



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

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

KLEYMILSON DO NASCIMENTO SOUZA

FORTALEZA
2012

Kleymilson do Nascimento Souza

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

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

Co-orientador: Prof. Dr. Arthur Plínio de Souza Braga.

Área de concentração: Eletrônica de Potência e Acionamento de Máquinas.

**FORTALEZA
2012**

KLEYMILSON DO NASCIMENTO SOUZA

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

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Eletrônica de Potência e Acionamento de Máquinas e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará.

Kleymilson do Nascimento Souza

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes

Prof. Dr. Arthur Plínio de Souza Braga

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro. Barbosa. de Aquino

Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida

Fortaleza, Março de 2012

“No desafio de inovar, e descobrir que sempre
se pode melhorar produtos e ideias.”
(Kleymilson Souza)

A Deus,
Aos meus pais, Edmilson e Neuma,
A minha esposa, Maria de Jesus,
A todos os familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus orientadores, Dr. Ricardo Thé e Dr. Arthur Plínio, pela confiança, estímulo e paciência a mim dedicados.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica: Fernando Antunes, José Carlos, Otacílio Mota, Laurinda Reis e Bismark Torrico, pelos ensinamentos a mim ministrados em seus cursos, que, de forma valiosa, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Arlindo, André Auto e Rousor pelo apoio durante a minha graduação, muito obrigado pela confiança, pelos ensinamentos e pelas oportunidades que tive com a ajuda de vocês.

Aos meus familiares, Edmilson Teixeira Souza e Maria Neuma do Nascimento Souza, Kleyson do N. Souza e Keyla do N. Souza, por tudo, meu muito obrigado;

À minha nova família Gomes, em especial Maria de Jesus Gomes de Sousa.

Aos companheiros e amigos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC e a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À Construções Eletromecânicas S. A.(CEMEC) pelo espaço na empresa e apoio no cálculo de transformadores, em especial: Bernardo, Ney, Wilson, Edmar, André Gadelha e Carlos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que contribuiu com o apoio financeiro necessário à realização deste trabalho.

SOUZA, K. N. **Metodologia de Projeto para Redução de Perdas e Custos da Parte Ativa do Transformador de Distribuição Trifásico Utilizando Algoritmos Genéticos**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2012.

RESUMO

O presente trabalho faz um estudo de uma metodologia que busca ser mais econômica e eficiente, em comparação com métodos tradicionais, no projeto de transformadores de distribuição trifásico. Para tal, utiliza-se uma ferramenta de Inteligência Computacional, tendo como base cálculos anteriores feitos de forma tradicional por indústrias fabricantes e livros que tratam desse assunto. Evidencia-se, aqui, mais uma maneira de projetar a parte ativa do transformador, ou seja, o dimensionamento do núcleo e bobinas; para isso, utiliza-se Algoritmos Genéticos (GA), que irão auxiliar no cálculo e escolha dos parâmetros, proporcionando a melhor escolha do projeto do transformador, minimizando, em média, o custo em 5 % e as perdas em 2,5 %, conforme parâmetros de entrada seguindo a norma. Com modificações na função de *fitness* do GA, pode-se adequar de maneira simples a novas exigências e normas. Como consequência da utilização do Algoritmo Genético pode-se encontrar uma solução de projeto que é mais eficiente do que a utilizada pelos fabricantes. As perdas calculadas atendem valores estabelecidos pela norma NBR-5440.

Palavras-chave: Inteligência Computacional, Algoritmos Genéticos, Transformador Trifásico, Otimização.

SOUZA, K. N. **Metodologia de Projeto para Redução de Perdas e Custos da Parte Ativa do Transformador de Distribuição Trifásico Utilizando Algoritmos Genéticos**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2012.

ABSTRACT

The present work is a study of a methodology that seeks to be more economical and efficient compared to traditional methods, the design of three phase distribution transformers. To this end, we use a tool of Computational Intelligence, based on previous calculations made in the traditional way by manufacturing industries and books that address this matter. It is evident here, another way to design the active part of the transformer, ie the dimension of the core and coil, for this, used Genetic Algorithms (GA) which will assist in the calculation and selection of parameters, providing the best choice of design of the transformer, minimizing, on average, 5% in the cost and losses in 2.5% as input parameters the following standard. With changes in the *fitness* function of GA, one can simply adapt to new requirements and standards. As a result of using the genetic algorithm can find a design solution that is more efficient than that used by the manufacturers. The losses calculated values meet established by NBR-5440.

Keywords: Inteligência Computacional, Algoritmos Genéticos, Transformador Trifásico, Otimização.

Sumário

RESUMO	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XII
SIMBOLOGIA.....	XIII
ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS	XIV
SÍMBOLOS DE UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS	XIV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1. MOTIVAÇÃO.....	16
1.2. OBJETIVOS	17
1.3. METODOLOGIA	17
1.4. PUBLICAÇÃO GERADA.....	18
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 - PROJETO DE TRANSFORMADORES	20
2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO TRANSFORMADOR - CARACTERÍSTICAS GERAIS	21
2.1.1 - Princípio de Funcionamento	21
2.1.2 - Características Nominais.....	25
2.1.3 - Características Construtivas	25
2.1.4 - Características Elétricas	30
2.2 PARTE ATIVA DO TRANSFORMADOR	37
2.3 ESPECIFICAÇÕES PARA PROJETO	38
2.4 ESTADO DA ARTE.....	39
2.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	41
CAPÍTULO 3 - CÁLCULO DA PARTE ATIVA	42
3.1 NORMA DE PROJETO	42
3.2 AMBIENTE DE PROJETO CONVENCIONAL (APROC) IMPLEMENTADO	44
3.2.1 Determinação dos parâmetros de projeto	46
3.2.2 Cálculos Iniciais.....	47
3.2.3 Cálculos do Núcleo.....	48
3.2.4 Cálculos do Enrolamento de Alta Tensão	51
3.2.5 Cálculos do Enrolamento de Baixa Tensão	53
3.2.6 Cálculos das Perdas no Enrolamento	54
3.2.7 Cálculos Finais	55
3.3 AVALIAÇÃO DO AMBIENTE DE PROJETO CONVENCIONAL (APROC).....	55
3.4 ESTIMANDO CUSTO DO PROJETO.....	60
3.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	60
CAPÍTULO 4 - ALGORITMOS GENÉTICOS.....	62
4.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS	62
4.2 MÚLTIPLOS OBJETIVOS EM GA.....	66
4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	66
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA PROJETO DE TRANSFORMADOR	68
5.1 AJUSTE AUTOMÁTICO DE PARÂMETROS NO AMBIENTE DE PROJETO CONVENCIONAL.....	69
5.2 ALGORITMO GENÉTICO IMPLEMENTADO	70
5.3 EXEMPLO DE RESULTADOS OBTIDOS	72
5.3.1 Minimização dos Custos com Restrições Imposta pela Norma.....	73
5.3.2 Minimização dos Custos com Restrições de Perdas mais severas que a Norma	77
5.3.3 Minimização dos Custos com Restrições de Perdas e de Custo Máximo	82
5.4 COMENTÁRIOS FINAIS.....	83

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	85
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS	87
ANEXO I - EXEMPLO DE PROJETO DA FABRICANTE CEMEC.....	92
ANEXO II - ARTIGO SOBRE ESTIMAÇÃO DAS PERDAS DO TRANSFORMADOR.....	95
ANEXO III - TABELA DE FIOS MAGNÉTICOS - AWG.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de disposição das bobinas.	22
Figura 2.2 – Circuito magnético do transformador.....	22
Figura 2.3 – Diagrama vetorial da corrente de magnetização.....	23
Figura 2.4 – Representação das panquecas no transformador.....	26
Figura 2.5 – Características dimensionais de transformadores trifásicos.....	27
Figura 2.6– Aplicação de campo magnético em lâmina de aço.....	32
Figura 2.7 – Curva de magnetização.	33
Figura 2.8 – Curvas “Rendimento x Carga”.....	35
Figura 2.9 – Terminal secundário em curto-circuito.....	36
Figura 2.10 – Dimensões da parte ativa do transformador de distribuição	38
Figura 2.11 – Distribuição de trabalho relacionados a projeto de transformadores.....	40
Figura 3.1– Software para cálculo de transformdor trifásico com estimativa de custo.	44
Figura 3.2 – Sequência para realizar o cálculo do transformador trifásico.	45
Figura 3.3 – Características iniciais para realizar o projeto de um transformador.....	46
Figura 3.4 – Determinação das correntes, tensão e fio utilizado.	47
Figura 3.5 – Cáculo das variáveis do núcleo.	49
Figura 3.6 – Cáculos da bobina de Alta Tensão.....	51
Figura 3.7 – Composição radial da bobina de alta tensão.	52
Figura 3.8 – Cálculo da Bobina de Baixa Tensão.	53
Figura 3.9 – previsão das perdas nos enrolamentos.	54
Figura 3.10 – Previsão do V_{cc} e do I_0	55
Figura 4.1 – Estrutura básica do Algoritmo Genético	64
Figura 4.2 – Representação de um cromossomo com genes binários.....	64
Figura 4.3 – Roleta com a probabilidade de um cromossomo com genes binários.....	65
Figura 4.4 – Cruzamento de dois indivíduos no GA.....	65
Figura 4.5 – Processo de mutação aplicado em um gene do cromossomo	66
Figura 5.1 – Codificação dea cada indivíduo/projeto utilizado no GA implementado.....	69
Figura 5.2 – Pseudocódigo GA implementado.	72
Figura 5.3 – Evolução da avaliação da função de <i>fitness</i>	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Característica dimensional de transformadores trifásico.	27
Tabela 2.2 – Perdas específicas das chapas de ferro silício da Armco	28
Tabela 2.3 – Classificação das bobinas por classe.....	29
Tabela 2.4 – Densidade de Corrente	29
Tabela 2.5 – Coeficiente que depende do material de que é construída a chapa do núcleo	32
Tabela 2.6 – Rendimento típico para transformadores trifásicos (%).....	34
Tabela 3.1– Valores garantidos de perdas, tensão de curto-circuito e corrente de excitação para transformadores trifásico com tensão máxima de 15 kV	43
Tabela 3.2 – Densidade de corrente prática.	43
Tabela 3.3 – Dados do transformador trifásico de 15 kVA.....	56
Tabela 3.4 – Dados do transformador trifásico de 45 kVA.....	57
Tabela 3.5 – Transformador Trifásico com tensão de saída 220V (Modelo APROC).....	58
Tabela 3.6 – Transformador Trifásico com tensão de saída 380V (Modelo APROC).....	59
Tabela 3.7 – Percentagem do custo de fabricação da parte ativa do transformador.	60
Tabela 4.1 – Terminologia usada em Algoritmos Genéticos.....	63
Tabela 5.1 – Transformador Trifásico com tensão de saída 220V (Modelo GA).....	74
Tabela 5.2 – Transformador Trifásico com tensão de saída 380V (Modelo GA).....	75
Tabela 5.3 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio (220V) - Limite de perdas - NBR	76
Tabela 5.4 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio (380V) - Limite de perdas - NBR.....	76
Tabela 5.5 – Transformador Trifásico com tensão de saída 220V (Modelo GA2).....	78
Tabela 5.6 – Transformador Trifásico com tensão de saída 380V (Modelo GA2).....	79
Tabela 5.7 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio dos GAs (220V).	80
Tabela 5.8 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio dos GAs (380V).	80
Tabela 5.9 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio (220V) - (Perda limite 5% menor).....	81
Tabela 5.10 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio (380V) - (Perda limite 5% menor).....	81
Tabela 5.11 – Resumo Comparativo dos Resultados dos Ensaio dos GA.	83

SIMBOLOGIA

Simbologia	Significado
<i>B1</i>	<i>Bobina Primária</i>
<i>B2</i>	<i>Bobina Secundária</i>
<i>V1</i>	<i>Tensão do Primário</i>
<i>V2</i>	<i>Tensão do Secundário</i>
<i>I1</i>	<i>Corrente na Bobina primária</i>
<i>I2</i>	<i>Corrente na Bobina Secundária</i>
<i>kVA</i>	<i>Potencia do Transformador</i>
<i>AT</i>	<i>Alta Tensão</i>
<i>BT</i>	<i>Baixa Tensão</i>
<i>f</i>	<i>Frequência</i>
<i>K</i>	<i>Constante dependente do tipo de Refrigeração</i>
<i>NDeg</i>	<i>Numero de Degraus</i>
<i>Ke</i>	<i>Fator de empilhamento</i>
<i>B</i>	<i>Indução Magnética</i>
<i>d_AT</i>	<i>Densidade de Corrente na Bobina de Alta Tensão</i>
<i>d_BT</i>	<i>Densidade de Corrente na Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>NC_BT</i>	<i>Número de camadas da bobina de Baixa Tensão</i>
<i>NC_AT</i>	<i>Número de camadas da bobina de Alta Tensão</i>
<i>CM</i>	<i>Composição Montada</i>
<i>EF</i>	<i>Entre Ferro</i>
<i>SN_cm</i>	<i>Secção do Núcleo em centímetros</i>
<i>DN_mm</i>	<i>Diâmetro do Núcleo em milímetro</i>
<i>VpE</i>	<i>Volts por espiras</i>
<i>FioR</i>	<i>Fio Retangular</i>
<i>NFio</i>	<i>Numero de Fios</i>
<i>A_FioR</i>	<i>Área do Fio Retangular</i>
<i>SF_BT</i>	<i>Secção do Fio de Baixa Tensão</i>
<i>SF_AT</i>	<i>Secção do Fio de Alta Tensão</i>
<i>NE_BT</i>	<i>Número de Espiras da Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>NE_AT</i>	<i>Número de Espiras da Bobina de Alta Tensão</i>
<i>N° AWG</i>	<i>Numero do Fio AWG</i>
<i>DiBT</i>	<i>Diâmetro interno da Bobina de Baixa Tensão</i>

<i>DeBT</i>	<i>Diâmetro externo da Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>DiAT</i>	<i>Diâmetro interno da Bobina de Alta Tensão</i>
<i>DeAT</i>	<i>Diâmetro externo da Bobina de Alta Tensão</i>
<i>Peso_BT</i>	<i>Peso da Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>Peso_AT</i>	<i>Peso da Bobina de Alta Tensão</i>
<i>Peso_Fe</i>	<i>Peso do Núcleo de Ferro</i>
<i>Wcu</i>	<i>Perda no Cobre</i>
<i>Wfe</i>	<i>Perda no ferro ou Perdas no Núcleo</i>
<i>WT</i>	<i>Perda Total no Transformador</i>
<i>VL_BT</i>	<i>Tensão de Linha na Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>IL_BT</i>	<i>Corrente de Linha na Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>IF_BT</i>	<i>Corrente de Fase na Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>VF_BT</i>	<i>Tensão de Fase na Bobina de Baixa Tensão</i>
<i>IL_AT</i>	<i>Corrente de Linha na Bobina de Alta Tensão</i>
<i>IF_AT</i>	<i>Corrente de Fase na Bobina de Alta Tensão</i>
<i>Vcc</i>	<i>Tensão de curto-circuito</i>
<i>Io</i>	<i>Corrente de excitação</i>

ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

Simbologia	Significado
<i>GA</i>	<i>Algoritmo Genético</i>
<i>RNA</i>	<i>Redes Neurais Artificiais</i>
<i>APROC</i>	<i>Ambiente de projeto Convencional</i>
<i>CAPES</i>	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
<i>UFC</i>	<i>Universidade Federal do Ceará</i>
<i>NBR</i>	<i>Norma Técnica Brasileira</i>
<i>PSO</i>	<i>Otimização por Colônia de Partículas</i>

SÍMBOLOS DE UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS

Símbolo	Significado
®	Marca Registrada
Ω	Ohm
A	Ampère
Hz	Hertz
kg	Quilograma
V	Volt
W	Watt
mm	Milímetro
cm	Centímetro

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico do mundo inteiro depende de transformadores para viabilizar a transmissão e a distribuição de Energia Elétrica ao elevar e baixar os níveis de tensões nas linhas de transmissão e distribuição. Existem transformadores para várias finalidades, este trabalho trata especificamente dos transformadores de distribuição, que são os utilizados para conectar as tensões de fornecimento das subestações em tensões de consumo domiciliar e industrial.

Cada transformador, seja no projeto ou por questões práticas de fabricação, apresenta, por fator, perdas no núcleo e nos enrolamentos, que acabam sendo repassadas como custos para o consumidor. No caso deste trabalho, busca-se reduzir as perdas ao melhorar o dimensionamento da parte ativa (núcleo e bobinas) do transformador. A perda de rendimento apresentada em um transformador bem dimensionado e bem fabricado é baixa (TARGOSZ e TOPALIS, 2009). Somando-se os milhares de transformadores de distribuição que servem a uma cidade, percebe-se que mesmo uma pequena redução nas perdas desses transformadores pode se refletir em significativa redução nos custos do Sistema Elétrico e, por consequência, para o consumidor. É nesse sentido que o desenvolvimento desta dissertação busca apresentar uma estratégia de projeto de transformador com as perdas reguladas por normas e que tenha um projeto otimizado da parte ativa que reduza suas perdas.

Estudos recentes têm envolvido ferramentas computacionais para o melhor dimensionamento das partes ativas do transformador (GEORGILAKIS, 2009a), (GEROMEL, 2003), (POLTOSI e LEMKE, 2009). Este trabalho emprega técnicas de otimização na busca por uma melhor solução do projeto com menor custo e maior eficiência.

As Normas Brasileiras (NBR) estabelecem limites para as perdas em diversas situações que o transformador possa se encontrar. Assim o projeto deve atender no mínimo à norma NBR 5440, 1999.

O trabalho desenvolvido tem aplicação industrial, pois é um projeto de caráter construtivo e pode ser aplicado em empresas interessadas, que busquem desafios de inovar os produtos e a maneira como transformadores de distribuição são projetados. Ao final, tem-se uma ferramenta que pode ser atualizada pelo projetista para acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos

materiais e processos de fabricação, ensaio e as exigências de norma. Ao utilizar Algoritmos Genéticos, a metodologia de projeto proposta permite que, quanto mais variáveis forem consideradas para otimização, e quanto maiores forem as possibilidades de transformadores gerados, o algoritmo sempre busca alcançar o melhor projeto entre todas as possibilidades (LINDEN, 2008).

Há diversas técnicas de desenvolvimento do projeto de transformadores, cada empresa fabricante segue suas próprias equações para os cálculos necessários, obedecendo aos limites estabelecidos por norma, os quais têm a possibilidade de obter várias soluções não garantindo que é o melhor projeto.

O uso de uma ferramenta computacional como Algoritmo Genético, que é inspirada na teoria da evolução de Darwin (LINDEN, 2008), não deixará de usar as equações do fabricante para encontrar a solução do melhor transformador, porém realizará uma busca heurística mais eficiente que facilitará encontrar o resultado ótimo.

1.1. Motivação

Observa-se, ainda hoje, que fabricantes de transformadores no Brasil produzem estes equipamentos utilizando processos de formas semelhantes as do início da década de 80. Os projetos continuam sendo baseados em: (i) equações empíricas (AGUIAR, 2005), (MARTIGNONI, 1991), (MCLYMAN, 2004) e (ii) projetos anteriormente fabricados e ensaiados. Tal estratégia de projeto tem desvantagens, pois limita-se a algumas soluções das muitas possibilidades de fazer um projeto. Diversos trabalhos vêm sugerindo estratégias mais eficientes de projeto de transformadores que empregam técnicas de modelagem e otimização para contornar essas limitações. Dentre essas técnicas estão as de Inteligência Computacional, como Redes Neurais Artificiais (AMOIRALIS e GEORGILAKIS, 2006), (HATZIARGYRIOU et al., 1998), (DOULAMIS et al., 2002), (GEORGILAKIS, 2009b) e Algoritmos Genéticos (GEORGILAKIS, 2009b), (POLTOSI e LEMKE., 2009).

O presente trabalho utiliza uma ferramenta de otimização, baseada em Algoritmo Genético (GA), para aperfeiçoar o processo do projeto e a tomada de decisão (GEORGILAKIS et al., 2001). Dessa forma a escolha da matéria-prima e o dimensionamento mais adequado e econômico da parte ativa de transformador de distribuição podem ser considerados para a redução dos custos de fabricação.

1.2. Objetivos

O estudo objetiva propor estratégias de projeto que considerem as principais características construtivas dos transformadores de distribuição. Com este trabalho, pretende-se contribuir para automatizar a forma como o projeto é desenvolvido e buscar o melhor modelo e dimensionamento do transformador, oferecendo menor custo de fabricação (parte ativa) e economia da matéria-prima.

Os transformadores de distribuição, foco deste trabalho, são classificados de acordo com as potências de operação, ou seja, são selecionados por classes (NBR 5440, 1999). Portanto, as soluções de projeto obtidas com a metodologia proposta neste trabalho devem satisfazer as especificações da norma para suas respectivas classes.

Um Ambiente de Projeto Convencional (APROC) foi desenvolvido para incorporar uma ferramenta de otimização baseada em Algoritmos Genéticos que, a partir de especificações iniciais, dimensiona as partes ativas (Núcleo e Enrolamentos) do transformador. Os projetos otimizados devem ser mais eficientes, ou no mínimo equivalentes, aos projetos convencionais.

1.3. Metodologia

A princípio o estudo se dedicará ao dimensionamento do projeto do transformador da maneira convencional (MARTIGNONI, 1991); posteriormente será implementado o algoritmo (Ambiente de Projeto Convencional - APROC) para estimar as perdas no núcleo e outras variáveis de dimensionamento, importantes para a construção do projeto (AMOIRALIS, 2008). Assim, antes do processo de fabricação do transformador, através do Ambiente de Projeto Convencional, será possível estabelecer uma estimativa mais precisa das perdas no núcleo. Com estas estimativas, alterações nas características construtivas, como dimensões do núcleo, densidade de corrente nas bobinas, indução magnética pretendida e número de degraus utilizados no núcleo, podem ser adotadas em busca da otimização do projeto.

As modificações das características construtivas são inicialmente feitas manualmente, sempre buscando minimizar o custo de fabricação e maximizar o rendimento, atendendo à norma específica (NBR 5440, 1999), (GEORGILAKIS, 2007a). Em uma segunda etapa, com base nesse projeto convencional, as características construtivas serão ajustadas de forma automática usando Inteligência Computacional. Esse processo é otimizado pelo Algoritmo Genético, que apresentará

a melhor solução (GEORGILAKIS, 2009b). Essa melhor solução será considerada simulando ensaios de perda e custos para diferentes características. Tudo antes do transformador sair da tela do projetista.

1.4. Publicação Gerada

Parte dos resultados obtidos nesta pesquisa gerou o seguinte artigo disponível no **Anexo II**:

- SOUZA, K.N, Castro, T.N, Pereira, T.M, Thé, R.S, Braga, A.P.S “*Prediction of Core Losses on a Three-Phase Transformer using Neural Networks*”. ***Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)***, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Maio de 2011.

1.5. Estrutura da Dissertação

Os demais Capítulos desta dissertação estão organizados conforme descreve-se a seguir:

- **CAPÍTULO 02:** trata da descrição do funcionamento das partes ativas do transformador, que são otimizadas no projeto, e dos procedimentos convencionais para o projeto de um transformador.
- **CAPÍTULO 03:** apresenta como é desenvolvido o projeto de maneira convencional e explica a formatação do algoritmo utilizando o MATLAB® (Ambiente de Projeto Convencional - APROC). Apresenta-se um comparativo entre os valores do projeto real, realizado pela empresa, com o uso do software próprio, que calcula os parâmetros do transformador e os valores obtidos com o Ambiente de Projeto Convencional (APROC), desenvolvido nesse trabalho. Assim, o software é validado em casos reais de projeto.
- **CAPÍTULO 04:** apresenta os princípios da teoria de Algoritmo Genético (GA), focando-se na maneira como é utilizado e aplicado no projeto de transformadores. O algoritmo de busca é descrito de forma mais completa.
- **CAPÍTULO 05:** apresenta a metodologia de projeto proposta de forma detalhada, comentam-se as semelhanças e as novidades da proposta em relação a trabalhos existentes e apresenta um comparativo entre os valores reais ensaiados com os valores

obtidos com uso do Algoritmo Genético. No final, realiza-se uma análise simplificada do custo final da parte ativa no projeto de transformador.

- **CAPÍTULO 06:** apresenta as conclusões. Resumem-se os principais resultados obtidos e discutem-se como estes satisfazem os objetivos apontados para o trabalho dentro de um contexto de redução das perdas do transformador projetado e de diminuição nos custos de fabricação (matéria-prima). As propostas de possíveis desenvolvimentos dessa pesquisa (trabalhos futuros) também são discutidas.

Por fim, algumas características complementares ao procedimento do projeto são disponibilizadas no **Anexo I**.

CAPÍTULO 2

PROJETO DE TRANSFORMADORES

Transformador é um dispositivo estático de um ou mais enrolamento(s) acoplado(s). Pode possuir ou não núcleo magnético para induzir o acoplamento mútuo entre os circuitos. Os transformadores são utilizados em sistemas elétricos para transferência de energia por indução eletromagnética, geralmente com valores alterados de tensão e corrente, mas com mesma frequência (FITZGERALD, 2006).

Um bom projeto de transformadores visa melhorar o desempenho no processo construtivo considerando as normas e as especificações de projeto para melhor desempenho. As principais atenções, além de atender o cliente e as normas, são com as perdas e com o custo final do produto. O rendimento do transformador depende de como ele está operando, se a vazio ou em sobrecarga. No decorrer do capítulo se discutirá a relação entre essas variáveis.

O fabricante busca um projeto no qual o produto não fique com custo alto, que satisfaça o limite das especificações reguladas por normas. As concessionária de energia estão interessadas no rendimento e vida útil do equipamento, assim, passando também a ser uma preocupação do fabricante.

O grande desafio hoje é fabricar transformadores com maior rendimento e que seu custo não fique elevado (custo x benefício). Segundo estudos da Confederação Nacional das Indústrias (CNI), as empresas brasileiras têm condições técnicas para produzir transformadores 30% mais eficientes que os disponíveis no mercado (ABENDI, 2010).

Hoje vários pesquisadores do mundo têm buscado formas para que o equipamento tenha melhor rendimento (GEORGILAKIS, 2007b). Ao se melhorar esse rendimento, contribui-se para diminuir o consumo de energia perdida no Sistema Elétrico, melhorando o potencial energético do país. Ações vêm sendo tomadas para incentivar esta forma de melhorar o Sistema Elétrico, pode ser citado como exemplo a criação de mecanismos regulatórios como a etiquetagem, ou declaração na placa, das perdas do transformador. Incentivos obrigatórios de economia de energia fomentarão o desenvolvimento de melhores projetos de transformadores (TARGOSZ, 2009). A perspectiva de uso de selo no país para classificar os transformadores mais eficientes, podendo o cliente ter um parâmetro na hora de adquirir o equipamento, alerta os fabricantes no Brasil para a

necessidade de investir na melhoria das metodologias de projeto e fabricação visando transformadores economicamente competitivos que apresentem perdas menores.

Os transformadores instalados nas redes brasileiras de distribuição elétrica terão uma etiqueta que indicará o grau de consumo de energia do aparelho. Resultado de uma iniciativa da indústria do setor, a etiqueta é parte de um amplo trabalho que visa à regulamentação do equipamento pela Lei 10.295/2001, que prevê padrões mínimos de eficiência energética para aparelhos elétricos usados no Brasil. A medida deve reduzir o desperdício de recursos e os custos da energia para os consumidores, e inovações na maneira de projetar os transformadores. Semelhante ao que é aplicado em geladeiras, condicionadores de ar residenciais e outros equipamentos elétricos, o selo mostrará ao mercado as empresas que investem na preservação do meio ambiente, na qualidade e na eficiência energética dos transformadores (JORNAL O GLOBO, 2011).

Os transformadores de distribuição são máquinas de alto rendimento com eficiência em torno de 99%. No entanto, quando instalados em redes elétricas, sob vários níveis de tensão de distribuição, o total das perdas nesta rede é relativamente alto. Um estudo feito pelo Instituto Leonardo Energy (TARGOSZ, 2005) mostra que um terço das perdas em sistemas de distribuição e transmissão ocorre em transformadores, e dois terços no resto do sistema.

Este capítulo fará uma descrição dos fundamentos em transformador e abordará as partes relevantes ao estudo de dimensionamento do mesmo.

2.1 Princípios Básicos do transformador - Características Gerais

Equipamentos elétricos como os transformadores seguem os princípios do eletromagnetismo. Estudos e definições básicas são fundamentais no entendimento do funcionamento destes equipamentos.

2.1.1 - Princípio de Funcionamento

O transformador é composto por dois enrolamentos, a bobina primária (B1) e a bobina secundária (B2), sendo que as bobinas podem ser sobreposta ou não. Na Figura 2.1 abaixo, há demonstrações dos dois tipos (KOSOW, 2005), (FLANAGAN, 1992).

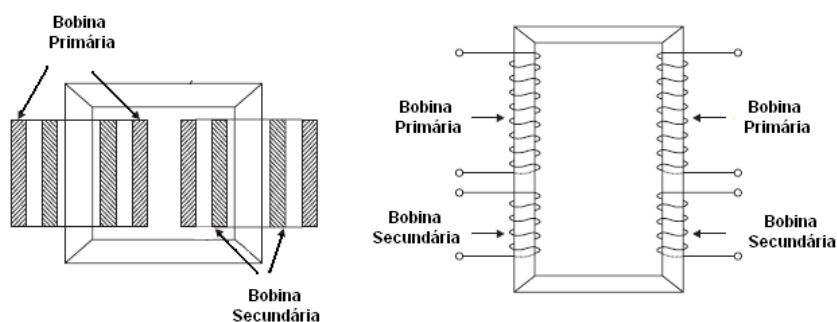


Figura 2.1 – Modelo de disposição das bobinas

O enrolamento primário é que recebe a energia vinda da rede e, por acoplamento magnético, gera tensão no enrolamento secundário, conforme Figura 2.2. Se o valor da tensão no secundário for maior que a do primário tem-se um transformador elevador. Caso a tensão no secundário seja menor tem-se o transformador abaixador. O transformador abaixador é o mais comum nas redes de distribuição.

Existem diversas formas de construir o transformador; dependendo da aplicação, têm-se características de projetos diferenciados. Algumas destas características são a operação a vazio e a potência absorvida pelo transformador.

Na operação a vazio o transformador encontra-se energizado e nenhuma carga ligada à bobina (B2). Desta forma na bobina (B1) existe uma tensão no primário (V_1) e circula uma corrente no primário (I_1), denominada como corrente a vazio.

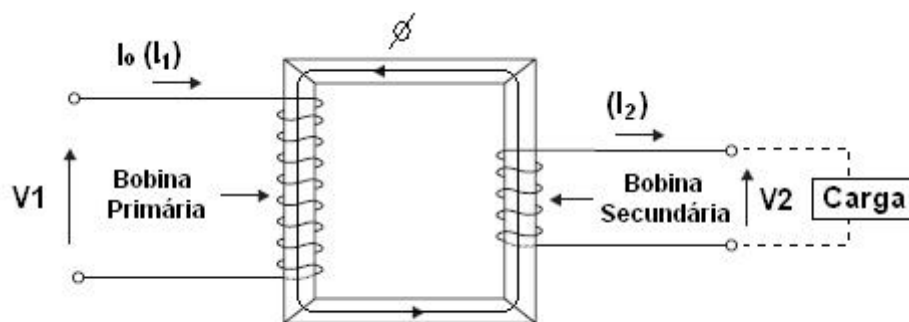


Figura 2.2 – Circuito magnético do transformador

A corrente a vazio I_0 é composta pela corrente de magnetização do núcleo (I_M), Equação (2.1), e pela corrente que o núcleo absorve para suprir as perdas internas (I_P), Equação (2.2) (LÓPEZ, 1998).

$$I_M = I_0 \times \cos \psi \quad (2.1)$$

$$I_P = I_0 \times \sin \psi \quad (2.2)$$

Tem-se então a representação na Figura 2.3 abaixo:

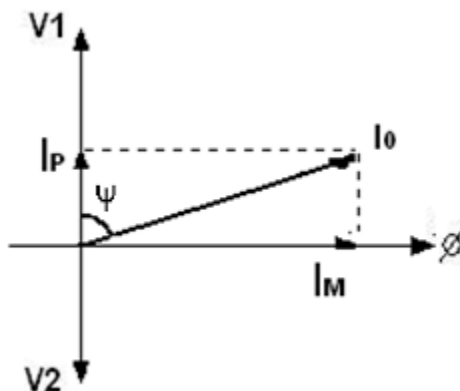


Figura 2.3 – Diagrama vetorial da corrente de magnetização

A intensidade de campo magnético (H) com o transformador operando a vazio é dada pela equação discriminada abaixo, Equação (2.3), e a intensidade de campo magnético é em ampère x espira/metro (KOSOW, 2005).

$$H = (I_0 \times N_1)/L_M \quad (2.3)$$

Sendo:

I_0 é a corrente de excitação.

L_M é o comprimento total da bobina primária.

N_1 é a quantidade de espiras na bobina primária.

Assim, a potência absorvida da rede pelo transformador é dada pela Equação (2.4):

$$P_1 = V_1 \times I_0 \quad (2.4)$$

Sendo:

P_1 é a potência absorvida da rede.

V_1 é a tensão na bobina B1

Quando o transformador está ligado em vazio, um fluxo magnético (Φ_m) percorre o núcleo. Considerando-se as resistências *ôhmicas* dos enrolamentos e as dispersões magnéticas, tendo-se então a Equação (2.5):

$$\Phi_m = (10^8 \times V_1) / (4.44 \times f \times N_1) \quad (2.5)$$

Sendo:

f = Frequência da rede em (Hz)

Φ_m = Fluxo Magnético em weber (Wb)

N_1 = Número de espira do enrolamento primário.

Outra definição necessária é a de densidade de fluxo magnético, ou seja, o fluxo magnético é o número de linhas de força magnética que entram e saem da superfície magnetizada. Já a densidade de fluxo magnético relaciona o número de linhas de força entrando e saindo de uma superfície magnetizada pela área transversal perpendicular às linhas de fluxo, conforme Equação (2.6) (OLIVEIRA, 1984). Os transformadores apresentam em geral densidade de fluxo aplicável, sem saturação, variando entre 1,0 e 1,8 Tesla (MAMEDE, 2005).

$$B_m = (10^8 \times V_1) / (4.44 \times S \times f \times N_1) \quad (2.6)$$

Sendo:

S é a secção transversal do núcleo.

B_m é a Densidade do fluxo magnético.

OBS: O valor de B_m pode ser expresso pela unidade Tesla (T), onde $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$.

Diante das informações acima se pode deduzir informações importantes a respeito do transformador (MAMEDE, 2005):

- A redução da secção transversal do núcleo resulta em aumento da densidade de fluxo magnético e, em consequência, em aumento das perdas no ferro, acarretando maior corrente de excitação, I_0 .

- A redução proporcional do número de espiras N_1 e N_2 correspondem a um aumento da corrente em operação em vazio, e das perdas por histerese e por corrente de Foucault.

- A elevação da tensão aplicada aos terminais primário do transformador resulta em um aumento da corrente em operação em vazio, em perdas no ferro mais elevadas e em maior número de correntes harmônicas.
- Transformador com perdas no ferro e corrente em operação em vazio de pequeno valor possuem menores correntes harmônicas, porém apresentam custos bem mais elevados;
- Se o transformador for submetido a uma frequência de alimentação superior a nominal, a densidade de fluxo magnético é reduzida na proporção inversa da frequência correspondente, diminuindo as perdas no ferro.
- Os transformadores destinados a um ciclo de carga de tempo reduzido, como em geral acontece com os transformadores rurais, podem apresentar perdas maiores no cobre, porém, devem possuir baixas perdas no ferro.
- Os transformadores destinados a um ciclo de carga de tempo elevado devem apresentar baixas perdas no cobre e no ferro.

2.1.2 - Características Nominais

Todo transformador tem limites fixados por normas, para que se tenha controle sobre os níveis de energia e perdas limites que o transformador deve ter, garantindo qualidade e segurança. Essas características são especificadas conforme NBR 5440 de 1999.

Essa normalização se resume em correto dimensionamento dos enrolamentos, tensões nominais dos enrolamentos, corrente nominal dos enrolamentos, frequência nominal e nível de isolamento dos enrolamentos.

Ao longo das próximas subseções apresentam-se diversas definições necessárias para o desenvolvimento do projeto.

2.1.3 - Características Construtivas

O projeto do transformador depende como um todo de decisões tomadas pelo projetista, características construtivas como o enrolamento é projetado, tipo de secagem do núcleo do transformador, características dimensionais, tipo de ligação das bobinas, tipo de isolante, tipo de núcleo, líquido isolante, e local de instalação do transformador. São muitas as variáveis que podem influenciar no projeto final do transformador (GEROMEL, 2003).

A proposta do trabalho é fazer um projeto que aperfeiçoe o processo. Antes de descrever a metodologia desenvolvida (Capítulo 5), serão descritas algumas características importantes no desenvolvimento do trabalho.

A fabricação do transformador exige dezenas de etapas, sendo o corte da chapa do núcleo a inicial e, paralelo ao corte da chapa, tem-se a fabricação dos enrolamentos, tanto do primário quanto do secundário, a diferença é que na B1 geralmente a seção do fio é retangular de cobre e coberto por papel isolante. O enrolamento pode ser classificado como tipo camada, tipo panqueca conforme Figura 2.4.

2.1.3.1 – Bobina tipo camada

O fio de cobre é enrolado de forma circular e continuamente podendo ter várias camadas. É o caso mais comum para o transformador de distribuição e será o estudado ao longo do trabalho. Esse transformador praticamente não tem manutenção e geralmente faz-se a substituição quando se encontra com defeito (MARTIGNONI, 1991).

2.1.3.2 – Bobina tipo panqueca

Suas bobinas são formadas por pedaços de bobinas (panquecas) nas quais, no final, são ligadas em série. Do ponto de vista da manutenção, a substituição de alguma panqueca evita trocar toda a bobina primária onde geralmente são utilizadas as panquecas (FLANAGAN, 1992).

Na Figura 2.4, abaixo, podem-se observar as panquecas primárias no transformador.

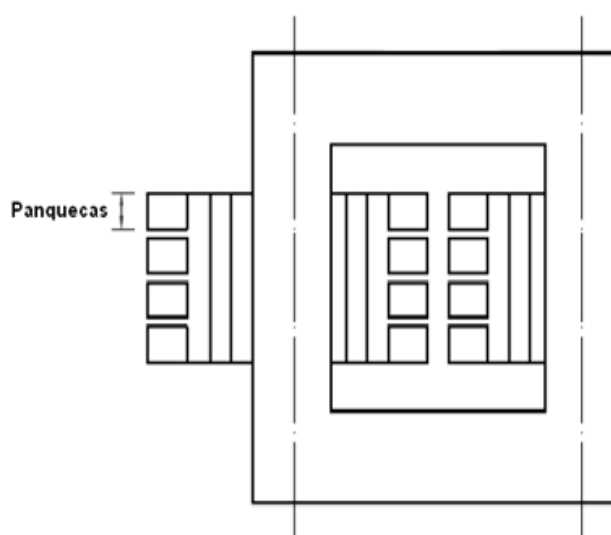


Figura 2.4 – Representação das panquecas no transformador

2.1.3.3 - Dimensão do transformador

São várias as dimensões do transformador trifásico, depende da potência em kVA. Tomando como exemplo a indústria fabricante de transformador CEMEC, possui as características de dimensões conforme tabela (2.1) e Figura 2.5, com classe de 15kV (CEMEC, 2011).

Tabela 2.1 - Características dimensionais de transformadores trifásicos.

kVA	Dimensões (mm)					Corrente de excitação (%)	Perdas em vazio (W)	Perdas Totais (W)	Tensão de curto-circuito 75° C(%)	Volume óleo (L)	Massa Total (kg)
	A	C	L	B	D						
15	770	740	575	200	120	4,8	100	440	3,5	45	155
30	810	760	575			4,1	170	740		50	207
45	845	795	585			3,7	220	1000		60	270
75	955	1055	655			3,1	330	1470		73	365
112,5	955	1150	730	400	150	2,8	440	1990	4,5	89	475
150	985	1280	835			2,6	540	2450		95	550
225	1045	1610	990			2,3	765	3465		135	790
300	1110	1600	1000			2,2	950	4310		190	980

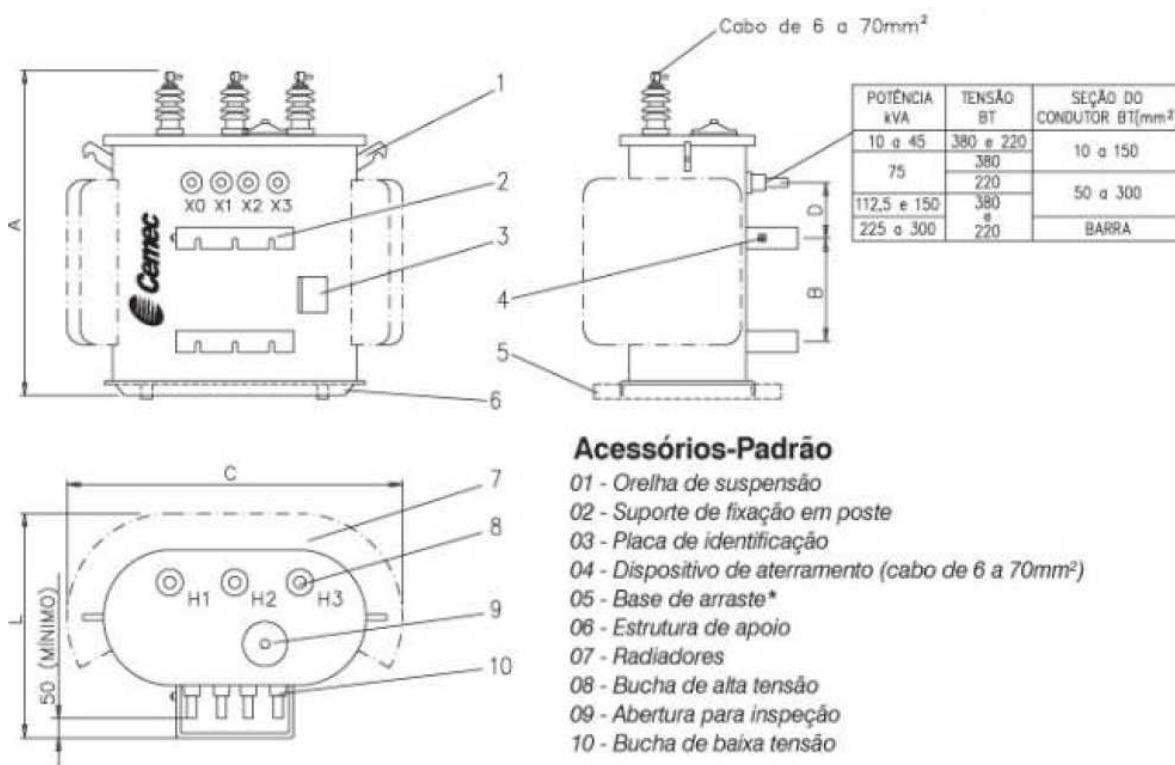


Figura 2.5 - Características dimensionais de transformadores trifásicos.

2.1.3.4 - Núcleo de aço

O núcleo é formado por lâminas de aço-silício, montada em pilha para passagem do fluxo magnético e fixação das bobinas (B1 e B2).

Existem vários fabricantes de chapa de aço, mas as espessuras das lâminas são padronizadas e a norma internacional para nomenclatura das chapas mais utilizada é a da Armco, fabricante de lâminas de aço. Classificada por números, a chapa nomeada com menor número tem a corrente de excitação e menor perda por histerese (ACESITA, 2005).

As chapas são laminadas a frio, seguidas de um tratamento térmico responsável por fazer com que os grãos magnéticos fiquem alinhados no sentido da laminação. As lâminas são fabricadas para atender os limites máximos de perdas eletromagnéticas, que variam de 1,28 W/kg e uma densidade de fluxo de 1,5 T (tesla) a 1,83 W/kg, que corresponde a uma densidade de fluxo de 1,7 T. As chapas devem apresentar uma massa específica de 7,65 kg/dm³ e uma resistência a tração de cerca de 3,4 kg/mm² (ACESITA, 2011).

Na tabela (2.2) abaixo, apresenta-se a perda específica das chapas de ferro-silício da Armco, usadas na fabricação de transformadores, relativas a uma indução magnética de 1.5 Tesla que corresponde a 15000 linhas/cm², ou 1,50 T (ARCELOR, 2011), (BATISTELA, 2002).

Tabela 2.2 – Perdas específicas das chapas de ferro silício da Armco

Tipo	Indução magnética B = 1.5 Tesla			
	50 Hz		60 Hz	
	Espessura			
	0,304	0,356	0,304	0,356
M5	0,97	-	1,28	-
M6	1,07	1,11	1,41	1,46
M7	1,19	1,22	1,57	1,61
M8	-	1,36	-	1,76

2.1.3.5 - Enrolamento

Os enrolamentos dos transformadores são bobinas feitas com fio de cobre, isolados com esmalte ou por fitas de algodão ou papel especial. Geralmente composta de bobina primária e bobina secundária

As bobinas podem ser classificadas de acordo com a classe descrita na tabela (2.3), que é selecionada por limites de temperatura que a bobina e o isolante suportam sem se danificar (MARTIGNONI, 1991).

Tabela 2.3 – Classificação das bobinas por classe

Classe	Limite de Temperatura (°C)
A	105
B	120
C	130
D	155
E	180

A utilização de isolante de algodão implica um acréscimo da espessura da secção do condutor que chega a 0,5 mm para todos os condutores de até 25mm² e a 1mm para condutores de secção de 95 mm² aproximadamente. Já no isolamento em esmalte, o acréscimo é cerca de 0,15 mm. Os enrolamentos primários podem ser construídos em panquecas, ou bobina única. O enrolamento em panquecas consiste na construção da bobina dividida em segmentos com gradientes de tensão. Têm-se casos em que é necessário que a bobina primária seja dividida em quatro panquecas. Por exemplo, se um transformador de classe de 15kV possuir quatro panquecas resulta em um gradiente de tensão de 3.450V, pois $13.800/4 = 3450V$. Essa divisão em panquecas facilita a manutenção como citado anteriormente. O trabalho apresentado usa bobinas únicas em seus projetos.

A secção dos condutores das bobinas primária e secundária é função da densidade de corrente. Transformadores de potência elevada requerem uma densidade de corrente inferior a dos transformadores de menor potência. Isso se deve ao fato de que quanto maior for o volume do transformador maiores são as dificuldades de refrigeração, necessitando-se, pois, reduzir as perdas por efeito Joule, o que é conseguido diminuindo a densidade de corrente. Na prática, as densidades de corrente utilizadas (MARTIGNONI, 1991) são dadas conforme a tabela (2.4).

Tabela 2.4 – Densidade de corrente

Potência	Densidade de corrente
kVA	A/mm ²
10 - 15	3,2
30 - 45	2,9
75 – 112,5	2,8
150 - 500	2,6
1000 - 2500	2

Assim, conhecidos os valores de corrente, a seção dos enrolamentos pode ser calculada pela Equação (2.7) (HARLOW, 2004).

$$S = I / D \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.7)$$

Sendo:

S = secção do condutor do enrolamento em mm²

I = Corrente nominal do Condutor em A

D = Densidade de corrente em A/mm²

2.1.4 - Características Elétricas

As normas são as principais referências quanto às limitações elétricas que podem ser aplicadas, visando segurança e economia do equipamento. Nesse tópico são definidos alguns pontos importantes no projeto do transformador.

2.1.4.1 - Potência Nominal

O valor que é garantido pelo fabricante que garante a corrente nominal e a tensão nominal seguindo as normas (NBR 5440, 1999). Para servir de base para realizar o projeto e ensaio do equipamento.

2.1.4.2 - Tensão Nominal

Consiste no valor de tensão que é atribuído no enrolamento que é o valor o qual foi projetado e especificado segundo norma (NBR 5440, 1999).

2.1.4.3 - Corrente Nominal

É a corrente que circula no terminal de linha do enrolamento. E para o transformador trifásico é calculada dividindo o valor da potência nominal do enrolamento pela sua tensão nominal e pelo fator $\sqrt{3}$ conforme Equação (2.8).

$$I_N = P_N / (\sqrt{3} \times V_N) \quad (2.8)$$

Sendo:

P_N = Potencia Nominal do Transformador em kVA.

V_N = Tensão Nominal do Transformador, em kV.

2.1.4.4 - Frequência Nominal

Ao projetar um transformador a frequência é um parâmetro importante, pois, de acordo com o seu valor, o projeto pode ter características diferentes. Frequência nominal é a frequência a qual o transformador foi projetado para operar (OLIVEIRA, 1984).

2.1.4.5 - Perdas

Toda energia absorvida pelo transformador, ou seja, toda energia que não é transformada em energia útil é considerado perda. As perdas relevantes são as perdas a vazio e perdas em carga.

A perda em vazio consiste em perdas no núcleo de ferro, onde pode ser decomposta em duas perdas: por correntes parasitas de foucault e perdas por histerese magnética.(GEORGILAKIS, 1998)

Essas perdas estão relacionadas com o tipo de material, espessura das chapas, frequência da rede, da máxima indução nas lâminas. Atualmente os estudos sobre materiais vêm contribuindo com o desenvolvimento de novas ligas de ferro-silício implicando em novas formas de elaborar o projeto de transformador (OLIVEIRA, 1984), (KEFALAS, 2008).

2.1.4.6 - Perdas em Vazio

Quando o transformador estiver ligado à rede e não possuir nenhum equipamento ligado em seu circuito secundário, pode-se medir o consumo de energia. Esse consumo de energia é considerado perda do transformador, conhecida como perda a vazio. A eficiência do transformador é regulada por norma.

A *perda por correntes parasitas ou de Foucault* é causada pela variação do fluxo magnético, ela faz gerar uma força eletromotriz resultando em correntes elétricas no interior do

núcleo de ferro. Essa corrente gera calor e aquece o núcleo do transformador, consequentemente, causando perdas de energia.

Com o intuito de diminuir as perdas utilizam-se lâminas de ferro-silício de pequenas espessuras e uma fina camada de isolamento como descrita na tabela (2.2).

Existe Equação que calcula as correntes de Foucault (2.9). Estas não são tão precisas, mas levam em consideração todos os parâmetros que influenciam as perdas (OLIVEIRA, 1984).

$$P = 2 \times 10^{-11} \times B^2 \times f^2 \times E^2 \times K \text{ (W/kg)} \quad (2.9)$$

Sendo:

B = Máxima indução magnéticas nas lâminas (Tesla)

f = Frequência da Rede em Hz

K = Coeficiente que depende do material de que é construída a chapa, conforme tabela (2.5).

E = espessura da chapa (mm).

Tabela 2.5 – Coeficiente que depende do material de que é construída a chapa do núcleo

MATERIAL	K _s
Ferro doce	2,50
Aço doce	2,70
Aço doce para máquinas	10,00
Aço Fundido	15,00
Fundição	17,00
Aço doce 2% de silício	1,50
Aço doce 3% de silício	1,25
Aço doce 4% de silício	1,00
Laminação doce	3,10
Laminação delgada	3,80
Laminação ordinária	4,20

2.1.4.7 - A perda por histerese

Materiais ferromagnéticos possuem uma estrutura atômica semelhante a pequenos ímãs que quando submetido a um campo magnético, tendem a se alinhar, gerando assim um campo maior que o produzido pelo campo externo conforme Figura 2.6 (MAMEDE, 2005).

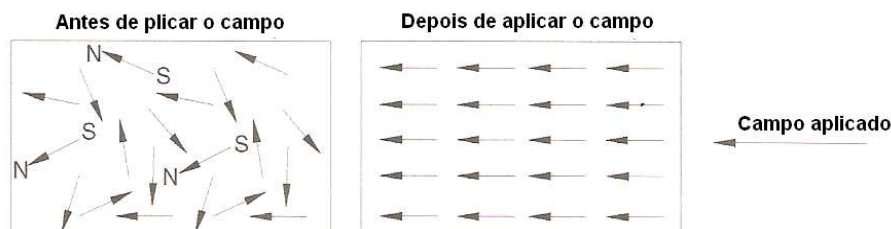


Figura 2.6 – Aplicação de campo magnético em lâmina de aço.

Uma forma de representar esse fenômeno é mostrada na Figura 2.7, os valores da intensidade do campo magnético H e da densidade de fluxo magnético correspondente B .

A intensidade de campo magnético H é a força magnetomotriz que se desenvolve por unidade de comprimento do fio da bobina que a produz, o que corresponde, também, aos ampères-espiras gerados por unidade de comprimento da bobina.

O ciclo que representa as perdas por histerese está na Figura 2.7. À medida que se aumenta a corrente na bobina, produz-se uma intensidade de campo magnético H maior, iniciando-se do ponto O e finalizando no ponto A (curva de magnetização inicial). Ao ser removido o campo magnético, os materiais ferromagnéticos retêm parte do magnetismo, chamado magnetismo residual, o que corresponde ao ponto B da Figura 2.7.

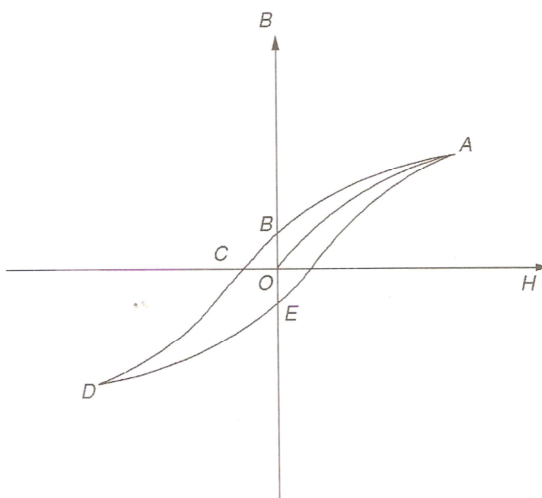


Figura 2.7 – Curva de magnetização.

Quando se inverte o sentido do campo magnético, pode-se anular o fluxo magnético, o que é obtido no ponto C. Aumentando-se a intensidade do campo magnético no sentido inverso, o material irá magnetizar-se novamente, no sentido contrário, até saturar-se no ponto D. Retirando o campo magnético, o material retém parte do magnetismo, o que corresponde ao ponto E. Aumentando-se agora o referido campo magnético, pode-se saturar novamente o material ferromagnético, até o ponto A, completando-se um ciclo de histerese.

O núcleo do transformador é submetido a um campo alternado. Como é necessário que o circuito elétrico primário do transformador forneça energia ao campo magnético, que é devolvido em forma de calor, a essa energia dá-se o nome de perdas por histerese (MAMEDE, 2005), (SILVA, 2007).

2.1.4.8 - Perdas em Carga

Se aplicado uma carga na bobina secundária do transformador o mesmo muda das características de perdas, ou seja, as perdas que o transformador pode gerar depende da carga a qual ele está submetido.

2.1.4.9 - Rendimento

Os transformadores geralmente possuem rendimento elevado em relação à potência nominal. Suas perdas são, principalmente, perdas por dissipação de calor por efeito joule nos enrolamentos (W_E) e perda magnética (W_N).

Na tabela (2.6), abaixo, são encontrados alguns valores de rendimento para o transformador em regime nominal e temperatura de 75°C GEROMEL (2003).

Tabela 2.6 - Rendimento típico para transformadores trifásicos (%) GEROMEL (2003).

Transformadores Trifásicos									
Classe (kV)	Potência (kVA)								
	15	30	45	75	112,5	150	225	300	500
15	96,52	97,07	97,35	97,66	97,88	98,04	98,15	98,27	98,48
24,2	96,08	96,74	96,06	97,40	97,65	97,81	98,01	98,15	98,36
36,2	96,08	96,74	96,06	97,40	97,65	97,81	98,01	98,15	98,36

Os transformadores de uma forma em geral em regime de funcionamento oscilam entre operação em vazio, com carga nominal e até em sobrecarga.

As perdas nos enrolamentos variam com o valor da carga que o transformador é submetido e as perdas magnéticas no núcleo praticamente independem de carga aplicada ao transformador. Como os transformadores estão permanentemente energizados, devem-se considerar as perdas magnéticas. Dependendo da aplicação pode ser conveniente que o rendimento máximo ocorra em outro ponto da curva (rendimento x carga), onde $W(\text{vazio})/W(\text{carga})$ é a relação das perdas no transformador operando em vazio e em plena carga. A Figura 2.8 mostra um gráfico com três exemplo de curvas (rendimento x carga) (GEROMEL, 2003)

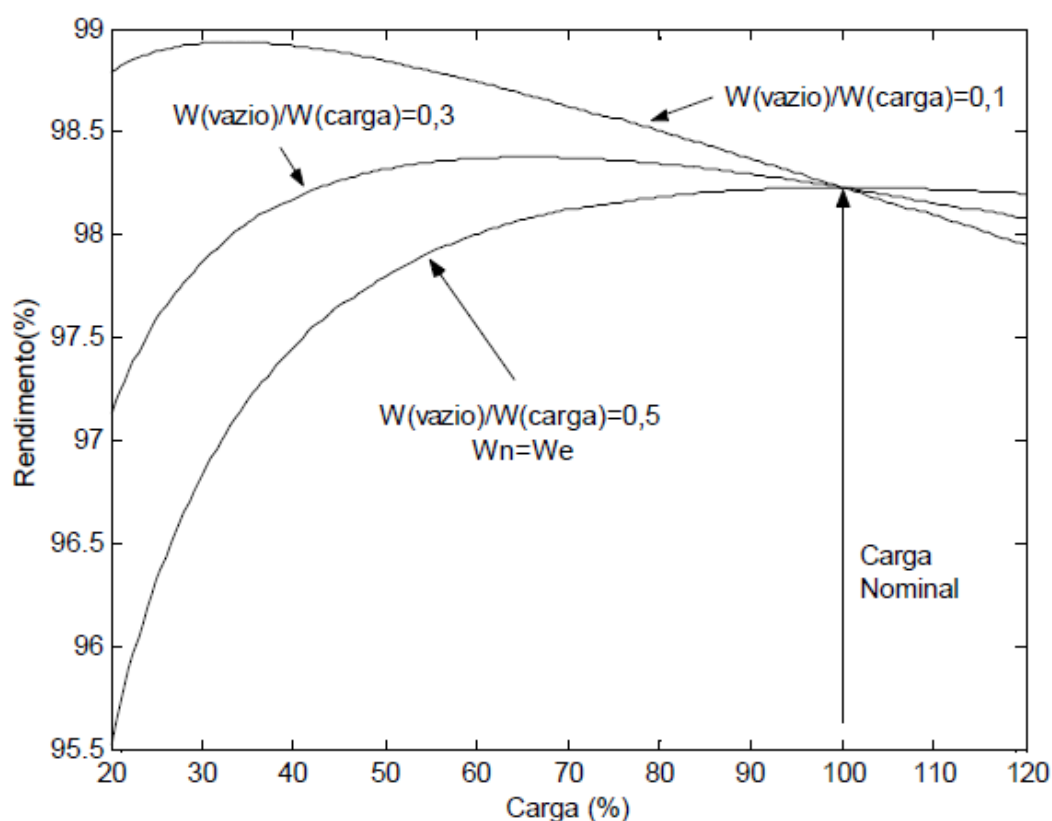


Figura 2.8 – Curvas “Rendimento x Carga”

2.1.4.10 - Impedância Percentual

Também conhecida como tensão nominal de curto-circuito, a impedância percentual representa numericamente a impedância do transformador em percentagens da tensão de ensaio de curto-circuito, em relação à tensão nominal.

É medida provocando-se um curto-circuito nos terminais secundário e aplicando-se uma tensão nos terminais primários que faça circular nesses enrolamentos a corrente nominal. A Equação (2.10) expressa a definição:

$$Z (\%) = (V_{ncc}/V_n) \times 100 (\%) \quad (2.10)$$

Sendo:

$Z (\%)$ = impedância percentual, ou tensão nominal de curto-circuito, em % da tensão nominal do transformador.

V_{ncc} = Tensão de curto-circuito, aplicada no primário do transformador.

V_n = Tensão nominal primária do transformador.

Por exemplo, um transformador trifásico de 300 kVA – 13800V tem uma impedância percentual de 4,5%, quer dizer que, provocando-se um curto circuito nos terminais secundário e aplicando nos terminais primário uma tensão de 621 V, fazendo circular nos enrolamentos primários e secundários as respectivas correntes nominais que são de 12,5 A e 455,8 A. Assim 4,5 é a Equação (2.11) percentagem da tensão primária da tensão primária de curto circuito (MAMEDE, 2005).

Ou seja:

$$Z (\%) = (621/13800) \times 100 = 4,5\% \quad (2.11)$$

A Figura 2.9 esclarece a descrição acima.

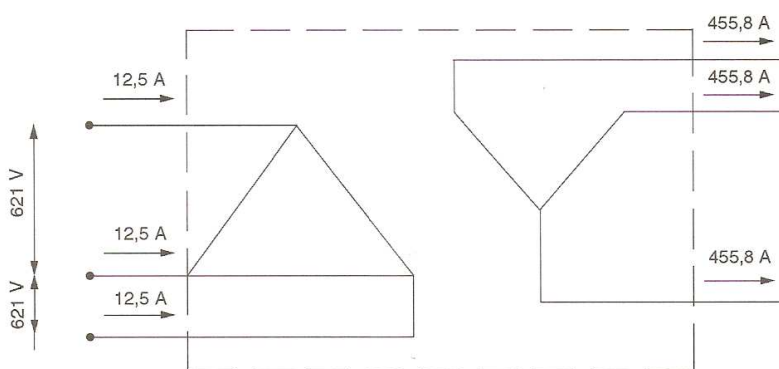


Figura 2.9 – Terminais secundário em curto-circuito

2.1.4.11 - Corrente de Excitação

É a corrente que percorre os terminais de linha de um transformador, quando em operação, sob condição de tensão e frequência nominais, mantendo os terminais secundários em aberto.

A corrente de excitação também é conhecida como corrente a vazio. A corrente de excitação dos transformadores trifásicos é diferente para cada uma das fases. No caso de transformadores com ligação primária em estrela, as correntes de excitação das fases externas são maiores do que as da fase central. Isso é decorrente da dissimetria dos circuitos magnéticos nas três colunas do transformador. Para núcleos de chapas de cristais orientados, com laminação a frio, seu valor pode chegar a cerca de 8% da corrente nominal primária.

Como as correntes de excitação são diferentes em cada fase, deve-se expressá-las como a média das correntes medidas nas três fases do transformador.

A corrente em vazio eleva-se quando o transformador é alimentado com uma tensão superior à sua nominal, provocando o aumento das perdas no ferro, saindo da especificação da norma.

2.2 Parte Ativa do Transformador

Os transformadores de modo geral são divididos em partes. Inicialmente tem-se a parte elétrica e a parte mecânica. O projeto elétrico está destinado a fazer todos os cálculos como limites de tensão, corrente, dimensionamento do transformador, além da previsão de perdas e limites fornecidos por normas (NBR 5440, 1999). A parte mecânica destina-se principalmente ao cálculo estrutural e termodinâmico.

Para este trabalho o projeto da parte ativa do transformador é o foco de estudo. A parte ativa resume-se ao núcleo e as bobinas do transformador. Está sendo considerada a parte mais importante do projeto, pois concentra 83% dos custos totais a serem gastos na fabricação. Como detalhado na tabela (3.7).

Para o correto dimensionamento do núcleo e das bobinas faz-se necessário o cálculo dimensional destas partes e da previsão de valores estabelecidos por normas. A previsão, por exemplo, de perdas no núcleo, perdas nos enrolamentos, tensão de curto-circuito e corrente de excitação, são alguns pontos importantes que influenciarão nas dimensões do núcleo e das bobinas (parte ativa).

Têm-se várias maneiras e fórmulas para o dimensionamento da parte ativa. Cada empresa produtora tem limitações de fabricação, pois depende das tecnologias disponíveis e nível de automação da indústria, o que, às vezes, faz com que as equações reais sejam ajustadas para suprir

essas limitações. Para realizar o estudo de implementação do Algoritmo Genético (GA) e comparar os resultados foi necessário compreender e fazer um algoritmo que projete de maneira mais próxima o padrão utilizado por empresas do ramo de projeto de transformadores. Tomou-se como base a maneira como é projetado o transformador da empresa Construções Eletromecânicas S.A.(CEMEC). Os valores encontrados pelo software padrão (Ambiente de Projeto Convencional - APROC) são aproximados, pois toda empresa tem ajustes que irão depender do processo de fabricação. O APROC desenvolvido pelo autor da dissertação será discutido posteriormente no Capítulo 4.

Com o APROC pode-se calcular as dimensões da Parte Ativa do transformador conforme Figura 2.10.

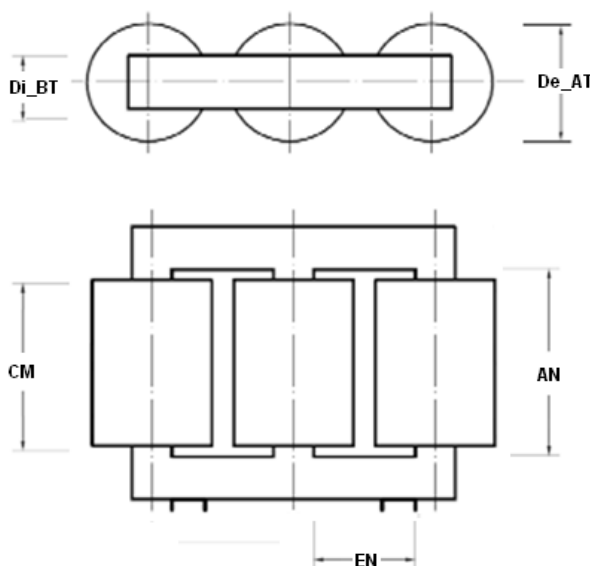


Figura 2.10 - Dimensões da parte ativa do transformador de distribuição

2.3 Especificações para Projeto

A discriminação dos parâmetros iniciais do projeto será definida por normas e pela necessidade do cliente

Ao formular o pedido de um transformador são necessários no mínimo os seguintes dados do cliente: Tensão Primária, Tensão Secundária, Derivações desejadas (tapes), Potência Nominal, Número de fases, Tensão suportável de impulso, Impedância percentual, Acessórios desejados.

Essas exigências formadas pelo cliente mais as limitações definidas por normas, formam as condições para que o projeto seja dimensionado. O que resta ao projetista é otimizar os elementos que os limita. Sendo a escolha dos valores apropriados para a densidade máxima de fluxo

magnético no núcleo, a densidade de corrente nos condutores e a transferência de calor os fatores vitais para que o transformador alie bom desempenho, vida útil elevada e custo baixo (KEFALAS, 2006), (SARAIVA, 2008).

No projeto do transformador desta dissertação detalha-se no capítulo 3 os parâmetros que podem ser alterados para aperfeiçoar as dimensões dos projetos.

2.4 Estado da Arte

Devido ao desenvolvimento da tecnologia, métodos de fabricação de transformadores estão em constante mudança (MARTIN, 1978), (SARAIVA, 2008), (KULKARNI, 2004), (TSILI, 2004). Muitas empresas fabricante de transformadores não dão a devida atenção à mudança e melhoramento de seus produtos, processo de fabricação e métodos de elaborar os projetos. Assim, não acompanham as novas tecnologias e materiais desenvolvidos. Essas tecnologias implicam em novas formas de elaborar os projetos (SOUZA, 2011).

A crescente demanda por transformadores, as novas exigências que estão surgindo para reduzir as perdas elétricas destes equipamentos e a crescente concorrência entre os fabricantes, aleta para o fato de que os métodos de projetar devem sofrer mudanças e incorporar novas ferramentas que permitam lidar com este cenário. Para se ter uma ideia do crescente número de transformadores fabricados e renovados a cada ano no Brasil, atualmente, existem cerca de 2,5 milhões de transformadores instalados nas redes de distribuição de energia do país. As indústrias do setor colocam aproximadamente 130 mil novos aparelhos ao ano no mercado. Os transformadores novos, que duram entre 15 a 20 anos, são usados na reposição de antigos ou na expansão das redes de distribuição (TARGOSZ et al., 2005). Ou seja, a cada renovação, esses transformadores já estão ultrapassados necessitando de novos melhoramentos no rendimento.

Ganhando rendimento aos poucos, fabricante de outros países vem melhorando gradualmente o tipo de aço magnético, a tecnologia de corte com diminuição da espessura das chapas laminadas, e formas de elaborar os projetos. Essas diferentes abordagens levaram a uma redução de suas perdas nos novos transformadores em um fator maior que dois durante os últimos 40 anos (TARGOSZ, 2009).

Foca-se neste trabalho a melhoria através de mudanças na forma de projetar. Diversas formas de projetar os transformadores vêm sendo propostas por vários trabalhos, nos últimos 35 anos publicados em livros, artigos, revistas e normas. Todos os projetos direcionam-se a minimizar o custo e melhorar a eficiência do transformador, bem como diminuir o trabalho do projetista ao buscar o transformador ótimo. Um levantamento destes trabalhos publicados foi feito

por Eleftherios (ELEFTHERIOS, MARINA e ANTONIOS, 2009), relacionando mais de 420 artigos publicados na área, 50 livros sobre transformadores e 65 normas. Conforme a pesquisa mostra graficamente na Figura 2.11, verifica-se um enorme interesse nesta área de pesquisa.



Figura 2.11.- Distribuição de trabalho relacionado a projetos de transformadores nos últimos anos conforme (ELEFTHERIOS, MARINA e ANTONIOS, 2009).

Outros trabalhos que tratam do assunto “Projeto de Transformadores” podem ser encontrados em: (SARAIVA, 2008), (GEORGILAKIS, 2009b), (POLTOSI, 2009), (KULKARNI, 2004), (MARTIGNONI, 2001), (FLANAGAN, 1991).

Entre as tecnologias que vêm mudando o setor de projeto moderno de transformadores estão diversas ferramentas de Inteligência Computacional como RNAs (Redes Neurais Artificiais), GAs (Algoritmos Genéticos) e PSO (Otimização por enxame de partículas) (GEORGILAKIS, 2009b).

Esses trabalhos basicamente visam: Previsão e otimização de características do transformador, Técnicas para a otimização do projeto global do transformador, tendo em conta todos os parâmetros de desempenho relevantes, (GEORGILAKIS, 2009b), (POLTOSI, 2009), (SOUZA, 2011).

A complexidade no projeto de transformador exige rigorosos métodos de solução. Um levantamento da pesquisa atual revela o interesse contínuo na aplicação de técnicas avançadas para aperfeiçoar o projeto do transformador. Utilizando novos algoritmos de otimização, e um melhor tratamento dos níveis de incerteza introduzida. A complexidade na metodologia dos projetos vem da necessidade de que os projetistas assegurem que as especificações impostas sejam atendidas, mantendo baixos custos de fabricação.

Neste trabalho utilizam-se Algoritmos Genéticos como método para o cálculo ótimo da parte ativa, buscando baixo custo em baixas perdas, atendendo as normas impostas. A aplicação de Algoritmo Genético é uma alternativa promissora, pois busca a solução dentro de um espaço de soluções onde são muitas as possibilidades. Este tipo de pesquisa pode ser vista em estudos de Doulamis (DOULAMIS, 2002), Poltosi (POLTOSI, 2009), Georgilakis (GEORGILAKIS, 2009b) (GEORGILAKIS, 2001).

2.5 Conclusões do capítulo

O Projeto de um transformado requer conhecimento prévio de várias definições simples, que são de grande importância para a devida compreensão do seu funcionamento.

As normas relacionadas ao projeto do transformador vêm limitar alguns valores que forçam a padronização mínima dos equipamentos.

O uso de equações empíricas é comum ao projetar o transformador, nem sempre por não ter uma Equação mais próxima a ideal, mas sim por limitações do processo de fabricação.

Nas últimas décadas, muitas empresas têm projetado e fabricado transformadores utilizando os métodos convencionais. Os cálculos dos transformadores, em algumas empresas, ainda são feitos com planilhas e gráficos ajustados ao seu processo de fabricação o que gera erros agregados a esta forma de projetar. Com isso, há a necessidade de constantes ajustes de valores e previsão de dados ao dimensionar o transformador. Ao elaborar um projeto de transformador são inúmeras as possíveis soluções, e o projetista não garante um transformador otimizado.

Cada empresa tem suas próprias equações empíricas para ajustar suas tabelas ao projeto do transformador como forma de obter o menor erro. No Capítulo 3 descreve-se a maneira convencional para projetar a parte ativa de um transformador de distribuição.

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DA PARTE ATIVA

Existem diversas técnicas de desenvolvimento do projeto de transformadores, cada fabricante segue sua própria forma de calcular, seguindo os limites estabelecidos por normas.

Este capítulo descreve um algoritmo que foi desenvolvido com uso do MATLAB® que calcula o transformador trifásico de distribuição segundo de acordo fabricante consultado.

Os projetos de transformadores de qualquer empresa que produz transformador têm fórmulas empíricas ricas em detalhes para se adequar ao processo de fabricação. A princípio aparentemente de fácil estudo, mas que levam em conta as tecnologias disponíveis para produção do transformador. Ou seja, estão embutido em suas fórmulas as limitações da fabril.

Para projetista que não tem experiência e desconhece quais dados devem ser mudados para otimizar o projeto de transformador e por existir várias soluções possíveis de transformadores. A dificuldade na realização do projeto pode ser descrita como a ausência de um ferramenta que pudesse fazer isso de maneira segura e rápida.

A seguir descrevem-se os principais parâmetros que são importantes na elaboração de um projeto da Parte Ativa. O estudo busca fazer esse processo de maneira padrão seguindo a ordem de cálculo do fabricante. Sendo a otimização feita de forma convencional, verificando as soluções.

No Capítulo 5 será tratado o software APROC utilizando GA.

3.1 Norma de Projeto

Os parâmetros, ao projetar um transformador de fabricação, são variáveis. Apenas os valores definidos por norma que informa o limite que estas variáveis não deve ultrapassar. Ao utilizar o software, sem implementação de inteligência computacional para encontrar o transformador ideal, uma busca deve ser feita por tentativa. Assim o projetista não tem a certeza que a solução encontrada é a melhor.

Para o cálculo da parte ativa e custo do transformador tem parâmetros que possui uma faixa de valores o qual tem influência nos custos e são parâmetros que se deve encontrar o ideal de forma que atenda a norma NBR 5440 e tenha menor custo da parte ativa do transformador.

Os valores definidos por norma que serão levados em conta neste projeto são limitações como Perda a vazio, Perda total, Tensão de curto-circuito e Corrente de excitação. Esses valores definidos por norma se encontram na tabela (3.3).

Tabela 3.1 – Valores garantidos de perdas, tensão de curto-circuito e corrente de excitação para transformadores trifásicos com tensão máxima de 15 kV segundo a NBR-5440.

Valores definido por norma para transformadores trifásicos				
Potência (kVA)	Corrente de excitação (%)	Perdas a vazio (W)	Perda Total (W)	Tensão de curto-circuito 75°C
15	4,6	100	440	3,5
30	4,1	170	740	3,5
45	3,7	220	1000	3,5
75	3,1	330	1470	3,5
112,5	2,8	440	1990	3,5
150	2,6	540	2450	3,5

Transformadores de potência elevada requerem uma densidade de corrente inferior à dos transformadores de menor potência. Isso se deve ao fato de que quanto maior for o volume do transformador maiores são as dificuldades de refrigeração, necessita-se, pois, reduzir as perdas por efeito Joule, o que é conseguido diminuindo-se a densidade de corrente. Na prática da empresa CEMEC, as densidades de corrente estão em torno de $(3A/mm^2)$ de acordo com os anexos I e II. Esses são os valores que estão sendo levados em consideração. Em outro exemplo de projeto de transformador utilizado por Martignoni (MARTIGNONI, 1991) utiliza-se a tabela (3.2) que se baseia na potencia do transformador.

Tabela 3.2 - Densidade de corrente prática, limite máximo.

Potência kVA	Densidade de Corrente A/mm^2
10 - 15	3,2
30 - 45	2,9
75 - 112,5	2,8
150 - 500	2,6
1000 - 2500	2

3.2 Ambiente de Projeto Convencional (APROC) Implementado

Inicialmente será desenvolvido um algoritmo que gere um projeto similar ao que é feito na indústria, de forma a validá-lo posteriormente.

De posse desta ferramenta então será usado técnicas de Algoritmo Genético com a finalidade de se buscar a melhor solução.

Para validar o software feito utilizando o MATLAB® e o Ambiente de Projeto Convencional, foram comparados os valores de saída do software com os valores de projetos feitos pelo fabricante CEMEC. Os valores não são exatos, pois a forma utilizada pela empresa tem mais detalhes empíricos que depende do processo de fabricação.

Assim, estudando todos os passos do projeto do transformador, foi possível fazer um software que gera resultados de acordo com os valores de entrada (parâmetros de projeto). Possibilitando uma busca (tentativa) do melhor projeto que atenda as normas. No software foi agregado uma parte que calcula o custo da parte ativa do Transformador. Pois será um dos parâmetros de escolha do melhor projeto.

A Figura 3.1 mostra a imagem do Ambiente de Projeto Convencional (APROC), ferramenta feita com a GUIDE do MATLAB®, na qual são apresentados os campos de entrada variáveis e os de saída, além do campo que fornece o custo final da parte ativa do transformador.

Figura 3.1 – Software para cálculo de transformador trifásico com estimativa de custo

O Programa foi feito de forma a se aproximar o máximo dos valores calculados pelo fabricante. Dependendo do fabricante há valores ajustados por limitações de fabricação, por isso é tão difícil fazer um software de projeto de transformador mais geral, pois muitos dados estão agregados à capacidade tecnológica do fabricante. Existem outras maneiras de minimizar o empirismo das fórmulas, através do uso de técnicas de inteligência computacional, que é o caso de projeto de transformadores usando Rede Neural Artificial (RNA), (SOUZA, et al., 2011), (SOUZA, 2004). Bastando ter um banco de dados de projetos realizados com sucesso para o treinamento da Rede Neural (HAYKIN, 1999).

A formulação básica para os cálculos de transformador são encontradas em vários livros como em (MARTIGNONI, 1991), (FITZGERALD, 2003), (VECCHIO, 2002), (WINDERS, 2002). Com pequenas alterações dependendo do autor. Veja na Figura 3.2 o roteiro clássico da sequência dos cálculos realizados.

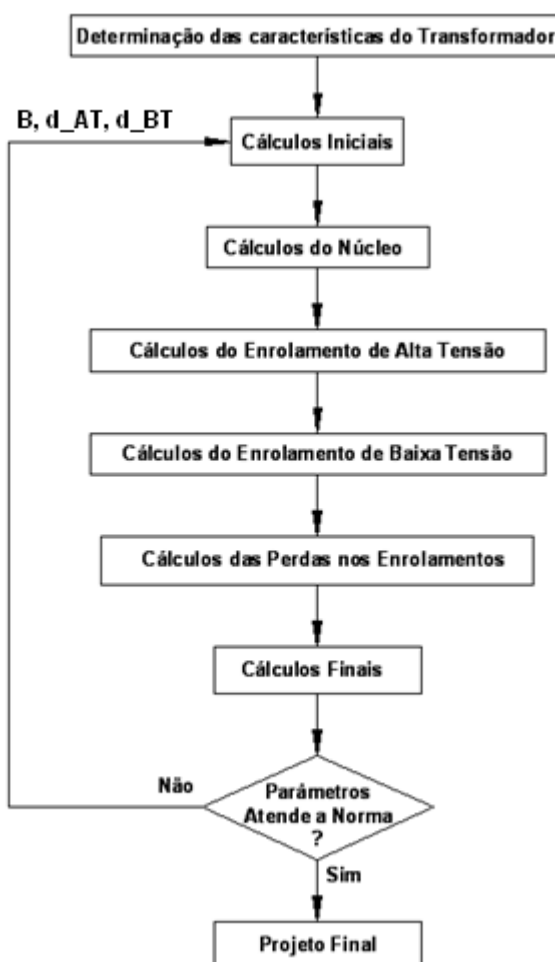


Figura 3.2 – Sequência para realizar o cálculo do transformador trifásico

No diagrama da Figura 3.2 é apresentado o roteiro geral do cálculo do transformador de distribuição. Os cálculos iniciam-se com as especificações do cliente (Subseção 3.2.1). Posteriormente, realizam-se os cálculos iniciais relacionando as correntes e tensões das bobinas (Subseção 3.2.2). Seguido pelos cálculos relacionados ao núcleo (Subseção 3.2.3). Os cálculos dos enrolamentos de alta tensão e dos enrolamentos de baixa tensão são apresentados nas Subseções 3.2.4 e 3.2.5. Conclui-se o projeto com a previsão de perdas (Subseção 3.2.6) e a previsão da Tensão de Curto-Circuito e Corrente de Excitação (Subseção 3.2.7). 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. Podem-se encontrar vários trabalhos os quais tem equações próximas a utilizada, a título de ilustração podemos citar Aguiar (AGUIAR, 2005) e Martignoni (MARTIGNONI, 1991).

3.2.1 Determinação dos parâmetros de projeto

O cliente ao adquirir um transformador deve especificar algumas características básicas ao fabricante, conforme Figura 3.3. Aspectos como o Número de fases, Potência, Tensão da Bobina Primária e Secundária e frequência de operação do equipamento. Além das exigências dos clientes, há padrões regulados pela NBR 5440 que devem ser obedecidas.



Figura 3.3 – Características iniciais para realizar o projeto de um transformador

3.2.2 Cálculos Iniciais

Após realizar as especificações do transformador, pode-se iniciar a fase dos cálculos básicos relacionados a correntes e tensões, determinando o tipo de fio e densidade de corrente, se está de acordo com o desejado. E assim seguir a sequência de cálculos da Figura 3.4.

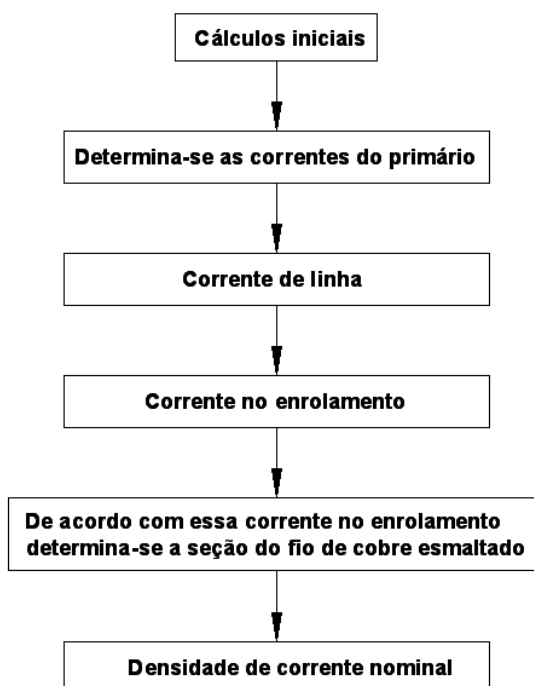


Figura 3.4 – Determinação das correntes, tensões e fio utilizado

A densidade de corrente é a relação da corrente no condutor pela seção do mesmo. Uma vez conhecida a densidade de corrente pode-se determinar o condutor mais adequado de acordo com a tabela de fios disponíveis por fabricantes, geralmente utiliza-se a tabela de fio AWG (Anexo III). Através das Equações (3.1) e (3.2) descobre-se a seção do condutor para as bobinas de baixa e alta tensão.

$$S_1 = I_1/d_{AT} \quad (3.1)$$

$$S_2 = I_2/d_{BT} \quad (3.2)$$

Sendo:

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

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

I_1 = corrente nominal primária, em A;

I_2 = corrente nominal secundário, em A;

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

d_{BT} = densidade de corrente do fio de baixa tensão, em A/mm²;

Seguindo a sequência do diagrama tem-se a determinação da Corrente de Linha, esta determinada pela Equação (3.3).

$$IL_{AT} = kVA/(\sqrt{3} * VL) \quad (3.3)$$

Sendo:

kVA = Potencia do transformador

VL = Tensão de linha

A determinação da corrente no enrolamento é determinada de acordo com a Equação (3.4).

$$I_{AT} = IL_{AT} / \sqrt{3} \quad (3.4)$$

Assim a escolha do fio é feita de acordo com a corrente no enrolamento, fazendo uma consulta na tabela de fio disponível ao fabricante (Anexo III).

Sabendo-se da corrente e da secção do fio escolhido pode-se determinar a densidade de corrente corrigida de acordo com a Equação (3.1) que será a utilizada nos demais cálculos.

3.2.3 Cálculos do Núcleo

Sabendo-se das especificações e das correntes e tensões do sistema e fio utilizado, faz-se a determinação do dimensionamento do núcleo, levando em consideração o fluxo magnético induzido, estabelecendo e tendo uma previsão das perdas no núcleo seguindo a sequência conforme a Figura 3.5.

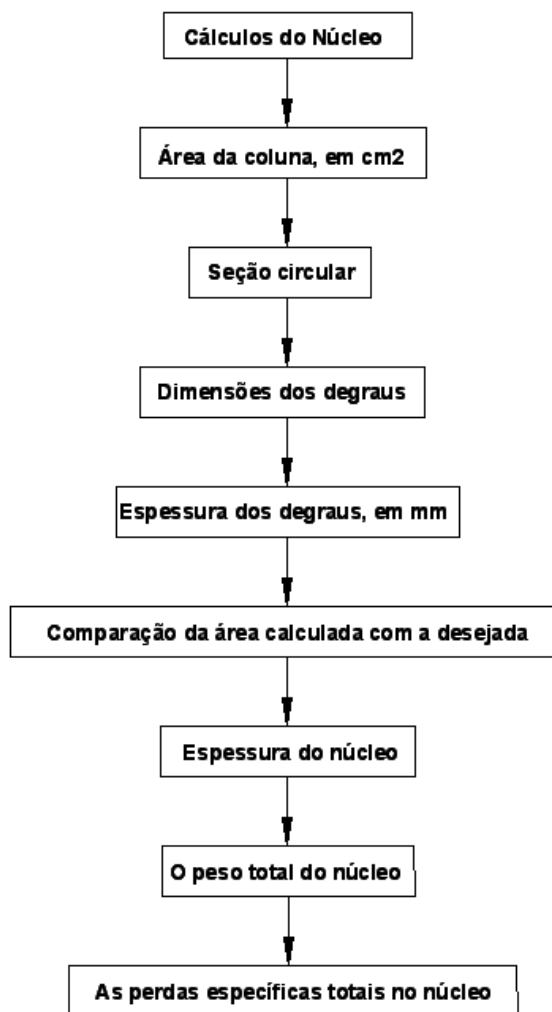


Figura 3.5 – Cálculo das variáveis do núcleo

Seguindo o fluxograma acima é determinada a Área da coluna em cm^2 (SN_cm) pela Equação (3.5) (KOSOW, 2005). Para a determinação das Dimensões dos degraus e Espessura dos degraus (NDeg), utilizou-se o mesmo especificado pelo projeto do fabricante (Anexo I). Concluindo-se a determinação da Espessura do núcleo (SN_cm).

$$SN_{cm} = \frac{[\sqrt{2} \cdot (VpE)]}{2\pi \cdot B \cdot f} \quad (3.5)$$

Sendo:

VpE = Volts por Espiras

B = Indução Magnética dada em Tesla (T)

f = frequência

Considerando as dimensões necessárias para as bobinas (Secção 3.2.4) e as folgas usuais entre os enrolamentos de alta e baixa e dos conjuntos destes com o núcleo de ferro, são obtidos os valores dimensionais para as dimensões finais do núcleo. Podendo assim calcular o peso do núcleo conforme Equação (3.6) (GEORGILAKIS, 2009b).

$$Peso_{Fe} = [(2.HN + 3.AN + 4.EN).SN . 10^{-4} . 7,65] \quad (3.6)$$

Sendo:

Peso_{Fe} = Peso do Núcleo de ferro.

DN = Diâmetro do Núcleo

NA = Altura do Núcleo

EN = Largura da Janela do Núcleo

HN = Altura da Secção Transversal do Núcleo

As perdas no Núcleo ou no Ferro (W_{fe}) podem ser separadas em perdas por histerese, PH, e perdas por corrente induzidas ou Foucault, PF, isto é:

$$W_{fe} = PH + PF \quad (3.7)$$

Sendo:

W_{fe} = perdas no ferro

PH = perda por histerese

PF = perda por corrente parasitas ou Foucault

Onde, PH e PF é dado pelas Equações (3.8) e (3.9) (OLIVEIRA, 1984) respectivamente.

$$PH = K_s . B . f \quad (3.8)$$

$$PF = 2,2 . f^2 . B^2 . d^2 . 10^3 \quad (3.9)$$

Sendo:

K_s = coeficiente de Steinmetz que depende do material do núcleo.

B = máxima densidade de fluxo magnético.

f = frequência

d = espessura da laminação do núcleo

3.2.4 Cálculos do Enrolamento de Alta Tensão

O dimensionamento dos enrolamentos das Bobinas Primária e Secundária são determinadas de acordo com a espessura dos fios calculados anteriormente. As composições das distâncias entre bobinas (EF) são valores que dependem da classe de tensão de isolamento que serão os mesmos valores especificados pelo fabricante (Anexo I). A quantidade de camadas nas bobinas depende do tipo de fio escolhido e da altura do núcleo, ou seja, da composição montada (CM). Para obter as dimensões radiais das bobinas é necessário seguir a sequência do Cálculo do Enrolamento de Alta Tensão conforme Figura 3.6.

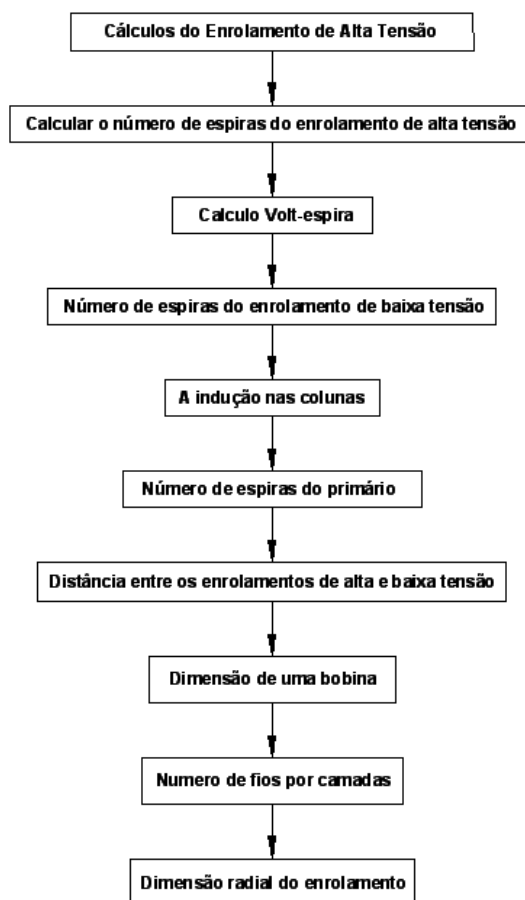


Figura 3.6 – Cálculos da bobina de Alta Tensão

O cálculo do número de espiras do enrolamento (VpE) é determinado pela Equação (3.10) (OLIVEIRA, 1984).

$$VpE = 4,44 \cdot f \cdot SN_{cm} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (3.10)$$

Sendo:

VpE = Volts por espiras

B = Indução Magnética

SN_{cm} = Secção do núcleo em centímetros quadrados.

Para o cálculo do Número de espiras Tanto de Alta tensão VpE, é possível determinar o número de espiras do enrolamento de alta tensão NE_{AT} conforme Equação (3.11) (GEORGILAKIS, 2009b).

$$NE_{AT} = AT \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{NE_{BT}}{BT} \quad (3.11)$$

Sendo:

NE_{AT} = Número de espira do primário

NE_{BT} = Número de espira do secundário

AT = Alta Tensão

BT = Baixa Tensão

De acordo com o número de camada especificado pelo projetista, que depende do número de espiras que a bobina possui e da espessura do papel isolante entra cada camada podem-se somar as composições e obter a dimensão radial do enrolamento, conforme Figura 3.7.

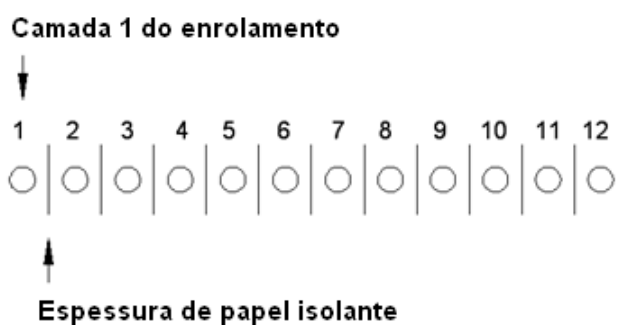


Figura 3.7 – Composição radial da bobina de alta tensão

3.2.5 Cálculos do Enrolamento de Baixa Tensão

Nessa secção a Figura 3.8 trata do cálculo do enrolamento da bobina de baixa tensão com que é similar aos realizado na secção anterior.

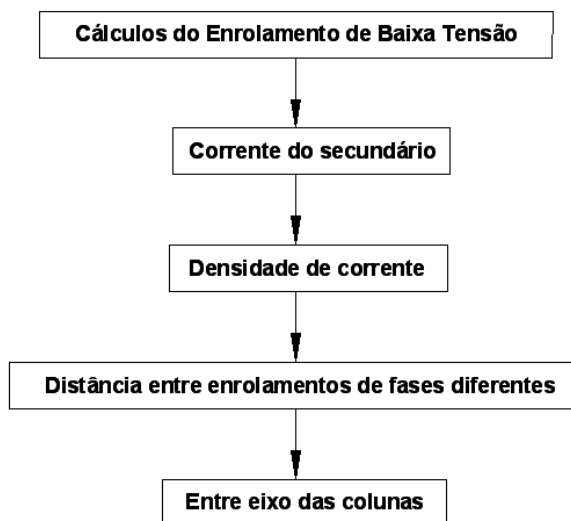


Figura 3.8 – Cálculo da bobina de baixa tensão

Sendo a corrente de linha (IL_{BT}) e corrente de fase (IF_{AT}) do secundário a mesma conforme Equação (3.12) (GEORGILAKIS, 2009b).

$$IL_{BT} = IF_{BT} = \frac{kVA}{BT \cdot \sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Ao encontrar a densidade de corrente, conforme Equação (3.2), faz-se a escolha do fio retangular para Bobina de Baixa Tensão. Nesse caso pode-se fazer composição de fios para encontrar a secção mais próxima da desejada.

O cálculo do raio das bobinas, junto com os canais entre fases que são os mesmos adotados pelo projeto (Anexo I), são relevantes para descobrir o valor do entre eixo das colunas.

3.2.6 Cálculos das Perdas no Enrolamento

Os cálculos para previsão de perdas no transformador antes de ser fabricado são característicos de cada empresa, pois leva em consideração a tecnologia de fabricação.

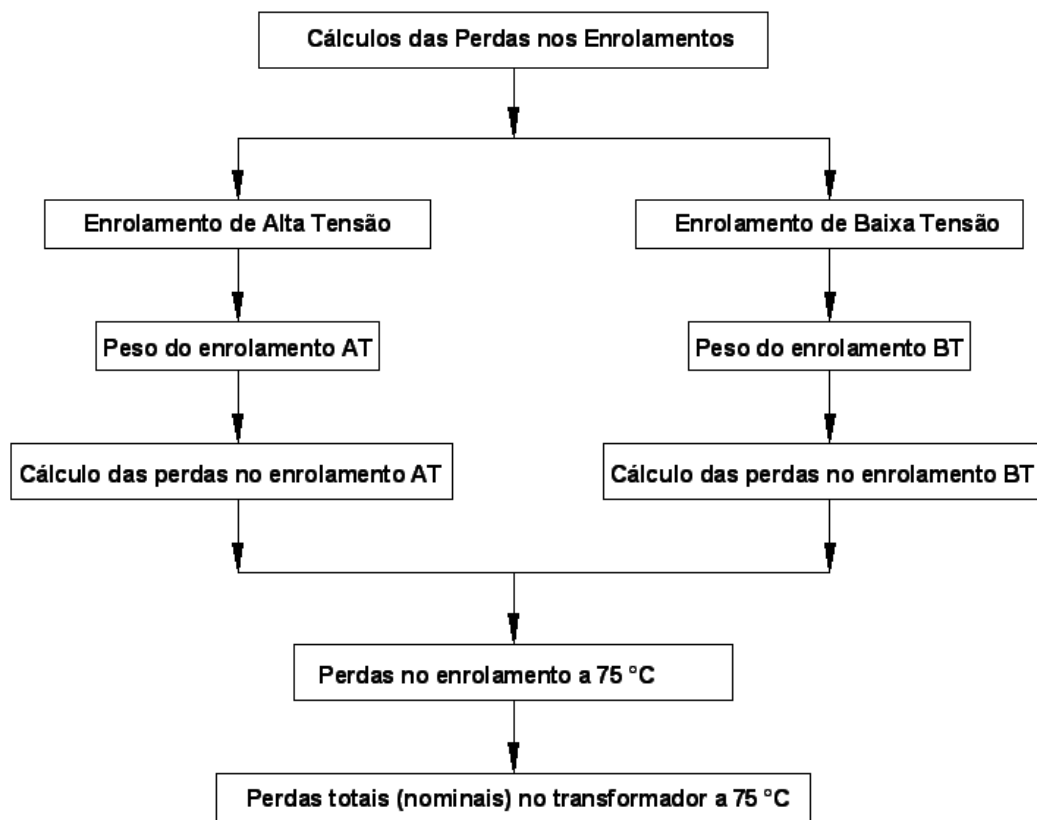


Figura 3.9 – Previsão das perdas nos enrolamentos

A Figura 3.9 resume-se em previsão das perdas totais do transformador (WT) expressa na Equação (3.13), que é a soma das perdas no ferro (Wfe) adicionada às perdas Wcu.

$$WT = Wfe + Wco \quad (3.13)$$

As perdas no ferro (Wfe) é calculada na secção 3.2.3. As perdas no cobre (Wcu) ou nos enrolamentos de acordo com a Equação (3.14), que variam de acordo com a temperatura do transformador. Os cálculos são realizados levando em conta a temperatura de operação do transformados, que é de 75°C.

$$Wco = f(\text{Peso da Bobina}, \text{densidade de corrente}) \quad (3.14)$$

3.2.7 Cálculos Finais

A previsão da Tensão de curto-circuito (V_{cc}) e da corrente de excitação (I_o) conforme Figura 3.10 são dadas por equações do fabricante que considera o processo de fabricação e qualidade da montagem. As Equações (3.15) e (3.16) fazem uma previsão dos resultados que serão comprovados quando o transformador for ensaiado. O resultado tem que estar de acordo com a NBR 5440.

$$V_{cc} (\%) = f(De_AT, RB, NB, W_{cu}, kVA) \quad (3.15)$$

$$I_o = f(Peso_fe) \quad (3.16)$$

Sendo:

De_AT = Diâmetro externo da Bobina de Alta tensão

RB = Radial da Bobina de baixa tensão

NB = Numero de camadas da Baixa Tensão

W_{cu} = Perdas no Cobre

kVA = Potencia do Transformador

$Peso_fe$ = Peso do Núcleo

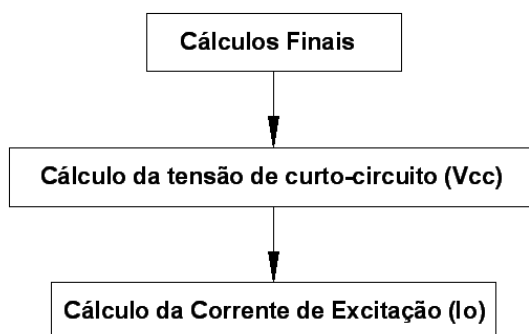


Figura 3.10 – Previsão do V_{cc} e do I_o

3.3 Avaliação do Ambiente de Projeto Convencional (APROC)

O software denominado APROC (Ambiente de Projeto Convencional) calcula o dimensionamento da parte ativa dos transformadores de distribuição encontrando valor próximo ao calculados pela indústria de transformadores CEMEC. Podemos assim considerar o APROC como um software válido.

Os valores simulados pelo Ambiente de Projeto Convencional (APROC) são comparados com os calculados pela empresa (Anexo I), feitos de maneira convencional, os valores são bem próximos como mostrado em exemplos expostos nas tabelas (3.3) e (3.4).

Posteriormente no Capítulo 5 será modificado o APROC para que a busca da melhor solução seja feita pelo GA.

Tabela 3.3 – Dados do transformador trifásico de 15 kVA

Trafo de 15 kVA (220)		
VARIÁVEIS	EMPRESA	APROC
Dados de entrada		
kVA	15	15
AT	13800	13800
BT	220	220
f	60	60
Ndeg	4	4
B	1,710	1,711
d_BT	2,297	2,297
d_AT	2,809	2,809
EF	7	7
Dados de Dimensionamento		
DN_mm	79	82
DiBT	81	85
DeBT	103	113
DiAT	116	126
DeAT	159	172
SF_BT	17,14	17,19
SF_AT	0,128	0,163
NE_BT	69	64
NE_AT	7497	6954
Dados de Material		
Peso_BT	9,4	9,09
Peso_AT	11	14,16
Peso_Fe	41,4	44,71
Dados Normas		
Wcu	332	320
Wfe	96	102
WT	428	423
Vcc	3,53	3,58
Io	4,36	4,35

Tabela 3.4 – Dados do transformador trifásico de 45 kVA

Trafo de 45 kVA (220)		
VARIÁVEIS	EMPRESA	APROC
Dados de entrada		
kVA	45	45
AT	13800	13800
BT	220	220
f	60	60
Ndeg	5	5
B	1,766	1,766
d_BT	3,085	3,087
d_AT	2,671	2,638
EF	7	7
Dados de Dimensionamento		
DN_mm	100	105
DiBT	102	108
DeBT	132	146
DiAT	145	159
DeAT	195	231
SF_BT	38,28	38,28
SF_AT	0,412	0,412
NE_BT	40	37
NE_AT	4346	4020
Dados de Material		
Peso_BT	15,6	15,08
Peso_AT	24,5	27,09
Peso_Fe	83,2	87,21
Dados Normas		
Wcu	799	813
Wfe	194	200
WT	993	1013
Vcc	3,61	3,76
Io	3,44	3,38

Mais exemplos podem ser consultados e comparados nas tabelas do anexo I e os resultados do Ambiente de Projeto Convencional nas tabelas (3.5) e (3.6).

Tabela 3.5 - Transformador trifásico com tensão de saída 220V (Modelo APROC).

DADOS DE PROJETO – 220 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	220	220	220	220	220	220
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,710	1,736	1,766	1,763	1,790	1,806
d_BT	2,297	2,702	3,085	2,823	2,976	3,436
d_AT	2,809	2,842	2,671	2,787	2,613	2,196
EF	7	7	7	7	7	7
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	82	96	105	119	131	140
DiBT	85	99	108	122	134	143
DeBT	113	125	146	160	170	185
DiAT	126	138	159	173	183	198
DeAT	172	182	231	233	243	292
SF_BT	17,19	29,11	38,28	69,69	99,3	114,00
SF_AT	0,163	0,259	0,412	0,653	1,04	1,651
NE_BT	64	45	37	29	24	21
NE_AT	6954	4889	4020	3151	2608	2282
Dados de Material						
Peso_BT	9,09	12,3	15,08	23,91	30,39	32,93
Peso_AT	14,16	16,99	27,09	35,05	48,45	77,41
Peso_Fe	44,71	67,82	87,21	123,11	164,16	199,97
Dados Normas						
Wcu	320	570	813	1169	1585	1938
Wfe	102	156	200	293	394	506
WT	423	727	1013	1463	1979	2444
Vcc	3,58	3,61	3,76	3,68	3,65	3,94
Io	4,35	3,55	3,38	2,90	2,80	2,75
Custo R\$						
	853,4	1166,6	1592,9	2241,4	2990,9	3936,3

Tabela 3.6 - Transformador trifásico com tensão de saída 380V (Modelo APROC).

DADOS DE PROJETO – 380 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	380	380	380	380	380	380
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,698	1,728	1,769	1,757	1,797	1,806
d_BT	2,389	2,689	3,159	3,300	3,540	2,614
d_AT	2,809	2,842	2,671	2,787	2,613	2,766
EF	7	7	8	9	9	8
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	82	96	105	119	131	140
DiBT	85	99	108	122	134	143
DeBT	109	121	136	164	166	169
DiAT	122	134	149	177	179	182
DeAT	158	166	201	249	239	226
SF_BT	9,59	16,86	21,60	34,56	48,24	87,35
SF_AT	0,163	0,259	0,463	0,653	1,04	1,65
NE_BT	110	78	64	50	41	35
NE_AT	6919	4906	4026	3145	2579	2202
Dados de Material						
Peso_BT	8,59	12,14	14,15	20,72	24,88	40,01
Peso_AT	13,24	15,99	27,36	36,71	47,02	62,19
Peso_Fe	46,56	70,81	88,05	123,75	161,85	221,35
Dados Normas						
Wcu	327	574	759	1170	1541	1938
Wfe	96	154	201	292	401	508
WT	423	728	960	1462	1942	2446
Vcc	3,60	3,64	3,71	3,90	3,78	3,61
Io	4,48	3,49	3,25	2,78	2,71	2,59
Custo R\$	837,1	1164,8	1583,9	2208,8	2817,2	3944,9

3.4 Estimando Custo do Projeto

Como o projeto prevê o cálculo da parte ativa do transformador, o custo foi baseado nos cálculos feitos de acordo com os valores praticados por empresas do ramo.

Onde conta um percentual ao custo da matéria prima Aço Silício e do Fio de Cobre, material da Parte Ativa (PA), foi cogitado também um percentual que estar intrínseco a qualquer tipo de transformador, que é atribuído a Acessórios (AC) e Mão de Obra (MO). Os principais valores dos custos apresentados estão de acordo com o descrito na tabela (3.7). Vale ressaltar que o cálculo do custo é apenas para demonstrar os gastos básicos, sem considerar infraestrutura, logística, parte mecânica, segurança, perdas de materiais, ensaios, testes e serviços específicos agregados ao processo.

Tabela 3.7 - Percentagem do custo de fabricação da parte ativa do transformador

1-Aço Silício	35,20%	83,35%	PA
2-Fio De Cobre Esmaltado	48,15%		
3-Ferragens	4,10%	8,30%	AC
4-Kit Isolante	2,05%		
5-Kit Solda	1,15%		
6-Componentes	1,00%		
7-Mão De Obra Direta (Homem)	4,35%	8,35%	MO
8-Mão De Obra Indireta	4,00%		
TOTAL	100%		

Os custos (R\$) apresentados nas tabelas (3.5) e (3.6) foram calculados simplesmente a partir dos dados de material (Peso_BT, Peso_AT, Peso_Fe), considerando os seguintes valores em R\$/kg. (Cobre AWG Esmaltado = R\$ 17,5), (Cobre Barra Retangular = R\$ 19,00), (Aço do Núcleo M3 = R\$ 6,50), (Aço do Núcleo M4 = R\$ 6,00). Valores que podem variar de acordo com a região e a quantidade a ser adquirida. Os dados foram obtidos pelo fabricante de transformador em 11 de novembro de 2011.

Assim: Custo da Parte Ativa do Transformador = Peso (kg) . Custo do Material (R\$/kg).

3.5 Comentários Finais

O estudo de projeto de transformador convencional possibilitou a elaboração de um Ambiente de Projeto Convencional, que permite variar os parâmetros de entrada gerando valores dimensionais da parte ativa do transformador além da previsão de perdas e custos.

O custo está relacionado com os parâmetros de que são normalizados na função de avaliação os quais possibilita a variação e pode afetar diretamente no valor das perdas e nas dimensões do transformador. Consequentemente no custo final do produto.

Simulando os dados para transformadores já otimizados pelo fabricante, verificou-se que os valores da parte ativa prevista pelo APROC têm resultados bem próximos do fabricante.

No Capítulo 4 e será apresentada a ferramenta de busca Algoritmos Genéticos GAs e em seguida, no Capítulo 5, a implementação do GA no APROC.

CAPÍTULO 4

ALGORITMOS GENÉTICOS

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

Os parâmetros do projeto podem variar dependendo do problema e essas variações, por serem muitas as possibilidades, tornam-se um problema difícil para o projetista do fabricante garantir que é o projeto do transformador ótimo. Já o programa com uso de Algoritmo Genético, apesar de não garantir a melhor solução, tem a facilidade de buscar e testar o maior número de combinações de solução oferecendo o melhor caso encontrado.

Em Man (MAN, 1996) são mostrados vários trabalhos, em diversas áreas, em que os GAs têm sido empregados, mostrando a eficiência da ferramenta no caso de busca. Assim como em trabalhos como (DOULAMIS, 2002), (POLTOSI, 2009), (GEORGILAKIS, 2009b), (GEORGILAKIS, 2001).

4.1 Conceitos básicos de Algoritmos Genéticos

Nos anos de 1950 a 1960 vários cientistas da computação, independentes, estudavam sistemas evolutivos com a ideia de que evolução poderia ser usada como uma ferramenta de otimização para solucionar problemas. A intensão é que todos os algoritmos estudados sejam capazes de evoluir e se tornar uma população de soluções candidatas de um determinado problema, enquanto um operador inspirado por variação genética natural e seleção natural pudesse encontrar a melhor solução.

Algoritmo genético (GA) foi inventado pela John Holland nos anos sessenta e foi desenvolvido pelo próprio Holland e os seus estudantes e colegas na Universidade de Michigan nos anos sessenta e os anos setenta. Em contraste com estratégias de evolução e programação evolutiva, a meta original de Holland era não projetar algoritmos para resolver problemas específicos, mas somente estudar o fenômeno de adaptação formalmente como acontece na natureza e desenvolver modos nos quais poderiam ser importados os mecanismos da natureza de adaptação em computador. Holland em 1975, com o livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* apresenta o algoritmo genético como uma ferramenta de evolução biológica e incrementou a teoria (GOLDBERG, 1992).

O GA é um método que modifica uma população de "cromossomos" (vetor de 1 e 0") para uma nova população usando um tipo de "seleção" natural em paralelo com os operadores genético inspirados de crossover, mutação. Cada cromossomo consiste em " genes ", cada gene é um alelo " particular " (por exemplo, 0 ou 1). O operador de seleção escolhe esses cromossomos na população que será permitido reproduzir, gerar novos descendentes que irão constituir a nova opção da população (MITCHELL, 1996).

Hoje os algoritmos genéticos são uma família de modelos computacionais para otimizar ou buscar soluções de problemas com vários parâmetros e de difícil resolução ou com grande número de repostas que tem por objetivo obter a melhor solução.

Alguns termos relacionados à evolução são utilizados e, mais do que isso, essenciais para a compreensão desse trabalho. De acordo com Mitchell (MITCHELL, 1996), como pode ser verificado na tabela (4.1).

Tabela 4.1 – Terminologia usada em Algoritmos Genéticos

Representação	Tipo de Problemas
Aptidão (<i>Fitness</i>)	Probabilidade de um cromossomo sobreviver à próxima geração
Cromossomo (<i>Chromosome</i>)	Uma estrutura de solução para o problema proposto
População (<i>Population</i>)	Conjunto de cromossomos que compõe cada geração
Gene (<i>Gene</i>)	Divisão conceitual de um cromossomo, capaz de codificar uma característica
Posição (<i>Locus</i>)	Localização de um gene no cromossomo
Alelo (<i>Allele</i>)	Um possível valor ou característica que um gene pode possuir
Cruzamento (<i>Crossover</i>)	Permutação de partes entre dois cromossomos
Mutação (<i>Mutation</i>)	Alteração ou mudança de um ou mais alelos de um cromossomo

Os termos são utilizados diversas vezes e sua aplicação é descrita ao longo do texto.

A implementação do Algoritmo Genético inicia-se com uma população aleatória de cromossomos. Onde é avaliada a possibilidade de reprodução de cada indivíduo, verificando se já possui a solução requerida na população, caso não, é feita uma seleção dos reprodutores e uma vez feita gera-se uma nova população onde alguns indivíduos podem ter sofrido mutação.

A estrutura básica do Algoritmo Genético pode ser mostrada na Figura 4.1.

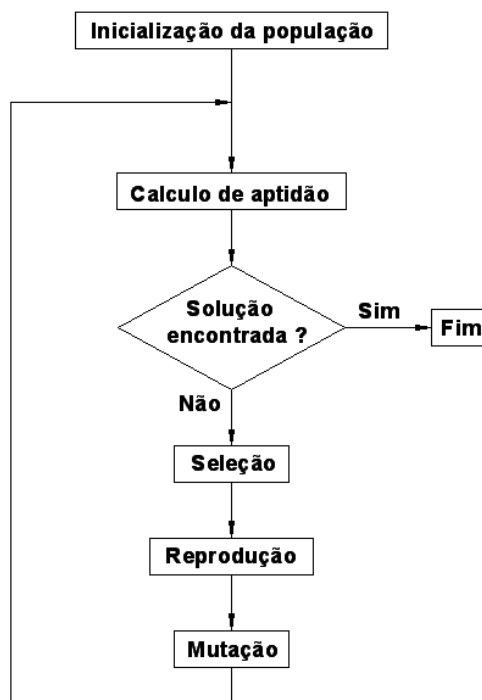


Figura 4.1 – Estrutura básica do Algoritmo Genético

4.1.1 Inicialização da População

A população de indivíduos ou cromossomos deve ser gerada aleatoriamente, para ter grande variedade de genes. Ao gerar uma população tem-se a primeira geração das possíveis soluções.

4.1.2 Representação do Cromossomo

O cromossomo pode ser representado de três formas diferentes (binária, inteira ou real). De acordo com o tipo de problema pode-se utilizar qualquer uma desses três tipos de representações. A codificação e decodificação das informações, juntamente com a função de avaliação, é que liga o GA ao problema resolvido.

Na Figura 4.2 o cromossomo é representado por um vetor e sua representação está na forma binária. Cada Bit representa um gene.

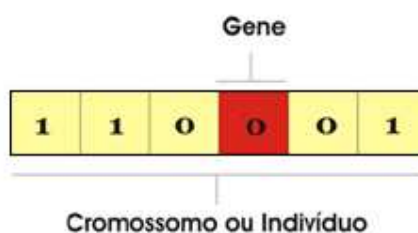


Figura 4.2 - Representação de um cromossomo com genes binários

4.1.3 Função de avaliação

A função de avaliação avalia cada indivíduo da população que depende da especificação do projeto, atribuindo um valor a cada um e classificando-os de acordo com sua aptidão.

4.1.4 Seleção

O processo de seleção em algoritmos genéticos escolhe indivíduos para a reprodução. A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos: indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução. Se a avaliação do indivíduo for maior, ele, na população, terá maior probabilidade de ser selecionado para reprodução.

A seleção em GAs é tipicamente implementada como uma roleta viciada, em que cada indivíduo é representado por uma fatia proporcional a sua aptidão relativa. O operador de seleção é um componente essencial de algoritmos genéticos.

A representação da roleta, conhecida também como Roleta Viciada, a Figura 4.3 representa cada indivíduo com chance diferente de ser sorteado dependendo de sua aptidão.

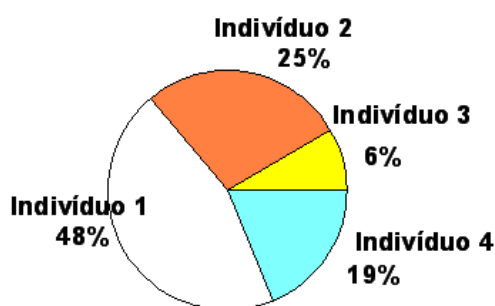


Figura 4.3 – Roleta com a probabilidade da escolha de cada indivíduo

4.1.5 Crossover

Ao selecionar os indivíduos com uso da roleta, esses indivíduos formam pares aleatórios, os quais serão os genitores da próxima geração. Os pares de indivíduos selecionados são então cruzados. A Figura 4.4 ilustra como é realizado o cruzamento entre os pais selecionados.

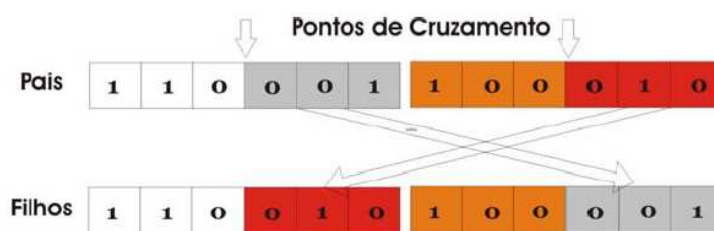


Figura 4.4 - Cruzamento de dois indivíduos no GA

4.1.6 Mutação

A Mutação cria diversidade e tem a função de mudar o gene dentro do cromossomo, gerando indivíduos modificados para ter diversidade da população. Sua função é alterar arbitrariamente, logo após o cruzamento, um ou mais genes, escolhido de forma aleatória. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada por uma taxa de mutação. A Figura 4.5 mostra o processo de mutação. (MIRANDA, 2009)

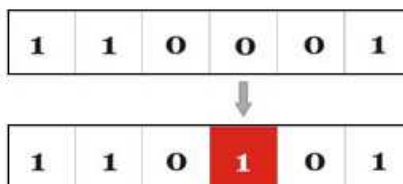


Figura 4.5 – Processo de mutação aplicado em um gene do cromossomo

A taxa de mutação não deve ser nem alta nem baixa, mas o suficiente para assegurar a diversidade de cromossomos na população.

4.2 Múltiplos Objetivos em GA

Ao tratar problemas reais utilizando algoritmo genético necessita-se de uma medida de desempenho. Qualquer solução pode ser definida como um vetor, pertencente ao espaço de decisão. Para problemas com muitas variáveis, há a necessidade de avaliar qual solução ou qual vetor de solução tem maior desempenho. Tem que buscar uma função que as relacione e saber qual a necessidade e influência de cada variável. Tomando como exemplo, para comprar uma casa maior eu tenho que aceitar um preço maior, ou, para diminuir o tempo de entrega, tenho que aumentar o número de caminhões.

Nem todas as variáveis obterão nota de avaliação máxima, e existirão várias combinações que tem como saída a mesma avaliação, assim resta ao usuário descobrir qual destas soluções o satisfaz, para que o algoritmo possa escolher a de maior qualidade.

4.3 Conclusões do Capítulo

O algoritmo genético ficará realizando o ciclo de reprodução, até que o critério de parada seja alcançado. O critério de parada pode ser por número de gerações ou até encontrar a nota da função de avaliação satisfatória definida pelo programador.

Para utilizar o Algoritmo genético no cálculo do transformador tem-se que levar em conta valores regulados por norma que limita um espaço de valores possíveis. Assim os parâmetros de parada que devem ser levados em conta na implementação do Algoritmo genético utilizado são os da nota da função e avaliação.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA PROJETO DE TRANSFORMADOR

A proposta de projeto de transformador utilizando GA busca encontrar valores para alguns dos parâmetros iniciais que influenciam todo o cálculo do projeto, de forma a obter informações e dados operacionais e construtivos (ver secção 3.2), como as dimensões do transformador que atendem os limites de valores estabelecidos por normas, cliente e fabricante. Pode-se citar como pontos relevantes a escolha da bitola do fio correto a ser utilizado para suportar a densidade de corrente especificada pelo projeto.

A faixa de densidade de corrente utilizada neste trabalho deve ser igual ou inferior a que foi utilizada pelos projetos de referência. A escolha da densidade de corrente correta implica na busca do fio ideal e, conseqüentemente, na corrente que o mesmo suporta e no número de espiras necessárias para gerar a densidade de fluxo magnético (B) desejada no núcleo.

No início do cálculo do transformador, além das especificações do cliente (potência, tensão entrada e saída, frequência), o projetista deve especificar a Máxima indução magnética desejada, que possa variar em torno de 1,5T a 1,8T conforme Oliveira (OLIVEIRA, 1984). Nessa etapa inicial, o projetista também deve especificar as densidades de corrente da bobina de alta tensão (d_{AT}) e da bobina de baixa tensão (d_{BT}). Diante desses valores iniciais, realizam-se os cálculos que verificam se a Indução magnética é compatível (corrigindo-a caso não seja), e verifica-se a disponibilidade dos fios das bobinas para obter a densidade de corrente. De acordo com o fio escolhido, faz-se a correção da densidade de corrente. Com estes valores calcula-se o restante do transformador (ver secção 3.2), verificando se atende a parâmetros especificados por normas e pelo fabricante como Perda no Núcleo (WT), perdas no cobre (W_{cu}), tensão de curto-circuito (V_{cc}), corrente de excitação (I_o) e custo do transformador. Caso não atenda aos valores estabelecidos, deve-se ajustar nova indução magnética e outras densidades de corrente nos fios para que seja calculado novamente o transformador.

Esse ajuste dos parâmetros iniciais (B , d_{AT} e d_{BT}) no projeto pode ser tratado como um problema de busca da melhor solução segundo um critério de avaliação que satisfaça às exigências da melhor forma. Esse problema pode ser tratado com uso de Algoritmo Genéticos, onde uma função de *fitness* descreve o critério que se deseja satisfazer (norma e redução dos custos).

Assim, buscando a densidade de corrente que o fio suporta e a densidade de fluxo magnético B no Núcleo correta, pode-se determinar qual a combinação de fio utilizado e qual a indução mais apropriada para que o cliente, o fabricante e Norma sejam atendidos, garantindo-lhes o melhor preço.

A seguir, na Seção 5.1, descrevem-se os parâmetros a serem ajustados pelo GA. Na Seção 5.2 descreve-se como foi implementado o GA Básico. Na Seção 5.3 os resultados encontrados são mostrados em tabelas e analisados. Na Seção 5.4 resumem-se os resultados obtidos com a minimização dos custos utilizando as funções de *fitness* testadas

5.1 Ajuste Automático de Parâmetros no Ambiente de Projeto Convencional

Ao realizar o cálculo do transformador, a Indução magnética (B), a densidade de corrente da bobina de baixa tensão (d_{BT}) e a densidade de corrente de alta tensão (d_{AT}) podemos afirmar que todas foram realizadas segundo os mesmos parâmetros e que estes são ajustados de acordo com as secções de fios disponíveis (Anexo - III). Estes parâmetros serão codificados para formar os indivíduos a serem ajustados pelo Algoritmo Genético de forma automática. Uma vez definidos quais são os melhores valores, pode-se encontrar o melhor transformador.

Assim, o GA é iniciado com uma população de indivíduos com os parâmetros a serem ajustados e escolhidos de forma aleatória, realiza-se, em seguida, uma busca dentro de um espaço limitado pelo projetista conforme diagrama da Figura 4.1. Essa busca no espaço de soluções é guiada pela combinação de cada indivíduo/projeto (função de *fitness*).

Os parâmetros ajustados têm faixas que são admitidos de acordo com o fabricante e potência. No caso do fabricante CEMEC, a indução magnética deve estar na faixa de 1,69T a 1,81T, e as densidades de corrente devem ter seus valores entre 2,297 a 3,436 A/mm², conforme Anexo I - Tabela (A1.1).

De acordo com o que foi descrito na Seção 4.1, o GA básico pode utilizar representação binária para os valores dos genes. O GA implementado utiliza representação binária de 8 bits, ou seja, cada indivíduo possui um cromossomo de 24 bits conforme Figura 5.1. Assim, a busca ocorrerá em um espaço de $2^{24} = 16.777.216$ possíveis combinações.

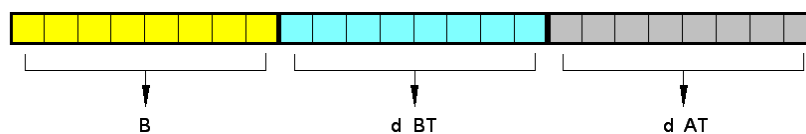


Figura 5.1 – Codificação de cada indivíduo/projeto utilizado no GA implementado

No caso da Indução magnética, que varia de 1,69 a 1,81 Tesla, tem-se uma faixa de $(1,81 - 1,69 = 0,12 \text{ T})$ e no caso da densidade de corrente tem uma faixa de $(3,436 - 2,297 = 1,139 \text{ A/mm}^2)$. Para um projetista descobrir qual o valor dentro desta faixa adequada ao projeto, se torna uma dificuldade, principalmente se o mesmo não tiver experiência sobre qual parâmetro alterar e com qual intensidade. Mesmo com a experiência, as melhores combinações não serão garantidas pelo projetista. O GA também não garante a melhor solução, mas é uma metaheurística de busca que consegue uma notável aproximação dos valores ótimos. As implementações realizadas nesse trabalho testa 1000 gerações de 25 indivíduos, sendo que, à medida que as gerações evoluem, os indivíduos tendem a melhorar a combinação de seus genes, tendendo a gerar indivíduos cada vez melhores.

Na próxima seção o Algoritmo Genético, descrito no Capítulo 4, será apresentado. Será, dito, também, de que forma ele foi implementado e como foi tratado o problema da escolha dos parâmetros iniciais de projetos.

5.2 Algoritmo Genético Implementado

Para implementar o GA define-se primeiro como estão sendo implementados alguns pontos específicos.

O uso da roleta viciada (Seção 4.1) será a forma de selecionar os pais da próxima geração. Ou seja, cada indivíduo é avaliado com uso de uma função de *fitness* onde quanto maior a avaliação melhor o indivíduo e maior será a probabilidade dele ser genitor dos próximos indivíduos, e de que os genes dos melhores indivíduos estejam presentes na próxima geração.

Ao gerar uma nova população selecionando apenas genes ótimos, pode ocorrer de que um gene ruim ser necessário, pois, para garantir que haja diversidade e adaptabilidade a novas situações na natureza, ocorre a mutação, e o mesmo acontece com o GA. Sendo que em ambos os casos a probabilidade que ocorra a mutação é baixa. No caso do GA é utilizada uma taxa de mutação 0,01%. Cada bit do cromossomo tem esta probabilidade de ser afetado por mutação. No caso do uso de GA, uma estratégia muito adotada é garantir que o melhor indivíduo esteja sempre na população da nova geração formada. Essa é uma maneira de evitar a ocorrência da perda do melhor indivíduo (melhor solução até o momento encontrada). Dá-se o nome de elitismo a esse procedimento, e ele é adotado nas implementações realizadas.

A Avaliação do Indivíduo é feita utilizando a função de *fitness* que, no presente trabalho, considera as limitações impostas pelo projeto e pelos custos. Na função de *fitness* tem-se a

possibilidade de tornar um melhor valor quando atender as limitações impostas e piorar o valor da avaliação quando não atender as limitações ou quando a solução não for tão eficiente podendo haver melhores.

A função de *fitness* implementada considera se a solução está atendendo os valores estabelecidos por norma e o custo da parte ativa do transformador. Portanto, quanto menor o valor da função melhor é o indivíduo (projeto). Na Equação (5.1) pode-se avaliar o indivíduo.

$$\begin{aligned}
 \text{Avaliação}(i) = & \{\alpha 1 \cdot (\text{Custo total}) + \\
 & \alpha 2 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda no Núcleo} - \text{Norma Perda no Núcleo}))] + \\
 & \alpha 3 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda Total} - \text{Norma Perda Total}))] + \\
 & \alpha 4 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Corrente de Exitação} - \text{Norma Corrente de Exitação}))] + \\
 & \alpha 5 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Norma Tensão de Curto circuito} - \text{Tensão de Curto circuito}))]\}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Sendo:

$$\alpha 1 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc}) + (\text{Custo_Total-NCusto})) / (\text{Custo_Total});$$

$$\alpha 2 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{Wfe-NWfe});$$

$$\alpha 3 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{WT-NWT});$$

$$\alpha 4 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{Io-NIo});$$

$$\alpha 5 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{NVcc-Vcc});$$

i = o indivíduo avaliado.

Existem vários critérios de parada do algoritmo: podem-se limitar valores que tem que ser alcançados, desde que se tenha essa possibilidade, ou então estabelecer um número máximo de gerações que garanta uma das melhores soluções. Na implementação desse algoritmo, como não se considera conhecido o custo mínimo possível, a implementação utiliza o número de gerações como critério de parada. Ao utilizar 1000 gerações observa-se que não há mudanças significativas no valor da função de avaliação do melhor indivíduo, apresentando a solução escolhida.

O pseudocódigo básico do Algoritmo Genético é apresentado na Figura 5.2, que representa as etapas do código de programação do GA.

Na seção seguinte apresentam-se os resultados das implementações feitas no MATLAB® utilizando um computador Intel Pentium Dual CPU 1,87GHz e 2 GB de RAM.

Pseudocódigo Básico de um Algoritmo Genético

```

Algoritmo GA {
  Determina o número de gerações, Indivíduos, Taxa de Mutação // limite de gerações e taxa de mutação
  Gera aleatoriamente a população inicial de Indivíduos // inicia uma população de n indivíduos
  Repita até (Geração = Especificada) // teste critério (numero de gerações)
  { g := g+1; // contador
    Cálculos dos Transformadores // realiza o cálculo do transformador
    Avaliação (função de fitness) // realiza cálculo da Avaliação do Trafo
    Separa para o Elitismo o melhor Indivíduo // mantém o melhor
    Seleção dos Pais // melhores indivíduos possíveis pais
    Recombinação // Crossover
    Mutação // variação de 1 bit ou gene
    Nova Geração // Nova população
  }
  Solução // Indivíduo escolhido
}

```

Figura 5.2 – Pseudocódigo GA implementado

5.3 Exemplo de Resultados Obtidos

Ao realizar o projeto de transformador, a minimização dos custos é uma preocupação do fabricante para poder vender um produto competitivo com o mercado e obter mais lucro. No intuito de minimizar os custos, ou seja, uso de menos matéria-prima, o transformador acaba acarretando em maiores perdas de energia ao estar em operação, seja em carga ou a vazio. Em contraponto, o cliente quer um transformador que tenha as menores perdas possíveis, pois assim ele estará economizando ao longo da vida útil do equipamento. Para resolver esses tipos de problemas a norma (NBR 5440, 1999) regulamenta as perdas máximas permitidas, satisfazendo, assim, o cliente no que diz respeito à viabilidade econômica.

O fabricante busca então atender à Norma, e em casos mais especiais - quando solicitado - a limites de perdas exigidas pelo cliente. Entretanto, há uma relação direta dos custos com as perdas: quanto menores forem as perdas mais caro o transformador fica. Torna-se, assim, interessante que o fabricante encontre o melhor transformador que atenda as normas e que tenha um menor custo.

Projetos utilizando GAs são apresentados nas subseções seguintes e comparados com os implementados no Ambiente de Projeto Convencional (APROC) descrito no Capítulo 3, que é feito de maneira convencional considerando parâmetros do fabricante.

5.3.1 Minimização dos Custos com Restrições Imposta pela Norma

A função de *fitness* é a responsável pela avaliação de cada indivíduo da população de uma dada geração e, dependendo do que se deseja, pode-se implementar funções de *fitness* diferentes. Na utilizada leva em consideração o custo do transformador, e se valores estabelecidos por normas estão adequados, quanto melhor (maior) o valor da função de avaliação, melhor será a solução.

Abaixo, na Figura 5.3, apresenta-se o gráfico de um exemplo da evolução das médias das avaliações e a evolução da avaliação do melhor indivíduo ao longo das 1000 gerações. Observe que na geração 1000 não há mais minimização da função de avaliação do melhor indivíduo. Os parâmetros deste melhor indivíduo são considerados como os valores adotados no projeto do transformador.

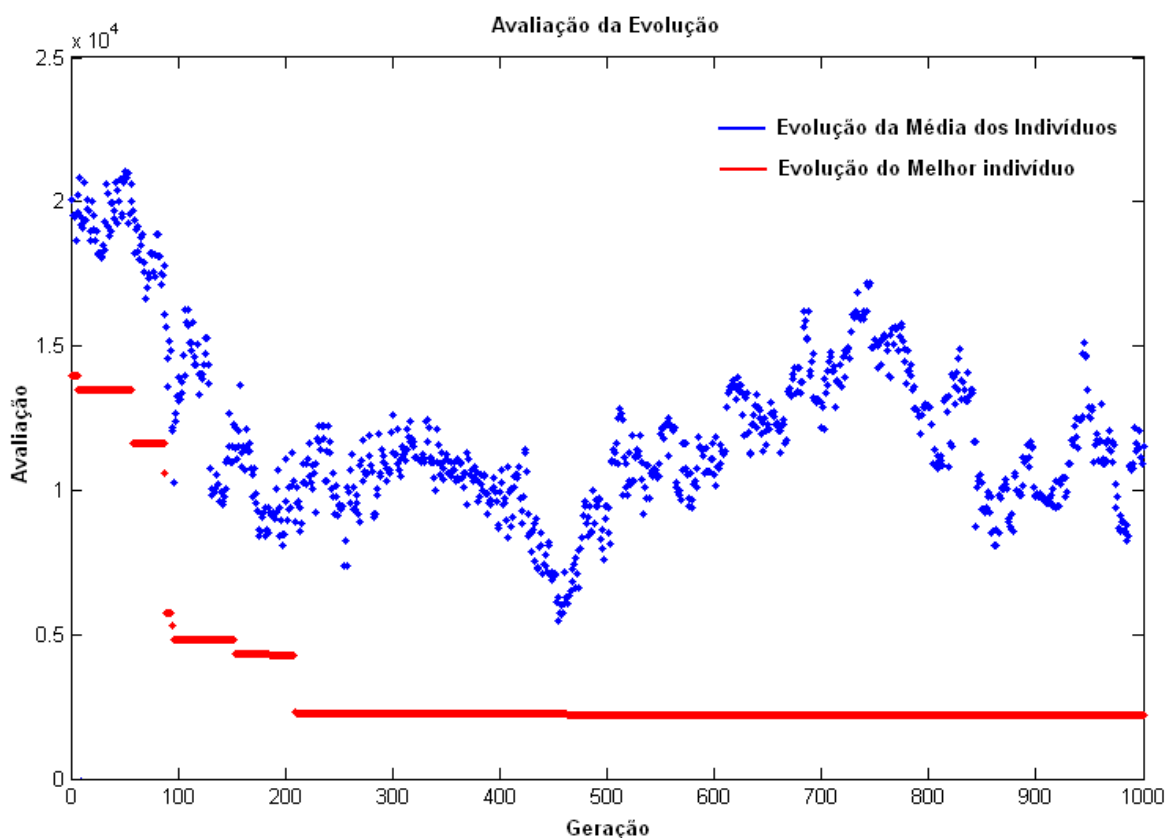


Figura 5.3 – Evolução da avaliação da função de *fitness*

Exemplos de projetos de transformadores de tensão de saída de 220 V e 380 V utilizando Algoritmos Genéticos são apresentados nas tabelas (5.1) e (5.2).

Tabela 5.1 - Transformador trifásico com tensão de saída 220V (Modelo GA).

DADOS DE PROJETO – 220 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	220	220	220	220	220	220
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,788	1,798	1,796	1,765	1,738	1,7854
d_BT	2,735	2,858	2,982	2,824	3,004	3,037
d_AT	2,223	2,798	2,638	2,773	2,613	2,772
EF	7	7	7	7	7	7
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	80	94	104	118	130	138
DiBT	83	97	107	121	133	141
DeBT	107	123	147	159	169	177
DiAT	120	136	160	172	182	190
DeAT	168	180	232	232	241	246
SF_BT	14,36	27,53	39,64	69,71	98,54	129,64
SF_AT	0,163	0,259	0,412	0,653	1,040	1,307
NE_BT	64	45	37	29	24	21
NE_AT	6954	4889	4020	3151	2608	2282
Dados de Material						
Peso_BT	7,34	11,43	15,61	23,74	29,87	36,30
Peso_AT	13,69	16,78	27,23	34,88	48,22	54,53
Peso_Fe	41,66	64,55	84,88	120,15	162,02	189,45
Dados Normas						
Wcu	330	574	804	1163	1584	1911
Wfe	96	150	194	286	388	479
WT	426	724	998	1449	1972	2390
Vcc	3,56	3,62	3,87	3,66	3,70	3,58
Io	4,00	3,34	3,27	2,82	2,74	2,58
Custo R\$						
	779,8	1116,7	1589,7	2210,8	2957,6	3450,4

Tabela 5.2 - Transformador trifásico com tensão de saída 380V (Modelo GA).

DADOS DE PROJETO – 380 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	380	380	380	380	380	380
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,797	1,792	1,783	1,768	1,760	1,796
d_BT	2,814	2,999	2,639	3,297	3,164	2,609
d_AT	2,223	2,798	2,962	2,773	2,928	2,194
EF	7	7	8	9	9	8
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	80	94	104	118	130	140
DiBT	83	97	107	121	133	143
DeBT	105	117	139	163	167	169
DiAT	118	130	152	176	180	182
DeAT	156	162	194	248	232	226
SF_BT	8,117	15,21	25,90	34,58	54,05	87,52
SF_AT	0,163	0,259	0,367	0,653	0,928	1,651
NE_BT	110	78	64	50	41	35
NE_AT	6919	4906	4026	3145	2579	2202
Dados de Material						
Peso_BT	7,02	10,64	17,10	20,58	27,87	40,01
Peso_AT	12,96	15,56	21,44	36,54	41,35	62,20
Peso_Fe	42,98	67,89	85,42	120,37	159,90	220,86
Dados Normas						
Wcu	339	582	794	1163	1541	1937
Wfe	89	149	195	284	396	506
WT	428	731	989	1447	1937	2444
Vcc	3,69	3,51	3,55	3,88	3,54	3,61
Io	4,08	3,31	3,14	2,69	2,66	2,58
Custo R\$	767,6	1098,9	1506,5	2175,4	2751,0	3941,1

A análise dos projetos realizados utilizando GA será realizada através da comparação com os resultados encontrados pelo APROC, tabelas (3.1) e (3.2) levando em consideração as perdas totais e o custo da parte ativa do transformador.

As tabelas de resultados apresentam, além dos custos e perdas do transformador, dados de dimensionamento, peso do material utilizado, bem como o fio utilizado.

Pode-se verificar, analisando as tabelas, que quanto maiores forem as perdas menor será o custo do transformador, conforme citado na seção anterior.

A perda total (WT) será a gasto que o transformador terá para seu funcionamento, assim, apresentam-se tabelas que comparam os custos de fabricação da parte ativa e perdas do transformador utilizando metodologias diferentes para encontrar a melhor solução do transformador.

Os custos e as perdas encontradas para o mesmo projeto de transformador, utilizando o APROC e GA, são apresentados nas tabela (5.3) e (5.4). Seguindo limites de perdas da norma.

*Tabela 5.3 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios (220V)
(Limite de perdas - NBR-5440)*

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 220 V)					
kVA	Perda Total NORMA	Perda Total APROC	Perda Total GA	Custo APROC (R\$)	Custo GA1 (R\$)
15	440	423	426	853,4	779,8
30	740	727	724	1166,6	1116,7
45	1000	1013	998	1592,9	1589,7
75	1470	1463	1449	2241,4	2210,8
112.5	1990	1979	1972	2990,9	2957,6
150	2450	2444	2390	3936,3	3450,4

*Tabela 5.4 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios (380V)
(Limite de perdas - NBR-5440)*

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 380 V)					
kVA	Perda Total NORMA	Perda Total APROC	Perda Total GA	Custo APROC (R\$)	Custo GA1 (R\$)
15	440	423	428	837,1	767,6
30	740	728	731	1164,8	1098,9
45	1000	960	989	1583,9	1506,5
75	1470	1462	1447	2208,8	2175,4
112.5	1990	1942	1937	2817,2	2751,0
150	2450	2446	2444	3944,9	3941,1

No caso estudado acima, a função de *fitness* considera o valor limite da perda total estabelecido por norma. Observa-se que em todos os casos a metodologia baseada em GA reduziu os custos, no entanto, em alguns casos, as perdas dos projetos APROC foram correspondentes (apesar de estarem todos obedecendo o limite da norma). Exemplo de custos em que GA apresentou perdas maiores são os projetos para 15, 30, 45 kVA. Caso o fabricante buscasse um transformador com perdas menores que a estipulada pela norma, bastaria apenas mudar o limite da norma na função de *fitness*, para os novos valores desejados. Como a perda é inversa ao custo do transformador, o projeto que apresentar menor perda influenciará no aumento do custo final do produto. Na subseção seguinte apresentam-se dados para os quais foram feitos um projeto com limites de perdas 5% a menos que a norma.

5.3.2 Minimização dos Custos com Restrições de Perdas mais severas que a Norma

Com uma perda menor que a norma e com preços competitivos, o fabricante pode agregar isso como uma qualidade de seu produto. O transformador que possui baixa perda terá que utilizar mais matéria-prima, tornando-se mais caro. Utilizando GA, o projetista tem a liberdade de estabelecer como critério de preferência menor perda ou menor custo, e atendendo a norma. Basta considerar na função de *fitness* esses critérios.

Nas tabelas (5.5) e (5.6), apresentam-se os resultados das simulações de projeto de transformador com limites de perda total 5% menor que a norma e logo depois, nas tabelas (5.7) e (5.8), apresenta-se um comparativo das perdas totais e do custo do transformador em que o GA1 considera o limite das perdas, sendo este o estabelecido por norma, e o GA2 o limite das perdas, sendo 5% a menos que a norma.

*Tabela 5.5 - Transformador trifásico com tensão de saída 220V (Modelo GA2).
(Limite da perda total 5% a menos que a norma)*

DADOS DE PROJETO – 220 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	220	220	220	220	220	220
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,788	1,798	1,796	1,784	1,799	1,733
d_BT	2,735	2,858	2,861	2,972	2,692	3,106
d_AT	1,980	2,490	2,348	2,461	2,613	2,458
EF	7	7	7	7	7	7
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	80	94	104	117	128	140
DiBT	83	97	107	120	131	143
DeBT	107	123	145	156	169	173
DiAT	120	136	158	169	182	186
DeAT	170	182	230	235	242	242
SF_BT	14,38	27,54	41,28	66,12	110,02	126,55
SF_AT	0,183	0,291	0,463	0,736	1,040	1,474
NE_BT	64	45	37	29	24	21
NE_AT	6953	4889	4020	3151	2608	2282
Dados de Material						
Peso_BT	7,34	11,43	16,14	22,23	33,11	35,27
Peso_AT	15,48	18,97	30,29	39,29	48,22	60,37
Peso_Fe	41,92	64,91	85,72	120,85	157,14	205,42
Dados Normas						
Wcu	313	541	736	1108	1512	1798
Wfe	97	150	196	288	375	520
WT	410	691	932	1396	1887	2318
Vcc	3,57	3,63	3,55	3,56	3,66	3,59
Io	4,02	3,36	3,30	2,81	2,63	2,83
Custo R\$						
	819,3	1165,5	1672,7	2274,6	2993,3	3674,3

*Tabela 5.6 - Transformador trifásico com tensão de saída 380V (Modelo GA2).
(Limite da perda total 5% a menos que a norma)*

DADOS DE PROJETO – 380 V						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	380	380	380	380	380	380
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,797	1,792	1,783	1,768	1,770	1,801
d_BT	2,375	2,703	2,639	2,907	3,039	2,338
d_AT	2,223	2,490	2,638	2,773	2,613	1,948
EF	7	7	8	9	9	8
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	80	94	104	118	130	139
DiBT	83	97	107	121	133	142
DeBT	107	119	139	165	167	174
DiAT	120	132	152	178	180	187
DeAT	156	168	200	246	236	239
SF_BT	9,54	16,84	25,91	39,32	56,31	97,33
SF_AT	0,163	0,291	0,412	0,653	1,040	1,860
NE_BT	110	78	64	50	41	35
NE_AT	6919	4906	4026	3145	2579	2202
Dados de Material						
Peso_BT	8,41	11,91	17,10	23,51	29,02	45,22
Peso_AT	13,06	17,96	24,48	36,54	46,79	73,16
Peso_Fe	43,52	68,16	86,75	122,02	160,97	214,76
Dados Normas						
Wcu	320	535	751	1107	1433	1799
Wfe	90	149	198	288	398	492
WT	410	684	949	1395	1831	2291
Vcc	3,54	3,59	3,66	3,56	3,60	4,48
Io	4,14	3,31	3,19	2,73	2,68	2,49
Custo R\$						
	805,3	1180,5	1580,8	2255,1	2899,8	4242,5

Verifique que, no comparativo dos projetos obtidos por GA1 e GA2, as perdas diminuem e os custos aumentam. Isso já era esperado, pois como o GA1 já havia minimizado o custo para as perdas estabelecidas por normas, se as perdas forem limitadas a valores ainda menores os custos serão aumentados como pode-se verificar nas tabelas (5.7) e (5.8).

Tabela 5.7 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios dos GAs (220V)

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 220 V)							
kVA	Tensão	Perda Total Limite 1 NORMA	Perda Total Limite 2 (- 5%)	Perda Total GA 1	Perda Total GA 2	Custo GA 1 (R\$)	Custo GA 2 (R\$)
15	220	440	418	426	410	779,8	819,3
30	220	740	703	724	692	1116,7	1165,5
45	220	1000	950	998	932	1589,7	1672,7
75	220	1470	1396,5	1449	1395	2210,8	2274,6
112.5	220	1990	1890,5	1972	1888	2957,6	2993,3
150	220	2450	2327,5	2390	2319	3450,4	3674,3

Tabela 5.8 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios dos GAs (380V)

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 380 V)							
kVA	Tensão	Perda Total Limite 1 NORMA	Perda Total Limite 2 (- 5%)	Perda Total GA 1	Perda Total GA 2	Custo GA 1 (R\$)	Custo GA 2 (R\$)
15	380	440	418	428	410	767,6	805,3
30	380	740	703	731	684	1098,9	1180,5
45	380	1000	950	989	949	1506,5	1580,8
75	380	1470	1396,5	1447	1394	2175,4	2255,1
112.5	380	1990	1890,5	1937	1831	2751,0	2899,8
150	380	2450	2327,5	2444	2291	3941,1	4242,5

Ao analisar os resultados apresentados na tabela (5.7), nota-se que os custos dos transformadores projetados com GA2 obtêm sempre valores maiores que os de GA1. Como previsto acima, isso acontece devido as perdas dos projetos do GA2 serem menores que as do GA1, ou seja, os custos devem ser maiores.

Comparando agora os projetos realizados pela APROC com os de GA2 nota-se que, mesmo estando GA2 com restrições de 5% mais severas que a norma, o Algoritmo Genético encontra

valores melhores de perda e custo que os encontrados nos projetos APROC em metade dos casos estudados. Isso poder ser verificado ao se comparar os dados das tabelas (5.9) e (5.10).

Nos casos em que APROC tem custo menor que em GA2 verificar-se que as perdas APROC são maiores. Como exemplo temos o projeto de 45 kVA em que os custos no APROC e GA 2 são respectivamente, R\$ 1592,9 e R\$ 1672,7, mas, em compensação, no APROC a perda é 1013 W, dado que está acima do estabelecido por norma; na GA2, a perda total é 932 W. Conforme tabela (5.9).

*Tabela 5.9 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios (220V)
(Limite de perdas 5% menor que a norma)*

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 220 V)						
kVA	Perda Total Limite NORMA	Perda Total Limite 2 (- 5%)	Perda Total APROC	Perda Total GA 2	Custo APROC (R\$)	Custo GA 2 (R\$)
15	440	418	423	410	853,4	819,3
30	740	703	727	692	1166,6	1165,5
45	1000	950	1013	932	1592,9	1672,7
75	1470	1396	1463	1395	2241,4	2274,6
112.5	1990	1890	1979	1888	2990,9	2993,3
150	2450	2327	2444	2319	3936,3	3674,3

*Tabela 5.10 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios (380V)
(Limite de perdas 5% menor que a norma)*

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 380 V)						
kVA	Perda Total Limite NORMA	Perda Total Limite 2 (- 5%)	Perda Total APROC	Perda Total GA 2	Custo APROC (R\$)	Custo GA 2 (R\$)
15	440	418	423	410	837,1	805,3
30	740	703	728	684	1164,8	1180,5
45	1000	950	960	949	1583,9	1580,8
75	1470	1396,5	1462	1394	2208,8	2255,1
112.5	1990	1890,5	1942	1831	2817,2	2899,8
150	2450	2327,5	2446	2291	3944,9	4242,5

As subseções 5.3.1 e 5.3.2 enfatizam o custo mínimo e as perdas estabelecidas por norma ou especificam os valores estabelecidos pelo fabricante menores que a norma.

Outras restrições podem ser impostas no projeto a depender da função de *fitness* adotada pelo fabricante. Essa função pode limitar a busca nas normas, abaixo das normas, menor custo ou, até mesmo, limitar o custo e as perdas simultaneamente, teste que é feito na próxima subseção.

5.3.3 Minimização dos Custos com Restrições de Perdas e de Custo Máximo

Quando se deseja incluir um limite para o preço e já existe um limite para as perdas, basta na função de *fitness* acrescentar mais um termo que restrinja o quanto o transformador pode custar. A Equação (5.2) é uma variação da função de *fitness* que adota a Equação (5.1) e inclui um termo que limita o custo.

$$\begin{aligned}
 \text{Avaliação}(i) = & \{ \alpha 1 \cdot (\text{Custo total}) + \\
 & \alpha 2 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda no Núcleo} - \text{Norma Perda no Núcleo}))] + \\
 & \alpha 3 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Perda Total} - \text{Norma Perda Total}))] + \\
 & \alpha 4 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Corrente de Excitação} - \text{Norma Corrente de Excitação}))] + \\
 & \alpha 5 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Norma Tensão de Curto circuito} - \text{Tensão de Curto circuito}))] + \\
 & \alpha 6 \cdot [\text{máximo}(0, (\text{Custo total} - \text{Limite do Custo total}))] \}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Sendo:

$$\alpha 1 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc}) + (\text{Custo_Total} - \text{NCusto})) / (\text{Custo_Total});$$

$$\alpha 2 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{Wfe-NWfe});$$

$$\alpha 3 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{WT-NWT});$$

$$\alpha 4 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{Io-NIo});$$

$$\alpha 5 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc})) / (\text{NVcc-Vcc});$$

$$\alpha 6 = ((\text{Custo_Total}) + (\text{Wfe-NWfe}) + (\text{WT-NWT}) + (\text{Io-NIo}) + (\text{NVcc-Vcc}) + (\text{NCusto} - \text{Custo_Total})) / (\text{Custo_Total} - \text{NCusto});$$

i = o indivíduo avaliado.

O teste foi feito e o resultado foi que o Algoritmo (GA3) encontrou o menor custo e uma menor perda estabelecida. Entretanto, observou-se o problema de que a tensão de curto circuito (Vcc) inviabiliza o projeto. Os resultados são apresentados na tabela (5.11).

Quando se tinha um lado livre (ou perda total ou custo) o Algoritmo na busca de uma melhor avaliação não mudava a tensão de curto-circuito. Verifica-se, assim, que há limites físicos que impedem a otimização de certos projetos se estes tiverem de obedecer a determinadas restrições.

Tabela 5.11 – Resumo comparativo dos resultados dos ensaios dos GA.

(Incluindo limite de perdas e de custos)

RESUMO DOS ENSAIOS DOS TRANSFORMADORES (TENSÃO SAÍDA 220 V)								
kVA	Tensão	Perda Total NORMA	Perda Total Limite WT	Limite Vcc NORMA	Limite Custo	Perda Total GA 3	Custo GA3 (R\$)	Vcc GA3 (R\$)
45	220	1000	950	3,5	1592,9	940	1427,7	1,64
75	220	1470	1396	3,5	2241,4	1393	2119,3	2,30
30	380	740	703	3,5	1164,8	702	1147,0	2,20
75	380	1470	1396	3,5	2208,8	1348	1994,6	1,65

5.4 Comentários Finais

Durante a busca da melhor solução o GA trabalha com uma quantidade de combinações que, para o projetista, seria de grande dificuldade se tivesse de trabalhar empiricamente, principalmente se ele não tiver muita experiência em qual parâmetro mudar. Na metodologia proposta para o projeto de transformador busca-se a combinação adequada de três valores (B, d_{AT} e d_{BT}). Cada um pode influenciar no resultado final, ou seja, se a primeira variável estiver convergindo para um ponto melhor, a segunda variável pode estar mudando para um ponto ruim. Assim, a primeira variável pode encontrar outro ponto diferente do qual ela convergia para ser o melhor e ainda tem a influência da terceira variável.

A redução do custo do transformador é inversamente proporcional às perdas: quanto menor o custo, maiores as perdas; desta forma, a busca pelo melhor projeto consiste em encontrar uma perda limite para encontrar o melhor custo. Dependendo do que o fabricante deseja, ele pode fixar o custo e verificar a perda que é gerada. A função de *fitness* é quem vai fazer as limitações na busca, podendo gerar qualquer tipo de restrição. Se conseguir reduzir 5% das perdas em todos os transformadores espalhados pela cidade, à concessionária fornecedora de energia tem um lucro que deve ser analisado, pois pode compensar o gasto a mais ao adquirir o transformador. Além do mais tem as contribuições ao meio ambiente, posto que este estará sendo beneficiado ao ter um transformador mais eficiente e que consome pouca energia.

Com a possibilidade da função de *fitness*, pode-se fazer as restrições desejadas ao limitar o custo e as perdas abaixo dos limites; a opção do GA foi fugir da norma em outro ponto, como na

Tensão de curto-circuito (V_{cc}), que tem que ser maior ou igual a 3,5 e foram observados valores menores, não se tornando uma opção de projeto. O correto é deixar em aberto para o GA minimizar as perdas e os custos, fixando apenas os limites estabelecidos por norma ou modificando seus valores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Existem diversas técnicas de desenvolvimento do projeto de transformadores, cada fabricante segue sua própria forma de calcular, buscando seguir os limites estabelecidos por normas a um custo economicamente atrativo. A metodologia de projeto de cada fabricante, em parte, advém de conhecimento empírico adquirido em projetos anteriores. Observa-se, com isso, o potencial de melhoria das metodologias de projeto tradicional ao se incorporar ferramentas de busca e otimização que permitem a obtenção de transformadores com custos ainda mais reduzidos, sem comprometimento da eficiência.

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

Para fins comparativos, foram adotados dois modelos para encontrar os parâmetros iniciais do projeto. O primeiro foi calculado com o Ambiente de Projeto Convencional (APROC), software desenvolvido neste trabalho, a qual entra com os valores iniciais fornecidos pelo fabricante, buscando encontrar o custo da parte ativa do transformador segundo um projeto tradicional. O segundo, utilizando Algoritmos Genéticos (GA), deixou o ajuste dos parâmetros iniciais para o GA que, a partir de uma função minimizada, gerou uma resposta que satisfaz todas as restrições estabelecidas por norma a um baixo custo.

Ao comparar os valores de custo e perda total do transformador, obtidos nos dois modelos, observou-se que, em todos os casos simulados, o GA encontrou uma solução mais satisfatória em relação ao custo e que atendeu a todas as limitações impostas por normas. Entretanto, em alguns casos, o APROC apresentou menores perdas. Isso implica dizer que os parâmetros apresentados no modelo APROC não são economicamente os melhores para solução do transformador. Através de mudanças na função de avaliação do GA verificou-se que, ainda com um custo menor que APROC, é possível tornar as perdas dos projetos GA ainda menores. Assim, a metodologia proposta permite que ocorram ajustes se a ênfase do projeto for a redução dos custos ou a redução das perdas.

No entanto, houve limitações físicas na melhoria que os projetos baseados em GA alcançaram (ver Subseção 5.3.3). Assim, desde que o projetista/usuário saiba escrever a função de *fitness*, correta, impondo limites aceitáveis, a aplicação de GA é bem sucedida.

O trabalho demonstrou-se eficiente, visto as tabelas apresentadas com custos menores que os apresentados nas tabelas de referência. Além disso, constitui-se um trabalho aplicável e que merece ensaios para analisar sua eficiência junto à empresa fabricante de transformadores que deseja inovação em seu método de elaboração dos projetos.

6.1 Trabalhos Futuros

O trabalho restringiu-se ao cálculo da Parte Ativa do transformador envolvendo custo de fabricação, entretanto os resultados obtidos motivam o desdobramento em trabalhos futuros como:

- 1) O GA pode ser aplicado no ajuste de variáveis de outras etapas do projeto de transformador, como as que influenciam o cálculo da parte mecânica do transformador.
- 2) Existem outras técnicas metaheurísticas de busca que também poderiam ser utilizadas para a solução do projeto de Transformador e que poderiam ser mais eficientes, tomando como exemplo a PSO (Otimização por enxame de partículas), (KENNEDY, J.; EBERHART, 2001), podendo ser feita uma comparação mais eficiente.
- 3) Outro trabalho que demonstra ser promissor é o uso de RNAs (Redes Neurais Artificiais) para estimar as perdas no projeto de transformador. Com a Rede Neural há a possibilidade de uma melhor estimativa destas perdas a partir do treinamento com valores de perdas medidas em projetos realizados e ensaiados. As estimativas geradas por RNA, ao se basearem em dados reais, devem apresentar valores melhores que as equações empíricas normalmente utilizadas. Tomando como exemplo o trabalho intitulado *Prediction of Core Losses on a Three-Phase Transformer using Neural Networks* (ANEXO II), realizado durante os estudos desta dissertação e apresentado no Simpósio Internacional sobre Circuitos e Sistemas (ISCAS), RNAs podem fornecer melhores estimativas da perda no núcleo do transformador. Essas perdas estimadas podem ser utilizadas no projeto do transformador, permitindo projeto com perdas mais próximas daquelas observadas no equipamento montado.

REFERÊNCIAS

- ABENDI. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. 193ª Edição Ano 9 - 2ª quinzena de Janeiro de 2010. Disponível em < http://www.abende.org.br/boletins/boletim_193.html > Acessado em 10 de jul. de 2011
- ACESITA. Catálogo de vendas: Electrical Steels. 1ª Edição, Timóteo, Brasil, 2005. Disponível em <<http://www.acesita.com.br>>. Acesso em: 25 de jul. 2011.
- AGUIAR, F.J.P. “Influência da não conformidade senoidal da tensão de alimentação nas perdas de magnetização em transformadores de potência”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2005, 152p.
- AMOIRALIS, E.I.; GEORGILAKIS, P.S.; LITSOS, E. “Methodology for the optimum design of power transformers using minimum number of input parameters”, in Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM 2006), pp. 1-6, 2006.
- AMOIRALIS, E.I.; TSILI, M.A.; GEORGILAKIS, P.S. “The state of the art in engineering methods for transformer design and optimization: a survey”, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol. 10, no. 5, pp. 1149-1158, May 2008.
- ARCELOR MITTAL INOX BRASIL. Catálogo de vendas: Electrical Steels, 2ª Edição, Timóteo, Brasil, 2009. Disponível em <<http://www.arcelormittalInoxbrasil.com.br>>. Acesso em: 20 de jun. 2011.
- BATISTELA, N.J.; CARLSON, R.; SADOWSKI, N.; LEITE, J.V. "Caracterização magnética de lâminas de aço silício e avaliação das perdas no ferro sob vários regimes de indução", Revista Controle & Automação, vol.13, no. 2, pp. 156-164, Maio/Agosto 2002.
- CEMEC - CONSTRUÇÕES ELETROMECAÂNICAS S/A. Catálogo de vendas: Transformador trifásico de distribuição, Ceará, Brasil, 2010. Disponível em <<http://www.cemec.com.br>>. Acesso em: 11 de jun. 2011.
- DOULAMIS, N.D.; DOULAMIS, A.D.; GEORGILAKIS, P.S.; KOLLIAS, S.D.; HATZIARGYRIOU, N.D. “A synergetic neural network-genetic scheme for optimal transformer construction”, Integrated Computer-Aided Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 37-56, 2002.

- ELEFTHERIOS I.A.; MARINA A.T.; ANTONIOS G. K. “Transformer Design and Optimization: A Literature Survey”, Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp 1999-2024, october 2009.
- FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S.D. Electric Machinery, McGraw-Hill, 6th Edition, New York, USA, 2006.
- FLANAGAN, W.M. Handbook of Transformer: Design & Applications, McGraw-Hill, 2th Edition, New York, USA, 1992.
- GEORGILAKIS, P.S. “Recursive genetic algorithm-finite element method technique for the solution of transformer manufacturing cost minimisation problem”, IET Electric Power Applications, vol. 3, no. 6, pp. 514-519, 2009a.
- GEORGILAKIS, P.S. Spotlight on Modern Transformer Design, Springer, London,UK, 2009b.
- GEORGILAKIS, P.S.; AMOIRALIS, E.I. “Spotlight on transformer design”, IEEE Power and Energy, vol. 5, no. 1, pp. 40-50, January/February 2007a.
- GEORGILAKIS, P.S.; DOULAMIS, N.D.; DOULAMIS, A.D.; HATZIARGYRIOU, N.D.; KOLLIAS, S.D. “A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm - neural network approach”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 31, no. 1, pp. 16-34, February 2001.
- GEORGILAKIS, P.S.; HATZIARGYRIOU, N.D.; DOULAMIS, N.D.; DOULAMIS, A.D.; KOLLIAS, S.D. “Prediction of iron losses of wound core distribution transformers based on artificial neural networks”, Neurocomputing, vol. 23, no. 1-3, pp. 15-29, December 1998.
- GEORGILAKIS, P.S.; TSILI, M.A.; SOUFLARIS, A.T. “A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 181, no. 1-3, pp. 260-266, January 2007b.
- GEROMEL, L.H. “Aplicação de sistemas inteligentes em projetos de transformadores de potência”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003, 144p.
- GOLDBERG D.E., Milman K., & Tidd C., “Genetic Algorithms: A Bibliography”, Department of General Engineering, University of Ollinois, report nº 92008, july, 1992

- HARLOW, J. H. Electric power Transformer Engineering, CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 2004.
- HATZIARGYRIOU, N.; GEORGILAKIS, P.; SPILIOPOULOS, D.; BAKOPOULOS, J. "Quality improvement of individual cores of distribution transformers using decision trees", International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, vol. 6, no. 3, pp. 141-146, September 1998.
- HAYKIN, S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Pearson, 2th Edition, Delhi, India, 1999.
- JORNAL O GLOBO. Transformadores terão selo de eficiência a partir de junho. Jornal O Globo Online, Rio de Janeiro, maio 2009. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/mat/2009/05/29/transformadores-terao-selo-de-eficiencia-energetica-partir-de-junho-756100706.asp>>. Acesso em: 27 jul. 2011.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Swarm intelligence, Morgan Kaufmann, 1th Edition, 2001.
- KEFALAS, T.D.; GEORGILAKIS, P.S.; KLADAS, A.G.; SOUFLARIS, A.T.; PAPARIGAS, D.G. "Multiple grade lamination wound core: a novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 6, pp. 1082-1085, June 2008.
- KEFALAS, T.D.; TSILI, M.A.; KLADAS, A.G.; GEORGILAKIS, P.S.; SOUFLARIS, A.T.; PAPARIGAS, D.G. "Power transformer no load loss optimization considering for manufacturing process effects, in Proc. 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC), 2006.
- KOSOW, I. L. Máquinas Elétricas e Transformadores, Globo, 15ª Edição, São Paulo, Brasil, 2005.
- KULKARNI, S.V.; KHAPARDE, S.A. Transformer Engineering: Desing and Practice, Marcel Dekker, New York, USA, 2004.
- LINDEN, R. Algoritmos Genéticos, 1ª Edição, Ed. Brasport, 2008.
- LÓPEZ, F.C.; DURÁN, J.P.; VIVANCOS, M.S. Transformadores, Edicions UPC, Catalunya, ES, 1998.
- MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 3ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

- MAN K.F., Tang K.S. & Kwong S., “Genetics Algorithms: Concepts and Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, nº5, October, 1996.
- MARTIGNONI, A. Transformadores. Globo, 8ª Edição, São Paulo, Brasil, 1991.
- MARTIN, J.C. Calculo optimo de transformadores, Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, España, 1978.
- MCLYMAN, C.W.T. Transformer and Inductor Design Handbook, Marcel Dekker, 3th Edition, New York, USA, 2004.
- MIRANDA, M, Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicação, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- MITCHELL, M. An Introduction to Genetic Algorithms. Massachusets: MIT Press, 1996.
- NBR 5440 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS): Transformadores para redes aéreas de distribuição – Padronização. Rio de Janeiro, 1999.
- OLIVEIRA, J.C. Transformadores: Teoria e Ensaios, Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 1984.
- POLTOSI, L.A.C.; LEMKE, N. "Aplicação de Algoritmos Genéticos no projeto de transformadores", Revista Liberato, vol. 10, no.14, pp.167-174, Julho/Dezembro 2009.
- SARAIVA, E; MARCELO, L.R., CAMACHO,J.R. “Modelagem de um Transformador de 15 kVA no FEMM, e metodologia para calculo dos entreferros, VIII Conferencia Internacional de Aplicação Industriais, Agosto 2008.
- SILVA Jr., P.A. “Bancada para Ensaios de Materiais Ferromagnéticos em Chapa Única sob Campos Rotacionais”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2007, 109p.
- SOUZA, A.N.; AMARAL, F.C.L.; PORTO, L.G.C.; MANFRIATO, J.W. de S.; SALGADO, M.H.; ZAGO, M.G. “Aplicação de redes neurais artificiais para melhorar a eficiência de transformadores de distribuição relacionada ao processo de fabricação”, in XI SIMPEP, pp.1-10, 2004.
- SOUZA, K.N.; CASTRO, T.N.; PEREIRA, T.M.; PONTES, R.S.T.; BRAGA, A.P.S. “Prediction of Core Losses on a Three-Phase Transformer using Neural Networks”, in ISCAS, pp.1105-1108, 2011.
- TARGOSZ R.; TOPALIS, F. V. “Eficiência energética de transformadores de distribuição”, Eletricidade Moderna, vol. 37, no. 422, pp.106-113, Maio 2009.

- TARGOSZ, R.(ED.); BELMANS, R.; DECLERCQ, J.; KEULENAER, H. D.; FURUYA, K.; KARMARKAR, M.; MARTINEZ, M.; MCDERMOTT, M.; PINKIEWICZ, I. Leonardo Energy Transformers: The Potencial for Global Energy Savings from High Efficiency Distribution Transformers. European Copper Institute, Brussels, Belgium, 2005.
- TSILI, M.A.; KLADAS, A.G.; GEORGILAKIS, P.S.; SOUFLARIS, A.T.; PAPARIGAS, D.G. “Wound core power transformer design: classical methodology and advanced magnetic field analysis techniques”, in Proc. Advanced Research Workshop on Modern Transformers (ARWTR 2004), pp. 23-28, 2004.
- VECCHIO, R.M.; POULIN, B.; FEGHALI, P.T.; SHAH, D.M.; AHUJA, R. Transformer Design Principles, CRC Press, Boca Raton, USA, 2002.
- WINDERS Jr., J. Power Transformers: Principles and Applications, Marcel Dekker, New York, USA, 2002.

ANEXO I

EXEMPLO DE PROJETO DA FABRICANTE CEMEC

Tabela A1.1 - Transformador trifásico com tensão de saída 220 (Modelo CEMEC).

DADOS DE PROJETO - 220						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	220	220	220	220	220	220
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,71	1,736	1,766	1,763	1,79	1,806
d_BT	2,297	2,702	3,085	2,823	2,976	3,436
d_AT	2,809	2,842	2,671	2,787	2,613	2,196
EF	7	7	7	7	7	7
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	79	92	100	114	124	132
DiBT	81	94	102	116	127	135
DeBT	103	118	132	150	162	168
DiAT	116	131	145	163	175	181
DeAT	159	178	195	221	236	243
SF_BT	17,14	29,14	38,28	69,73	99,19	114,58
SF_AT	0,128	0,259	0,412	0,653	1,04	1,651
NE_BT	69	49	40	30	25	22
NE_AT	7497	5324	4346	3259	2716	2390
Dados Custo						
Peso_BT	9,4	13,2	15,6	24,5	31,9	34,4
Peso_AT	11	17,4	24,5	32,9	47,1	68,6
Peso_Fe	41,4	64,1	83,2	123,5	160,1	197,1
Dados Normas						
Wcu	332	577	799	1154	1576	1917
Wfe	96	147	194	283	384	490
WT	428	724	993	1437	1960	2407
Vcc	3,53	3,64	3,61	3,6	3,53	3,51
Io	4,36	3,58	3,44	2,84	2,67	2,58

Tabela A1.2 - Transformador trifásico com tensão de saída 380 (Modelo CEMEC).

DADOS DE PROJETO - 380						
Dados de entrada						
kVA	15	30	45	75	112,5	150
AT	13800	13800	13800	13800	13800	13800
BT	380	380	380	380	380	380
f	60	60	60	60	60	60
Ndeg	4	5	5	6	6	6
B	1,698	1,728	1,769	1,757	1,797	1,806
d_BT	2,389	2,689	3,159	3,3	3,54	2,614
d_AT	2,809	2,842	2,671	2,787	2,613	2,766
EF	7	7	8	9	9	8
Dados de Dimensionamento						
DN_mm	79	92	100	114	124	132
DiBT	81	94	102	116	127	135
DeBT	103	118	130	148	157	174
DiAT	116	131	144	161	173	188
DeAT	159	178	194	219	234	250
SF_BT	9,54	16,95	21,64	34,53	48,28	87,17
SF_AT	0,128	0,259	0,412	0,653	1,04	1,307
NE_BT	120	85	69	52	43	38
NE_AT	7548	5347	4340	3271	2705	2390
Dados Custo						
Peso_BT	8,9	13,2	14,8	20,4	25,6	44,7
Peso_AT	11,1	17,5	24,3	32,7	46,5	55,8
Peso_Fe	41,4	64,1	83,2	123,5	160,1	197,1
Dados Normas						
Wcu	334	575	785	1172	1565	1910
Wfe	94	145	195	280	390	490
WT	428	720	980	1452	1955	2400
Vcc	3,56	3,6	3,54	3,59	3,53	3,56
Io	4,12	3,45	3,48	2,76	2,78	2,58

ANEXO II

ARTIGO SOBRE ESTIMAÇÃO DAS PERDAS DO TRANSFORMADOR

ANEXO III**TABELA DE FIOS MAGNÉTICOS - AWG**

Tabela de fios magnéticos – AWG

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	Kg por Km	Resistência (ohms/Km)	Capacidade (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
31	0,2268	0,040	39,8	0,36	425,0	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	56,0	0,23	669,3	0,072
34	0,1601	0,0201	56,0	0,18	845,8	0,057
35	0,1426	0,0159	62,3	0,14	1069,0	0,045
36	0,1270	0,0127	69,0	0,10	1338,0	0,036
37	0,1131	0,0100	78,0	0,089	1700,0	0,028
38	0,1007	0,0079	82,3	0,070	2152,0	0,022
39	0,0897	0,0063	97,5	0,056	2696,0	0,017
40	0,0799	0,0050	111,0	0,044	3400,0	0,014
41	0,0711	0,0040	126,8	0,035	4250,0	0,011
42	0,0633	0,0032	138,9	0,028	5312,0	0,009
43	0,0564	0,0025	156,4	0,022	6800,0	0,007
44	0,0503	0,0020	169,7	0,018	8500,0	0,005