 11 – Cálculos iniciais do projeto



Fonte: Adaptado de SOUZA (2012)

2.4 Cálculos do núcleo e Enrolamentos

Dado que já foram fornecidas as especificações, os cálculos iniciais foram devidamente realizados. O dimensionamento do circuito magnético do núcleo é efetuado conforme a sequência da Figura 12.

A área da coluna é dada pela Equação 2.5 (SOUZA, 2012 apud KOSOW, 1985).

$$AC = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{pE}}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot f} \quad (2.5)$$

onde:

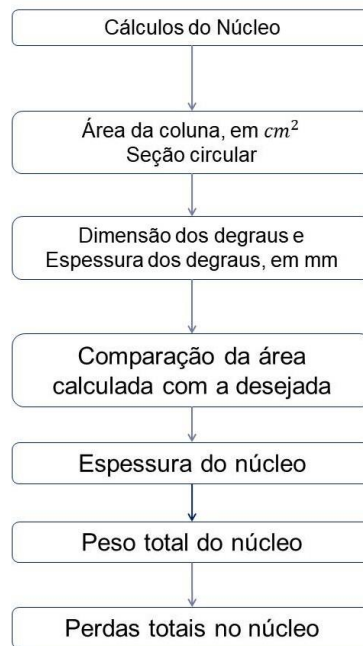
AC é a área da coluna em cm^2 ;

V_{pE} são Volts por espira;

B é a indução magnética, dada em Tesla; f é a frequência, em Hz.

Considerando as dimensões necessárias para as bobinas e as folgas usuais entre os enrolamentos de alta e baixa, bem como dos conjuntos destes, com o núcleo de ferro, os valores

Figura 12 – Cálculos das Variáveis do Núcleo



Fonte: Adaptado de SOUZA (2012)

são obtidos para as dimensões finais do núcleo (SOUZA, 2012).

O peso do núcleo pode ser obtido conforme a Equação 2.6 (MOURA, 2009).

$$P_{SOFe} = [(2 \cdot H_{stm} + 3 \cdot H_n + 4 \cdot L_n) \cdot AC \cdot 10^{-4} \cdot 7,65] \quad (2.6)$$

Sendo:

P_{SOFe} é o peso do núcleo de ferro;

H_n é a altura do núcleo;

L_n é a largura da janela do núcleo;

H_{stm} é a altura da secção transversal do núcleo.

As perdas totais no Núcleo ou no Ferro (W_{fe}) são o resultado do somatório das perdas por histerese e por correntes induzidas (Equação 2.7).

$$W_{Fe} = P_H + P_F \quad (2.7)$$

Sendo:

W_{fe} são as perdas no ferro;

P_H é a perda por histerese;

P_F é a perda por corrente parasitas ou Foucault.

As Equações 2.8 e 2.9 apresentam as perdas por Foucault e por histerese respectivamente.

$$P_F = K_s \cdot B \cdot f \quad (2.8)$$

$$P_H = 2,2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot 10^3 \quad (2.9)$$

Sendo:

K_s é a coeficiente de Steinmetz que depende do material do núcleo.

d é a espessura da laminação do núcleo.

Os cálculos do enrolamento de alta tensão apresenta a sequência da Figura 13. O dimensionamento dos enrolamentos das bobinas primária e secundária são determinadas conforme a espessura dos fios calculados anteriormente. As composições das distâncias entre as bobinas são valores que dependem da classe de tensão de isolamento que serão os mesmos valores especificados pelo fabricante. A quantidade de camadas nas bobinas depende do fio escolhido e da altura do núcleo.

O número de espiras por enrolamento é dado pela Equação 2.10.

$$V_{pE} = 44,4 \cdot f \cdot AC \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (2.10)$$

Dessa forma, o número de espiras no enrolamento de alta tensão é dado pela Equação 2.12.

$$N_{AT} = AT \cdot \sqrt{\frac{N_{BT}}{3 \cdot BT}} \quad (2.11)$$

Sendo:

N_{AT} é o número de espira do primário;

N_{BT} é o número de espira do secundário;

AT é a alta tensão;

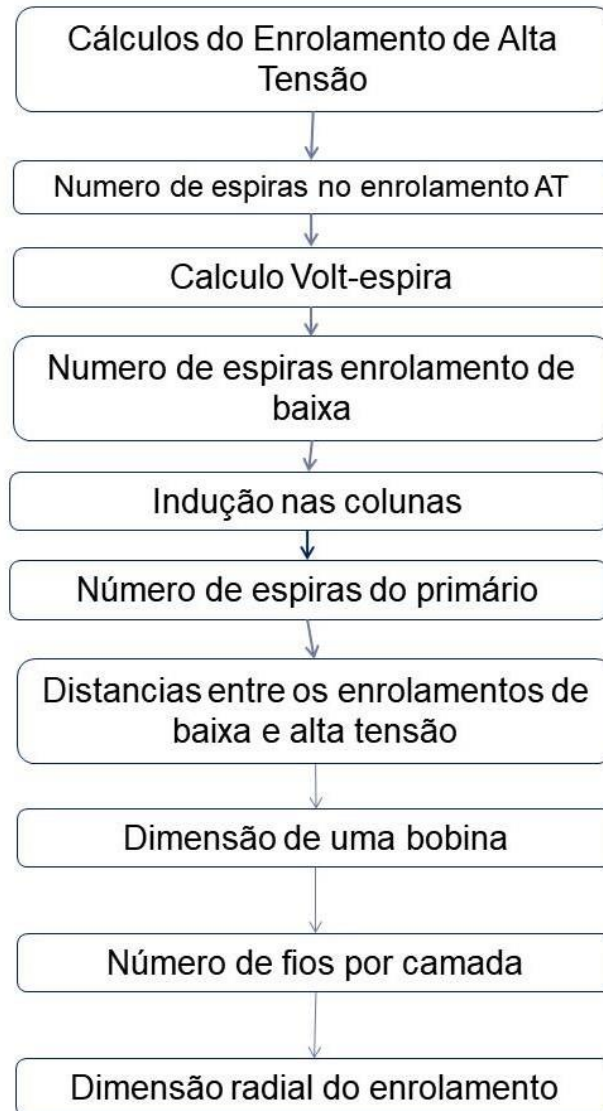
BT é a baixa tensão.

Para o enrolamento de baixa a Figura 14 ilustra a sequência de cálculo.

Visto que a corrente de linha e a corrente de fase são iguais, seu valor pode ser obtido pela Equação 2.12.

$$I_{LBT} = I_{FBT} = \frac{KVA}{BT \cdot \sqrt{3}} \quad (2.12)$$

Figura 13 – Sequência de cálculo do enrolamento de alta tensão



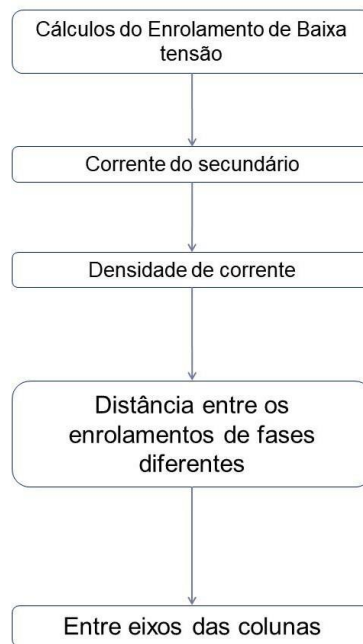
Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2012)

Ao encontrar a densidade de corrente, conforme Equação 2.2, faz-se a escolha do fio retangular para bobina de baixa tensão.

É possível fazer uma previsão das perdas no transformador, mas de maneira geral essas também dependem da tecnologia empregada na fabricação variando para cada fabricante. Uma estimativa das perdas pode ser feita conforme a sequência da Figura 15.

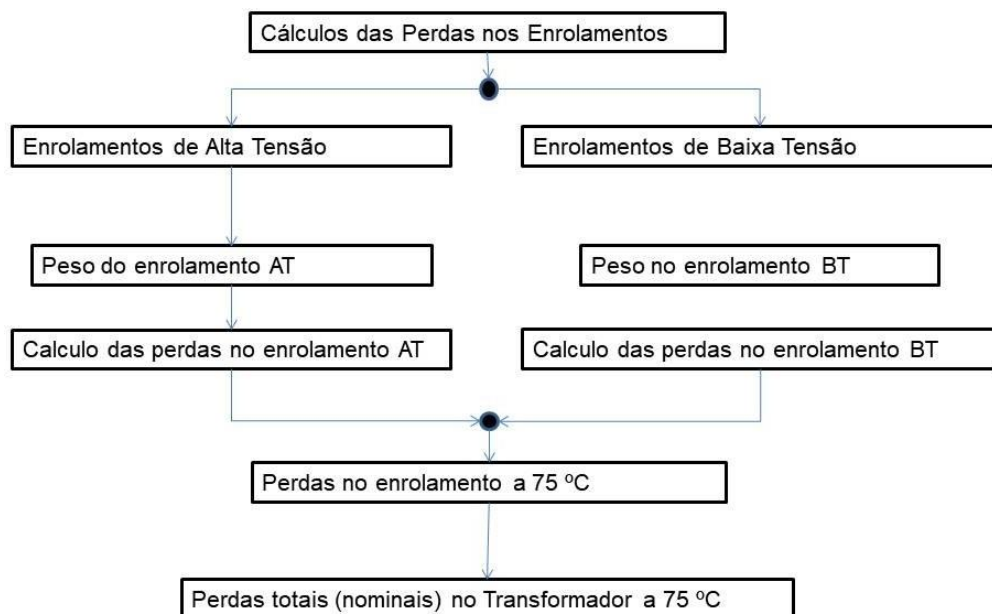
As perdas totais são o resultado do somatório das perdas no cobre (enrolamentos), conforme a Figura 15, com as perdas no núcleo ferromagnético, de acordo a Equação 2.7. As perdas no cobre variam segundo a temperatura e é uma função do peso da bobina e a densidade de corrente (MOURA, 2009).

Figura 14 – Sequência de cálculo do enrolamento de baixa tensão



Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2012)

Figura 15 – Sequência de estimativa das perdas nos enrolamentos



Fonte: Adaptado de (SOUZA, 2012)

2.5 Cálculos Finais

A norma para transformadores prevê limites para a tensão de curto-circuito (V_{cc}) e da corrente de excitação (I_0). As Equações 2.13 e 2.14 relacionam a tensão de curto e a corrente de excitação a outras variáveis do sistema.

$$V_{cc} = f(d_{AT}, R_B, N_B, W_{cu}, kVA) \quad (2.13)$$

$$I_0 = f(Pesof_e) \quad (2.14)$$

Sendo que:

d_{AT} é o diâmetro externo da bobina de alta tensão;

R_B é a radial da bobina de baixa tensão;

N_B é o número de camadas da baixa tensão;

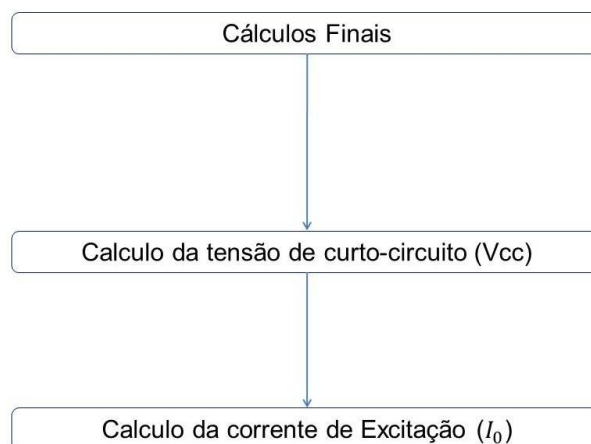
W_{cu} são as perdas no cobre;

kVA é a potência do transformador;

$Pesof_e$ é o peso do núcleo.

A Figura 16 ilustra a sequência dos cálculos finais para o dimensionamento da parte ativa de um transformador trifásico.

Figura 16 – Sequência de estimativa das perdas nos enrolamentos



2.6 Algoritmos Genéticos

A necessidade de modelos alternativos para obtenção dos resultados desejados, com menores esforços computacionais que dependam menos da capacidade de processamento da máquina, fez surgir a maioria dos métodos de inteligência computacional. Os AG's são aplicáveis a problemas de grande complexidade de tempo e dimensão. Quando o campo de soluções é extenso, que inviabiliza ou torna demasiadamente lentos, métodos cuja premissa seja percorrer ponto a ponto do espectro, o AG executa uma varredura paralela, que reduz significativamente o custo computacional (LOPES, 1999).

Os AG's são classificados como parte do conjunto de técnicas identificadas como algoritmos evolucionários, como o próprio nome sugere, são métodos computacionais, inspirados no processo natural de evolução das espécies. Trata-se de uma técnica de busca "Aleatória-Guiada", dado que contém elementos de aleatoriedade, mas direciona a busca a partir de especificações do problema analisado (LINDEN, 2008).

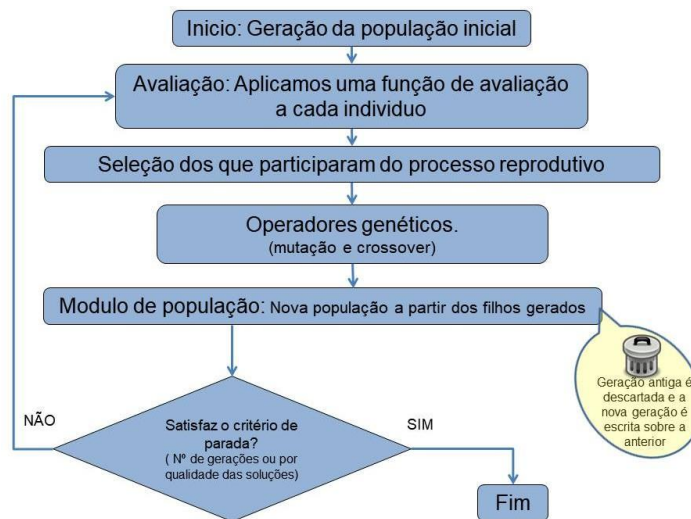
Os AG's visam encontrar uma resposta próxima do que seria o caso "ótimo", sem que para isso haja uma busca ponto a ponto nos possíveis resultados (como efetuar um método algébrico). A procura é orientada e segue um padrão inspirado na teoria da Evolução Darwiniana. Reduz assim, o tempo de execução do algoritmo, independente do processador utilizado ou outra característica de *hardware* (POLTOSI; LEMKE, 2009).

Dado que, toda a lógica de programação é baseada na teoria da sobrevivência dos indivíduos mais adaptados, é necessário compreender o básico da cadeia reprodutiva e seus termos, para distinguir seus análogos em programação. A partir do pressuposto, que os membros com os melhores desempenhos tendem a sobreviver e assim se reproduzir, mais que os membros menos adaptados. É possível sugerir que a próxima geração tende a ser mais apta que a anterior, pelas oportunidades de herdar as boas características de seus pais com bons desempenhos (LINDEN, 2008).

Da biologia, sabe-se que todo ser vivo carrega consigo um código genético único, que define todas as suas características e o diferencia dos demais de uma mesma espécie. Esse código chamado Ácido Desoxirribonucleico (DNA) é passado através da reprodução aos descendentes, em que carrega as informações genéticas dos antepassados. A formação de um novo ser passa pela combinação do genoma (conjunto de cromossomos de uma determinada espécie) de seus pais, gerando um código genético exclusivo à aquele indivíduo, mas que carrega os genes (cromossomos dentro do DNA) dos seus antecessores (LINDEN, 2008).

No algoritmo, de acordo os seus aspectos biologicamente inspirados, cada ponto no campo de soluções corresponde a um “indivíduo”. Esse no que lhe concerne, recebe uma codificação que assim como na linguagem natural pode ser chamada cromossomo, onde carrega as características desse indivíduo. O conjunto destas define o quão adaptado é o ser, ou o quão boa é a solução. Para isso, esse cromossomo é submetido a uma função de avaliação, que depende diretamente do problema a qual pretende resolver. Após a ponderação, é possível identificar aqueles com melhores resultados e induzi-los a reproduzirem-se mais, perpetuando as boas informações genéticas(LINDEN, 2008). A Figura 17 ilustra o fluxograma de um algoritmo genético.

Figura 17 – Fluxograma: Algoritmo Genético.



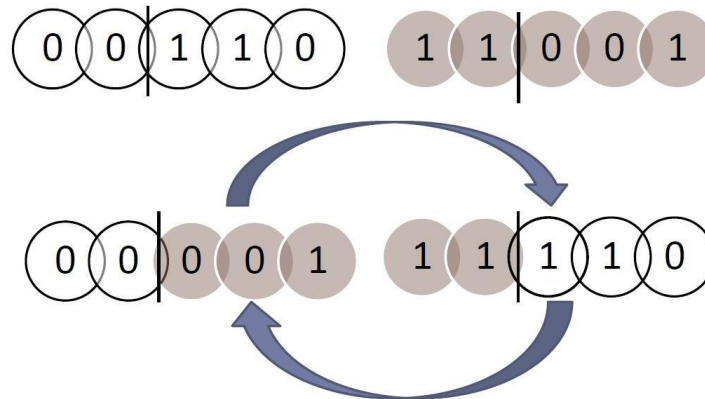
Fonte: Adaptado de (LINDEN, 2008)

No processo de reprodução, os chamados operadores genéticos se encarregam de produzir novos seres diferentes de seus antepassados e entre si. Esses operadores são o *crossover* e a mutação. *Crossover* é um termo da biologia, que descreve o comportamento do cromossomo ao duplicar-se e “embaralhar” seus genes, num processo em que cada cromossomo troca um parte do seu código com o seu par, formando novos e diferentes códigos genéticos, que carregam a características de seus pais, mas não são iguais a eles (LOPES, 1999).

Essa troca de trechos do código pode acontecer em vários pontos aleatórios, permitindo uma variedade genética nas novas gerações. Mesmo que dois novos indivíduos compartilhem dos mesmos pais, ainda diferirão entre si. A Figura 18 ilustra o processo com apenas um ponto de corte, em que uma parte de cada cromossomo pai, se recombina para formar

os filhos. No momento inicial, dois cromossomos “pais” e seus pontos de cortes ou pontos de recombinação são mostrados. Posteriormente, os descendentes gerados são exibidos, que carregam características de seus pais.

Figura 18 – Representação do processo de recombinação



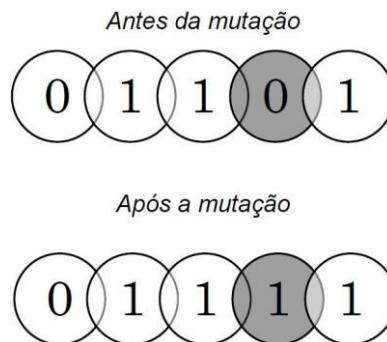
Fonte: Adaptado de (LINDEN, 2008)

A Figura 19 ilustra o processo referente ao operador genético mutação. O termo também tem origem na biologia, e pode ser definido como uma variação aleatória e com baixíssima ocorrência, que modifica um pequeno trecho do código genético. Gera então uma nova característica que não existia antes nos antepassados, com a alteração de um ou mais alelos no cromossomo, ou, no caso do AG de representação binária, de um ou mais bits. Essa nova característica pode ser boa ou ruim. Apesar de ser impossível garantir que essa mudança no código seja positiva, ela sem dúvidas, contribuirá para aumentar a variedade genética. Existe a probabilidade, que ao selecionar os melhores indivíduos a se reproduzirem mais que os demais, ocorra uma tendência a convergência genética, o algoritmo não conseguiria alcançar novos espaços no ambiente de busca, mas convergiria rapidamente para um pequeno espectro, limitando a capacidade do método.

A mutação é um dispositivo eficaz para evitar essa convergência. Seu efeito é mostrado na Figura 19. O código binário corresponde ao cromossomo de um determinado indivíduo em dois momentos (anterior e posterior) à mutação. Pode-se observar que em um determinado ponto acontece uma mudança no bit selecionado.

De maneira geral, a aplicação deste método inspirado no processo reprodutivo seguirá o pseudocódigo do Algoritmo 1, onde em um tempo $t=0$ inicia-se a população de forma aleatória. Neste ponto, está o principal mecanismo de aleatoriedade dos AG's. Assim como em um procedimento numérico/iterativo, que requer um "chute" inicial, a geração da população no

Figura 19 – Representação do processo de mutação.



Fonte: Adaptado de (LINDEN, 2008)

tempo zero é randômica justamente para garantir que o material genético que corresponderá a cada solução, será o mais diversificado possível. Cada indivíduo da população, como mencionado anteriormente, possui um código (cromossomos associados) que pode, em um modelo mais simples de AG's, ser correspondente ao conjunto de bits (como nos exemplos das Figuras 18 e 19), apesar de existirem outras formas de codificá-lo.

A dimensão do problema, o número de indivíduos da população e o número de Bits de cada cromossomo mensuram a precisão da resposta. A função de avaliação é a grande responsável pelas especificações do sistema.

Algoritmo 1: Lógica de programação de um algoritmo genético

início

$t=0$

inicializa população P

Enquanto não atingir o critério de parada faça

Avalie população P(t);

Selecione pais P(t);

Recombinação e Mutação P';

Avalie população P';

P(t+1) Selecione sobreviventes P(t),P';

T=T+1;

Fim Enquanto

fim

Após a formação da primeira geração de indivíduos, a estrutura base do AG tem início. Até que a condição de parada seja atingida, que varia, com número máximo de interações ou

até que um dos indivíduos seja equivalente a uma solução satisfatória. Enquanto a configuração de término não se aplica, a geração é submetida a uma função de avaliação, que determina quão apto é cada membro da população. Conforme os pesos obtidos na avaliação, os que se reproduziram com maior frequência, serão aqueles que possuírem os melhores indicativos. Com os pais selecionados, os operadores genéticos (mutação e *crossover*/recombinação) são aplicados, gerando novos indivíduos. A população é novamente submetida a uma avaliação e então pelo princípio da sobrevivência dos mais aptos, os sobreviventes são selecionados para compor próxima geração no tempo=tempo atual+ 1.

Além do pseudocódigo o fluxograma da Figura 17 que recria o laço de execução do algoritmo (LINDEN, 2008).

O algoritmo genético é uma técnica de busca muito utilizada em problemas demasiadamente complexos ou de grande dimensão do espaço de buscas (LOPES, 1999) e (LINDEN, 2008). Muitos problemas de engenharia utiliza essa ferramenta para encontrar soluções satisfatórias (PINHEIRO *et al.*, 1997), (ALVES *et al.*, 2002) e (AMORIM, 2006). Pode-se citar o caso em que um projeto de transformador é otimizado (POLTOSI; LEMKE, 2009), (MALAGOLI *et al.*, 2014), (SOUZA, 2012), (RIGHI *et al.*, 2018), (SOBRINHO *et al.*, 2019) e (GEORGILAKIS, 2009). Essa categoria de projeto tem um grande de espaço de busca, dificultando encontrar a melhor solução, que associa alta eficiência e baixo custo. O AG, devido a sua busca paralela e suas características de otimização multiobjetivos, torna-se uma ferramenta aplicável.

3 METODOLOGIA

3.1 Algoritmo Genético Aplicado ao Dimensionamento de Transformadores

Em (MOURA, 2009) o dimensionamento de um transformador trifásico de distribuição é realizado através do método tradicional, onde as variáveis de ajuste são escolhidas a critério do projetista, de modo a atender a norma.

Considerando as seguintes especificações:

1. Número de fases: 3
2. Potência contínua fixada em: 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

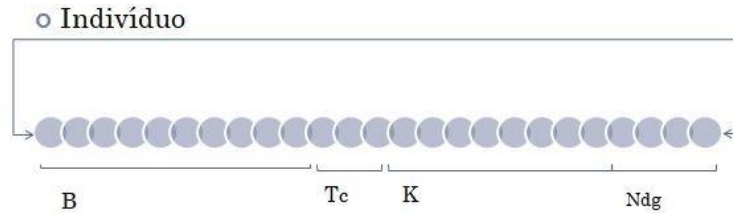
O transformador projetado em (MOURA, 2009), a partir das especificações descritas acima, tem o número de degraus definido como cinco, o tipo de chapa utilizada como M5, o valor de indução em Tesla desejado na coluna em $1,5 \text{ Wb/m}^2$ e o coeficiente K de ajuste das perdas no núcleo em 1240. Entretanto, esses valores são ajustáveis conforme a experiência do projetista ou resultados de ensaios empíricos. Visto que as variáveis: \mathbf{B} , tipo de chapa, número de degraus e K podem ter um ranger de ajuste da seguinte maneira:

1. \mathbf{B} - Indução Magnética em tesla da coluna entre 1,4 e $1,7 \text{ Wb/m}^2$
2. T_c - Tipo de chapa de material magnético entre M3, M4, M5 e M6
3. K - Constante relacionadas as perdas desejadas entre 1000 e 1240

4. N_{dg} - Número de degraus, varia entre 1 e 10

A codificação das variáveis é fundamental do método, é com ela que é possível fazer a combinação de variáveis de projeto dos indivíduos possível de ser imputado os operadores genéticos. Neste estudo a técnica de codificação binária foi empregada, a Figura 20 ilustra a configuração de um indivíduo do AG, onde cada espaço representa um bit.

Figura 20 – Indivíduo do AG no projeto de transformadores



Fonte: O autor

Dessa forma a precisão das variáveis é de:

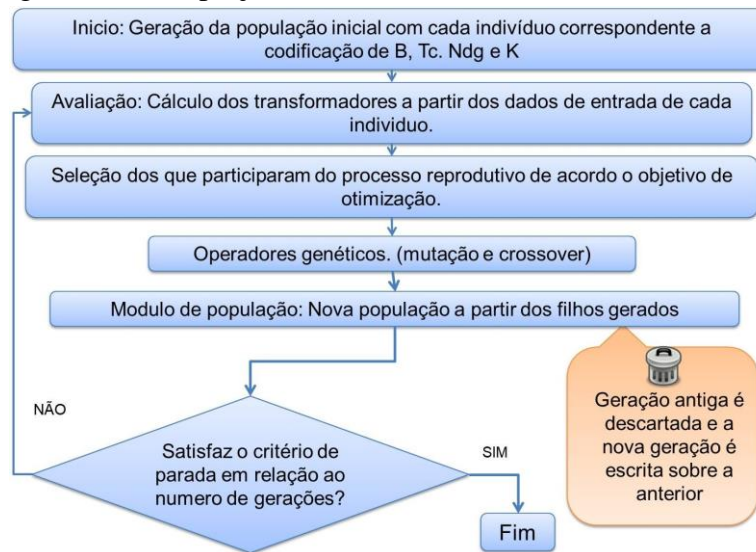
- **B** – Indução Magnética, com passo de 0,000 2;
- T_c – Tipo de Chapa, com passo de 1 (por ser uma variável discreta);
- K – Coeficiente de perdas, com passo de 0,234;
- N_{dg} – Número de degraus, com passo de 1.

De acordo com a passo (precisão) e o ranger de cada variável, o número total de combinações possíveis é de 134.217.728 (134 milhões de possibilidades). Tornando-se inviável realizar o teste de todos os projetos possíveis.

A aplicação do AG genético no cálculo de um transformador é uma busca pela combinação das variáveis de projeto, conforme o ranger do espaço de busca, de maneira que se otimize uma característica desejada no transformador final. A cada geração os indivíduos, passam pelos processos de avaliação em que cada individuo é decodificado para as variáveis de ajuste do cálculo do transformador, a partir dos resultados o transformador projetado recebe uma classificação conforme o critério de otimização. Os processos de *crossover* e mutação que garantem a criação de novas gerações e variedade genética. O elitismo, que também é uma ferramenta do AG sendo utilizada neste trabalho, garante que o melhor indivíduo seja mantido para a próxima geração. Novas gerações são geradas até que o critério de parada seja satisfeito. A Fig. 21 ilustra adequação do método para o projeto de transformadores.

É possível observar que as Figuras 17 e 21 são similares, entretanto a Figura 21 ilustra como o método AG mostrado na Figura 17 é aplicado ao problema do cálculo da parte ativa de transformador trifásico, onde a entrada é o vetor individuo e a saída após o número

Figura 21 – Fluxograma AG no projeto de transformadores



Fonte: O autor

determinado de gerações é o transformador otimizado para as especificações solicitadas.

3.1.1 Definição do Critério de Parada.

O critério de parada do algoritmo depende da quantidade de gerações definidas ou do valor especificado de uma variável sugerida. Para o problema de otimização de transformadores trifásicos as variáveis ideais do transformador ideal é desconhecido, sabem-se somente os aspectos a serem aprimorados, como no caso da busca por um transformador mais leve que demande uma quantidade menor de material, dessa forma o algoritmo genético aplicado neste trabalho foi definido como critério de parada o número de gerações.

O número de gerações deve ser grande o suficiente para permitir que haja evolução o algoritmo possa convergir para os melhor indivíduos, mas não demasiadamente grande a ponto de tornar muito lento o tempo de execução do algoritmo (LINDEN, 2008). É possível observar, apesar das características de aleatoriedade do algoritmo, que a partir de um determinado número de gerações existe uma estabilização da solução de melhor desempenho, dessa forma é possível estimar a quantidade necessária de gerações a partir de testes com grandes números de gerações.

Para a realização dos testes com um grande número foi estabelecida um função de avaliação genérica conforme o pseudo-código a seguir.

Início da Função de Avaliação

1 - custo = massa total;

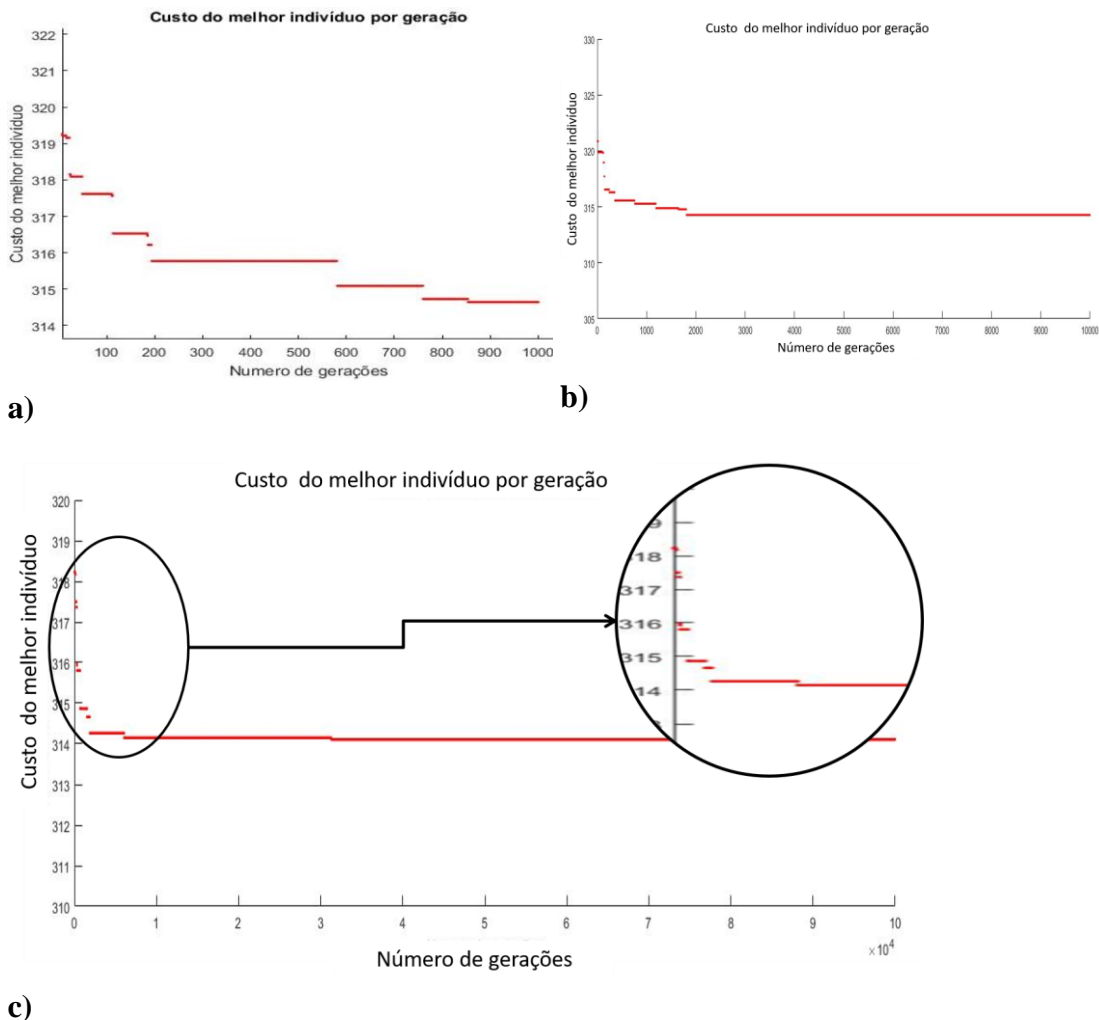
2- *Fitness* do AG= Mínimo Custo.

Fim da Função de Avaliação

Neste caso a função de avaliação avalia somente o valor mínimo de massa total do transformador desprezando os critérios de eficiência da norma apenas para fins de avaliação do critério de parada.

A Figura 22 mostra os gráficos da estabilização do melhor indivíduo para (a) 1000 gerações, (b) 10 000 gerações e (c) 100 000 gerações. No recorte da Fig. 22 (c) é possível observar uma estabilidade maior anterior a 10 000 gerações.

Figura 22 – Gráficos de desempenho do melhor indivíduo para (a) 1000 gerações, (b) 10 000 gerações e (c) 100 000 gerações

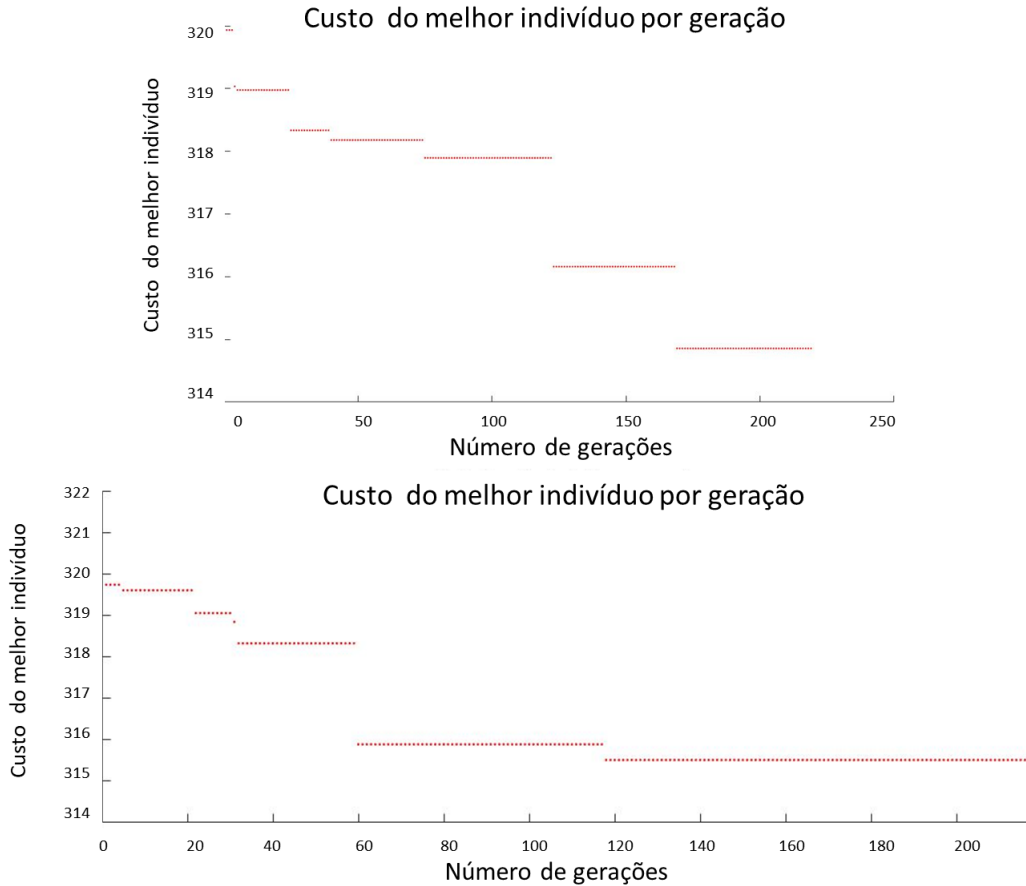


Fonte: O autor

Outra forma de avaliar o critério de parada é definindo a parada após o melhor indivíduo permanecer estável em um determinado número de gerações. Para isso a Figura 23

ilustra os gráficos de parada após estabilidade do melhor indivíduo.

Figura 23 – Gráficos de estabilidade de desempenho do melhor indivíduo em um determinado número de gerações para (a) 50 gerações estáveis, (b) 100 gerações estáveis



Fonte: O autor

Na simulação com parada após 50 gerações com melhor indivíduo estável, Figura 23 (a), o número final de gerações fica em torno de 240, já para parada após 100 gerações com melhor indivíduo estável, Figura 23 (b), a parada se dá em torno de 220 gerações. Isso acontece devido às características de aleatoriedade do método, um mesmo algoritmo pode encontrar a resposta ótima com velocidades diferentes em simulações distintas, assim como a solução encontrada poderá não ser a mesma ao final de cada simulação, e ainda serem ambas soluções "ótimas" para o problema. Entretanto, a medida que se busca estabilidades maiores, as respostas tendem a convergir com um maior número de gerações.

3.1.2 Função de Avaliação

Uma vez definido o critério de parada por número de gerações entre 5.000 à 10.000 gerações, é preciso determinar a função de avaliação para os objetivos de otimização.

Primeiro Objetivo de Otimização: Minimizar o peso final do Transformador reduzindo assim a quantidade de material e o custo de produção do equipamento.

Para isso a função de avaliação deve:

- Garantir que a norma seja atendida;
- Buscar o menor peso possível nessas condições.

A normativa NBR que estabelece os limites de eficiência para transformadores é a NBR 5440, para ser possível estabelecer uma comparação entre projeto otimizado e o projeto real apresentado em (MOURA, 2009), que aqui será tratado como modelo do "Fabricante X". A Tabela 2 no Capítulo 2 mostra os limites estabelecidos na NBR. Dessa forma, segue o pseudo-código da função de avaliação.

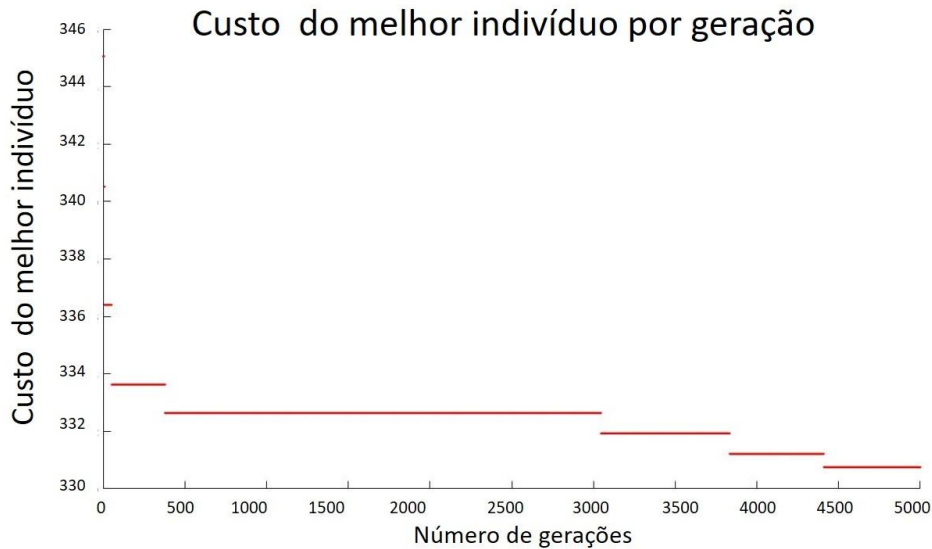
Início da Função de Avaliação

1. SE: corrente de excitação \leq norma e perdas totais \leq norma e tensão de curto circuito \leq norma
2. custo = massa total;
3. SE NÃO:
4. custo = Valor muito alto;
5. fim SE
6. Fitness do AG = Mínimo Custo.

fim da Função de Avaliação

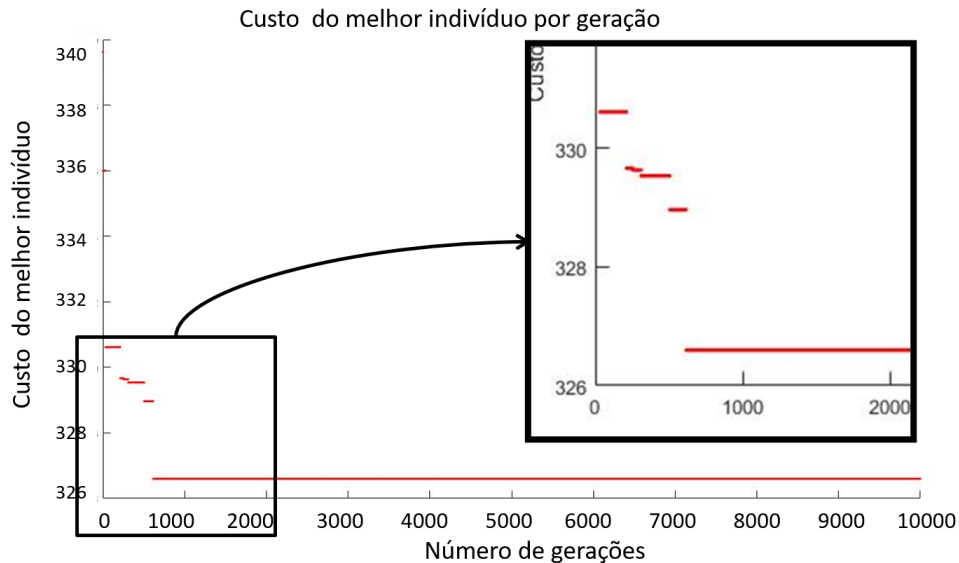
As Figuras 24 e 25 representa o resultado do melhor indivíduo para a avaliação da massa, considerando a norma. No destaque da Fig. 25 é possível observar um valor final superior as dos gráficos onde a função de parada considera somente o peso final total desconsiderando a norma. Isso indica objetivos conflitantes ao buscar um transformador com o menor uso de material e com maior eficiência.

Figura 24 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para massa, com 1000 gerações



Fonte: O autor

Figura 25 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para massa, com 10 000 gerações



Fonte: O autor

Segundo Objetivo: Reduzir as perdas com relação à norma. Para isso a função de avaliação deve:

- Garantir que a norma seja atendida e busca-se um transformador que minimize ao máximo as perdas, para cada vez mais distante dos valores limites da norma.

Dessa forma o pseudo-código da função de avaliação fica:

Início da Função de Avaliação

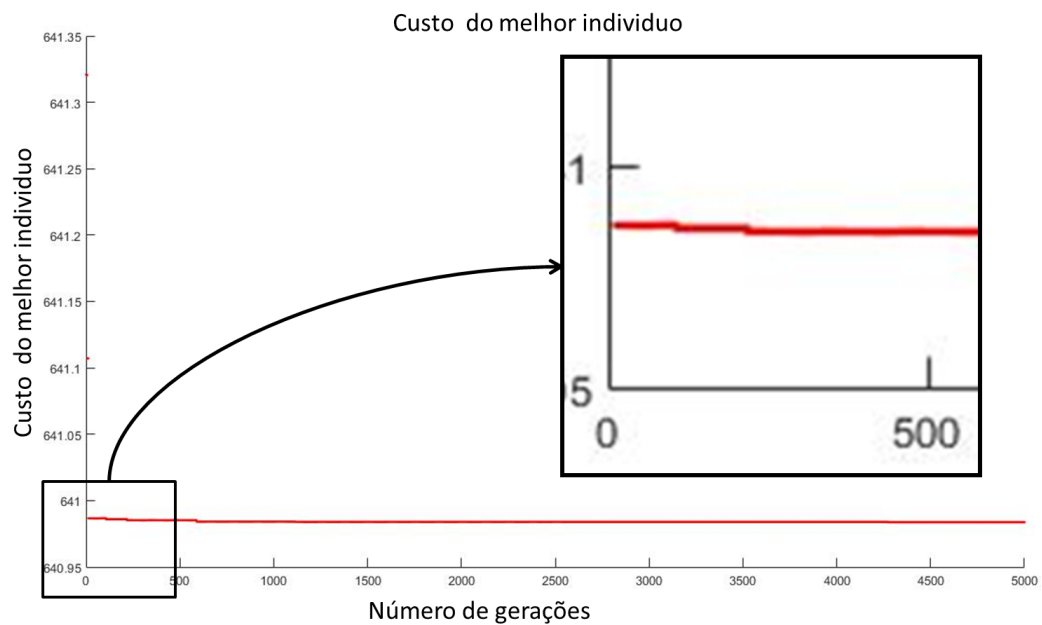
1. Variável auxiliar= Valor muito alto;
2. SE: corrente de excitação \leq norma e perdas totais \leq norma e tensão de curto circuito \leq norma

3. custo=variável auxiliar-(soma das diferenças entre a norma e os valores calculados)
4. SE NÃO:
5. custo=variável Auxiliar;
6. Fim se
7. Fitness do AG=Mínimo Custo

fim da Função de Avaliação

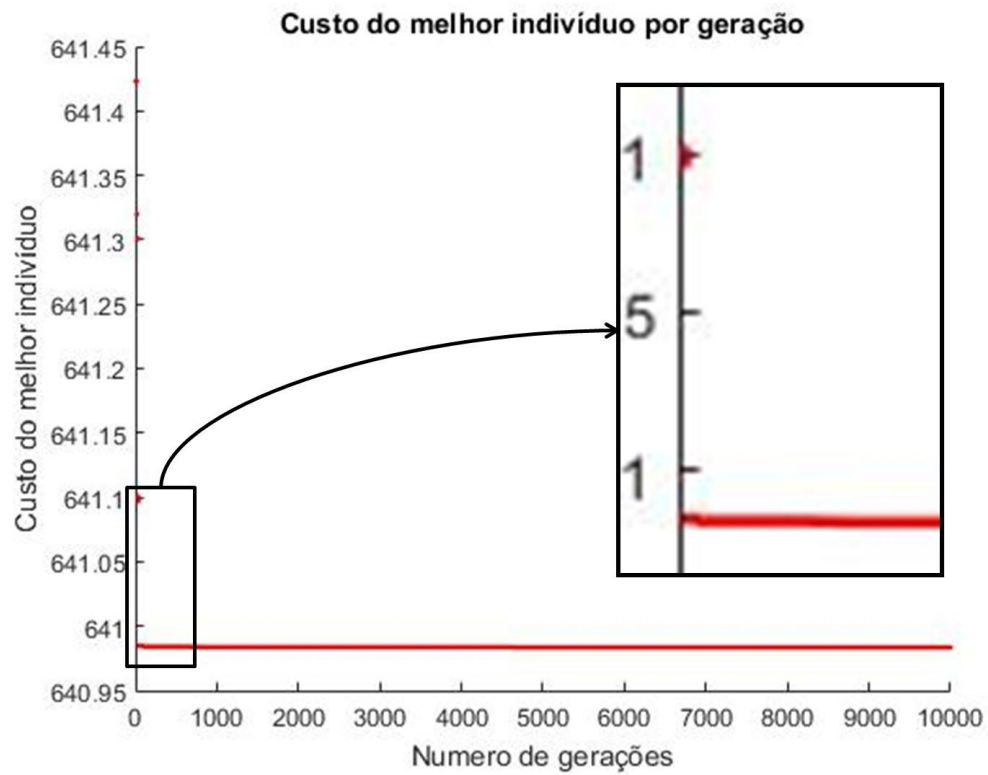
Assim os gráficos para essa função de avaliação e critérios de parada de 5000 e 10 000 gerações são mostrados nas Figuras 26 e 27. É importante destacar que devido às características do AG, uma vez implementado, ele pode ser facilmente modificado e personalizado de acordo aos critérios de interesse do projetista, se adequando a atualizações da norma ou atendendo a novas especificações. O que o torna modelo atrativo para os fabricantes.

Figura 26 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para perdas, com 5000 gerações



Fonte: O autor

Figura 27 – Gráfico de resposta do melhor indivíduo para perdas, com 10 000 gerações



Fonte: O autor

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos para a função de avaliação com critério de otimização da massa, levando em conta as normas de eficiência, são comparados com a norma, na Tabela 6. Sendo o "Fabricante X" o transformador projetado em (MOURA, 2009) que segue o mesmo método para o cálculo do transformador utilizado neste trabalho, no entanto, fixa as variáveis de ajuste (Capítulo 3) e Massa5000 o melhor transformador dimensionado depois de 5000 gerações do AG e Massa10000 o melhor transformador dimensionado depois de 10000 gerações do AG.

Tabela 6 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação à Norma

Parâmetros de Eficiência	Transformadores			
	<i>Fabricante X</i>	<i>AG-MASSA 5000</i>	<i>AG-MASSA 10000</i>	<i>NORMA</i>
Perda em vazio (W)	530,00	530,00	530,00	540
Perda Total (W)	2050,00	2405,52	2413,18	2450
Corrente de excitação (%)	2,20	2,60	2,60	2,6
Tensão de curto circuito (%)	3,48	3,37	3,38	3,5

Embora ambos atendam a norma, os transformadores simulados pelo AG estão mais próximos da fronteira isso se deve ao objetivo de otimização que busca minimizar a quantidade final de material utilizado através da redução da massa. A Tabela 7 faz um comparativo da massa, onde é possível perceber uma grande otimização da massa total nos transformadores tratados pelo AG.

Tabela 7 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação Massa

Parâmetros de Massa	Transformadores		
	<i>Fabricante x</i>	<i>AG-MASSA5000</i>	<i>AG-MASSA10000</i>
Peso do Cobre nos enrolamentos de alta e baixa tensão	113,7	128,33	131,26
Peso do material Ferro magnético	303,90	200,89	192,82
Massa total	417,60	330,75	326,60

As tabelas 8 e 9 compara os resultados para os transformadores com o segundo objetivo de otimização. É possível perceber que existe uma melhoria significativa nos parâmetros de eficiência, mas apresentam um acréscimo da massa total. Sendo Perdas5000 o melhor transformador depois de 5000 gerações do AG e Perdas10000 o melhor transformador depois de

10000 gerações do AG.

Tabela 8 – Tabela Comparativo dos Transformadores para o Segundo Objetivo de otimização com Relação a Norma

Parâmetros de Eficiência	Transformadores			
	<i>Fabricante x</i>	<i>AG-Perdas5000</i>	<i>AG-perdas10000</i>	<i>NORMA</i>
Perda em vazio (W)	530	530,00	530,00	540
Perda Total (W)	2050	2093,74	2093,739	2450
Corrente de excitação	2,2	1,20	1,20	2,6
Tensão de curto circuito	3,48	2,15	2,145	3,5

Tabela 9 – Tabela Comparativo dos Transformadores com Relação Massa para o segundo objetivo de otimização

Parâmetros de Massa	Transformadores		
	<i>Fabricante x</i>	<i>AG-Perdas5000</i>	<i>AG-Perdas10000</i>
Peso do Cobre nos enrolamentos de alta e baixa tensão	113,7	113,70	116,29
Peso do material Ferro magnético	303,90	317,05	316,43
Massa total	417,60	433,34	432,72

Os resultados mostram um bom desempenho da técnica de otimização tanto para o objetivo de minimizar o peso do material atendendo as normas, quanto para o objetivo de otimizar os parâmetros de eficiência. Entretanto, os objetivos mostraram-se conflitantes com a redução do peso as perdas elevaram-se. Do ponto de vista de mercado o projeto mais competitivo seria do primeiro objetivo de otimização visto que reduz os custos com material atendendo as normas vigentes.

Com relação ao número de gerações do AG os resultados para 10 000 gerações mostraram-se melhores ou estáveis para todos os casos, comprovando o demonstrado na seção 3.1.1, resultados coerentes com esperado do método.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Conforme as características de otimização e busca paralela em grandes espaços de soluções, o Algoritmo Genético, reduziu o tempo de busca para o problema de otimização do dimensionamento da parte ativa de um transformador trifásico. Este algoritmo demonstrou viabilidade técnica para aplicação devido à sua eficácia de convergência, minimizando a quantidade de material necessário na fabricação do transformador, atendendo as normas de eficiência.

Foram detalhadas as etapas de definição do critério de parada e função de avaliação conforme os objetivos de otimização. No que lhe concerne, a minimização da massa total do transformador mostrou-se ser um objetivo de otimização conflitante em relação à minimização das perdas totais.

Pesquisas futuras poderão ser direcionadas a melhorias no vetor indivíduo, buscando melhores desempenhos para uma otimização multi-objetivos, validação dos resultados através de simulações das propriedades eletromagnéticas em *softwares* que faz uso de elementos finitos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, N. 5440—transformadores para redes aéreas de distribuição—requisitos, associação brasileira de normas técnicas. **Rio de Janeiro: ABNT, 2014.**
- ADLY, A. A.; ABD-EL-HAFIZ, S. K. A performance-oriented power transformer design methodology using multi-objective evolutionary optimization. **Journal of advanced research**, Elsevier, v. 6, n. 3, p. 417–423, 2015.
- AGUIAR, F. J. P. Influência da não-conformidade senoidal da tensão de alimentação nas perdas de magnetização em transformadores de potência. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ-UFC, 2005.**
- ALVES, A. C.; STEINER, M. T. A.; MUSSI, N. H.; ZANELATTO, G. Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento da distribuição de energia elétrica em Curitiba e região metropolitana. **UFPR. Tese de mestrado defendida em novembro, 2002.**
- AMOIRALIS, E. I.; GEORGILAKIS, P. S.; TSILI, M. A.; KLADAS, A. G. *et al.* Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation. **IEEE transactions on magnetics**, v. 45, n. 3, p. 1720, 2009.
- AMORIM, E. d. A. Fluxo de potência ótimo em sistemas multimercados através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.
- CGC. **CGC Transformadores**. 2019. Disponível em: <<http://www.cgctransformadores.com.br/empresa>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- COELHO, L. D. S.; Mariani, V. C.; Guerra, F. A.; da Luz, M. V. F.; Leite, J. V. Multiobjective optimization of transformer design using a chaotic evolutionary approach. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 50, n. 2, p. 669–672, Feb 2014. ISSN 0018-9464.
- COLL, I.; ROSAS, S.; PORTILLO, F. Distrana: Diseño de transformadores de núcleo arrollado. UR. FI-IEE, 2015.
- COMTRAFO. **COMTRAFO TRANSFORMADORES**. 2019. Disponível em: <<https://www.comtrafo.com.br/a-comtrafo>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- ENETRAFO. **ENETRAFO TRANSFORMADORES**. 2019. Disponível em: <<http://enertrafo.com.br/>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- FALCONE, A. G. **Eletromecânica transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas...** [S.l.]: E. Blucher, 1979.
- GEORGILAKIS, P. Recursive genetic algorithm-finite element method technique for the solution of transformer manufacturing cost minimisation problem. **IET electric power applications**, IET, v. 3, n. 6, p. 514–519, 2009.
- HAAS, G. C.; XOOL, D. A. P.; CACH, R. B. C.; HIDALGO, R. Transformadores. **Universidad Autonoma de Campeche**, 2011.
- INMETRO. Adequação aos requisitos de avaliação da conformidade para transformadores de distribuição em líquido isolante. **Portaria nº 488**, 2014.

- INMETRO. **Tabela de consumo/eficiência energética Transformadores de distribuição em líquido isolante**. 2019. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/transformadores_liq_isolante.asp>. Acesso em: 2019.
- ISOTRAFO. **Isotrafo**. 2019. Disponível em: <<http://www.isotrafo.com.br/sobre.php>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- ITAIPU. **ITAIPU Transformadores**. 2019. Disponível em: <<https://www.itaiputransformadores.com.br/sobre>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- ITAM. **Indústria de Transformadores Amazonas Ltda, ITAM**. 2019. Disponível em: <<http://www.itam.com.br/>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- ITB. **Transformadores de distribuição trifásicos**. 2019. Disponível em: <<https://itb.ind.br/produtos/transformadores-de-distribuicao/transformadores-de-distribuicao-trifasicos/>>.
- ITR. **ITR**. 2019. Disponível em: <<http://itr.ind.br/index.php/a-empresa.html>>. Acesso em: 6 nov 2019.
- KHATRI, A.; MALIK, H.; MEMBER, O. R. Optimal design of power transformer using genetic algorithm. In: IEEE. **2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies**. [S.l.], 2012. p. 830–833.
- KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. [S.l.]: Globo, 1985.
- LEÃO, R. Gtd–geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. **Universidade Federal do Ceará**, 2009.
- LINDEN, R. **Algoritmos genéticos (2a edição)**. [S.l.]: Brasport, 2008.
- LOPES, H. S. Algoritmos genéticos em projetos de engenharia: aplicações e perspectivas futuras. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, p. 64–74, 1999.
- MALAGOLI, J. A.; LOBATO, F. S.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. Projeto de transformador monofásico utilizando o algoritmo de evolução diferencial. **Blucher Mathematical Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 280–290, 2014.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores. 8ª**. [S.l.]: Edição, Editora Globo, São Paulo-SP, Brasil, 1991.
- MOURA, L. L. **Teoria e Prática no Projeto do Transformador de Distribuição**. [S.l.]: UNIFOR. Trabalho de conclusão de curso, Fortaleza, 2009.
- PINHEIRO, F. A.; MOREIRA, A. N.; CARDOSO, E. N.; VASCONCELOS, J. Algoritmo genético aplicado ao controle de tensão em sistemas elétricos de potência. In: **Anais do 3o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. [S.l.: s.n.], 1997.
- POLTOSI, L. A. C.; LEMKE, N. Aplicação de algoritmos genéticos no projeto de transformadores. **Revista Liberato, Novo Hamburgo**, v. 10, n. 14, p. 167–174, 2009.
- RIGHI, C. S. *et al.* Dimensionamento de transformadores monofásicos de baixa potência utilizando método analítico e algoritmo genético. Florianópolis, SC, 2018.
- ROMAGNOLE. **Romagnole Produtos Elétricos S.A.** 2019. Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/sobre>>. Acesso em: 6 nov 2019.

SIGMA. **Sigma transformadores**. 2019. Disponível em: <<http://sigmatransformadores.com.br/a-sigma/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

SILVA, M. **Projeto & Desenvolvimento de um padrão para Alta Tensão em Corrente Contínua na Faixa de 1 kV a 50 kV**. 2011. 84 f. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)-Curso de Pós-Graduação em Metrologia Pontifica . . . , 2011.

SOBRINHO, A. M. *et al.* Uma contribuição aos projetos de transformadores via algoritmos naturais e elementos finitos. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

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**. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia) — Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2012.

Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>>. Acesso em: 14 de outubro de 2019.

TOSHIBA. **TOSHIBA**. 2019. Disponível em: <<http://www.toshiba.com.br/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

TRAEI. **TRAEI**. 2019. Disponível em: <<http://www.trael.com.br/nossa-historia/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

TRP. **Rio Preto Transformadores**. 2019. Disponível em: <<https://trptransformadores.com.br/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

UNILUZ. **UNILUZ**. 2019. Disponível em: <<http://www.uniluz.com.br/site/a-empresa/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

WEG. **WEG**. 2019. Disponível em: <<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>>. Acesso em: 6 nov 2019.

ZAGO. **ZAGO**. 2019. Disponível em: <<http://transformadoreszago.com.br/empresa/>>. Acesso em: 6 nov 2019.