

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# ANÁLISE TÉCNICA DE TRANSFORMADORES PARA REDES DE MÉDIA TENSÃO

ROGÉRIO SALUSTIANO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez

*Universidade Federal de Itajubá*

Itajubá, 29 de Março de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Rogério Salustiano**

**Análise Técnica de Transformadores  
para Redes de Média Tensão**

**Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Título de Mestre em Ciências em  
Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos  
de Potência**

**Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira  
Martinez**

**Março de 2012  
Itajubá – MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

S181a

Salustiano, Rogério

Análise técnica de transformadores para redes de média tensão  
/ Rogério Salustiano. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.

101 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luís Barreira Martinez.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Projeto de transformadores. 2. Cobre. 3. Alumínio. I. Mar\_  
tinez, Manuel Luís Barreira, orient. II. Universidade Federal de  
Itajubá. III. Título.

## DEDICATÓRIA

*Às meus pais, Devanir e Leonina.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Devanir e Leonina, por me apoiarem nos meus estudos. Pelas abdições realizadas por eles para me garantir o estudo. Pelo carinho e compreensão nos momentos difíceis. E pelo amor que sentimos uns pelos outros que torna nossa família unida.

Ao Professor Martinez pela confiança postada em meu trabalho pela oportunidade de crescimento, aprendizado, realização profissional e pessoal.

Aos meus colegas de trabalho e pesquisa por sempre me incentivarem na busca do crescimento, sendo exemplos de competência, garra, determinação e disciplina.

À Suzana pela paciência e compreensão pelos momentos de ausências da minha parte.

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo discutir pontos sobre a avaliação técnico-econômica de transformadores eficientes. Para uma dada especificação existem podem existir vários projetos de transformadores capazes de atendê-la, porém todos com as mais diferentes características construtivas possíveis. Para realizar um bom projeto é necessário o conhecimento das características do núcleo de um transformador, ou seja, as formas construtivas, características do material utilizado, os cuidados que se deve tomar durante o projeto do núcleo e a teoria de cálculo. Da mesma forma, os enrolamentos, que são a parte mais importante de um transformador por determinarem sua vida útil, têm suas características elétricas e mecânicas discutidas.

Uma parte da energia elétrica gerada é perdida, principalmente, no sistema de distribuição, sendo o transformador responsável por partes destas perdas, pois parte da energia transformada é dissipada pelos enrolamentos e núcleo. As possíveis perdas do transformador que possa ser calculado pelo equacionamento são discutidas e equacionadas assim como características exigidas por normas como impedância e corrente de excitação.

Como a utilização do alumínio em substituição ao cobre e ligas de metal amorfo em substituição ao aço silício em transformadores vem se expandindo, surge a necessidade em obter informações importantes para a tomada de decisão na escolha do material a ser empregado no transformador. A análise destes materiais objetiva criar conhecimento para projetar transformadores que possam reduzir custos devido ao aumento da eficiência acabem não correspondendo às expectativas por uma escolha equivocada de matéria prima ou método de cálculo.

**Palavras-chave:** Eficiência, projeto de transformadores, cobre, alumínio, aço silício, aço amorfo.

## ABSTRACT

The objective of this dissertation is to discuss the points on the technical-economic evaluation of efficient transformers. There are several projects that can meet a specification, but these projects can have different possible constructive characteristics. It is necessary to know core constructive types, used material characteristics, precautions that should be taken during core and winding designs and the way to design good equipments. In that way, the windings are the most important transformer part, because they determine transformer lifetime. The electrical and mechanical winding characteristics will be discussed for that reason too.

Some amount of generated electrical energy is lost mainly in distribution system. The transformer is responsible for a good part of that loss that is dissipated by the windings and core. The possible transformer losses can be calculated and determined as will be shown as well as the features required by standards such as impedance and excitation current.

There is need to obtain important information to choose material that will be used in the transformer. That because the use of aluminum instead of copper and amorphous metal alloy instead of silicon steel on transformers has been expanded some years to now. These material analysis looks for create knowledge about the possible choices to reduce costs by the most correct decision.

**Keywords:** Efficiency, transformer design, copper, aluminum, silicon steel, amorphous steel.

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais .....	2
1.2	Relevância do Tema .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.4	Estrutura.....	3
2.	Conceitos.....	6
2.1	Considerações Iniciais .....	7
2.2	Rendimento.....	8
2.3	Eficiência.....	10
2.4	Descritivo de Perda sobre Carga .....	11
2.5	Análise Econômica das Perdas .....	13
3.	Projeto do Núcleo.....	16
3.1	Considerações Iniciais .....	17
3.2	O Núcleo .....	17
3.3	Materiais Utilizados .....	21
3.4	Construção de Núcleos.....	23
3.5	Processo de Cálculo .....	30
3.5.1	Indução Magnética da Coluna do Núcleo .....	30
3.5.2	Seção da Coluna.....	30
3.5.3	Seção Líquida da Culatra.....	31
3.5.4	Indução da Culatra.....	32
3.5.5	Fluxo Magnético.....	32
3.5.6	Seção Bruta do Núcleo .....	32
3.5.7	Seção Circular Circunscrita.....	33
3.5.8	Diâmetro.....	33
3.5.9	Massa das Colunas e Culatras .....	34
3.5.10	Massa Total do Núcleo .....	34
4.	Projeto dos Enrolamentos .....	35
4.1	Considerações Iniciais .....	36
4.2	Tipos de Bobinas .....	36
4.3	O Condutor.....	38
4.4	Montagem .....	40
4.5	Cálculo do Enrolamento de Baixa Tensão.....	41

4.6	Cálculo do Enrolamento de Alta Tensão.....	45
4.7	Massa Total dos Enrolamentos.....	48
5.	Cálculo das Perdas .....	49
5.1	Considerações Iniciais .....	50
5.2	Perdas Magnéticas .....	50
5.3	Perdas Foucault.....	51
5.4	Perdas e Corrente de Excitação .....	52
5.5	Cálculo da Corrente de Excitação.....	54
5.6	Cálculo das Perdas nos Condutores.....	56
5.7	Cálculo das Perdas Parasitas nos Condutores.....	59
5.8	Perdas Adicionais Devido ao Fluxo de Dispersão .....	60
5.9	Perdas por Circulação de Corrente em Condutores Paralelos .....	61
5.10	Perdas no Núcleo.....	61
5.11	Perdas Totais do Transformador .....	62
6.	Cálculo das Demais Características.....	63
6.1	Considerações Iniciais .....	64
6.2	Cálculo da Reatância de Dispersão .....	64
6.3	Cálculo da Impedância Percentual .....	68
7.	Comparativo da Utilização do Cobre e do Alumínio.....	69
7.1	Considerações Iniciais .....	70
7.2	Características .....	70
7.3	Custo da Matéria Prima .....	72
7.4	Custo Devido à Resistividade dos Materiais.....	74
7.5	Conectividade e Oxidação .....	78
7.6	Curto-Circuito .....	78
7.6.1	Comportamento Térmico Durante Curto-Circuito .....	78
7.6.2	Comportamento Frente a Esforços Radiais no Curto-Circuito.....	81
7.7	Perdas Parasitas.....	82
8.	Diferenças na Utilização do Metal Amorfo no Núcleo .....	83
8.1	Considerações Iniciais .....	84
8.2	Metal Amorfo.....	84
8.3	Dados sobre Utilização .....	86
8.4	Redução das Perdas.....	87
8.5	Tratamento Térmico.....	88
8.6	Diferenças de Projeto.....	89
9.	Conclusões.....	93

9.1 Conclusões .....	94
9.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	96
10. Referências Bibliográficas .....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Curvas de rendimento .....	9
Figura 2-2 – Curvas das perdas .....	9
Figura 2-3 – Perfil de carga de área comercial.....	12
Figura 2-4 – Perfil de carga residencial .....	12
Figura 2-5 – Perfil de carga rural .....	13
Figura 3-1 – Resistividade em função do teor de silício [5].....	17
Figura 3-2 – Curvas de magnetização [25].....	19
Figura 3-3 – Tipos de núcleo [1].....	19
Figura 3-4 – Caminho percorrido pelo fluxo [1] .....	20
Figura 3-5 – Núcleo empilhado.....	20
Figura 3-6 – Núcleo enrolado .....	21
Figura 3-7 – Cortes das chapas em 90° .....	21
Figura 3-8 – Cortes das chapas em 45° .....	22
Figura 3-9 – Trespasseamento das lâminas do transformador .....	22
Figura 3-10 – Detalhe do trespasseamento das lâminas do transformador [31].....	22
Figura 3-11 – Elementos do núcleo [32].....	23
Figura 3-12 – Formatos para seção do núcleo.....	23
Figura 3-13 – Dimensões dos degraus [1].....	24
Figura 3-14 – Relação do número de degraus com a seção preenchida do círculo [3].....	25
Figura 3-15 – Distribuição do fluxo com a presença de entreferro .....	26
Figura 3-16 – Formatos da culatra .....	27
Figura 3-17 – Núcleo finalizado [33].....	29
Figura 3-18 – Gráfico da seção, indução e f.m.m por espira pela potência nominal....	31
Figura 4-1 – Tipos de enrolamentos [1].....	37
Figura 4-2 – Distância para cálculo da cabeceira e distância entre enrolamentos [2] .	43
Figura 4-3 – Gráfico para determinação da altura do calço [2] .....	44
Figura 5-1 – Características magnéticas chapa M5 sentido do grão [1] .....	53
Figura 5-2 – Características magnéticas aço M5 sentido perpendicular ao grão [1]....	54
Figura 5-3 – Nível do óleo no transformador [29].....	56
Figura 5-4 – Fluxo nos condutores [1].....	59
Figura 5-5 – Perdas parasitas .....	60
Figura 5-6 – Perda específica do aço amorfo [27].....	61
Figura 6-1 – Fluxo de dispersão .....	64
Figura 6-2 – Distribuição do fluxo de dispersão [1] .....	65
Figura 6-3 – Gráfico fator de Rogowski [1] .....	66
Figura 6-4 – Distribuição do fluxo no topo do enrolamento [1].....	67
Figura 7-1 – Histórico de cotação de 1998 a 2011 para cobre e alumínio [30].....	72
Figura 7-2 - Histórico de cotação de 2008 a 2010 para cobre e alumínio [30].....	73
Figura 7-3 – Variação da resistividade com a temperatura [1] .....	74
Figura 7-4 – Temperatura do enrolamento para curto-circuito de 4 segundos .....	78
Figura 7-5 – Tempo suportável de curto-circuito .....	80
Figura 7-6 – Esforço radial sobre o enrolamento .....	81
Figura 8-1 – Estrutura cristalina e amorfa .....	85
Figura 8-2 – Características de magnetização do metal amorfo e do aço silício [25] ..	87
Figura 8-3 – Tratamento térmico [19] .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Dimensões do núcleo em função do número de degraus [1] .....	25
Tabela 5-1 – Classe térmica dos materiais isolantes .....	58
Tabela 7-1 – Características físicas dos materiais .....	71
Tabela 8-1 – Cronologia do metal amorfo [11] .....	86
Tabela 8-2 – Comparação do peso entre amorfo e silício [4].....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$A_{fe}$	Secção do núcleo de ferro
$B$	Indução
$B_{max}$	Indução de pico
$B_{ef}$	Indução eficaz
$C_{cul}$	Comprimento da culatra
$D_{núcleo}$	Diâmetro do núcleo
$D_{intmolde}$	Diâmetro interno do molde
$D_{cond1nu}$	Diâmetro do condutor do enrolamento primário nu
$D_{cond1iso}$	Diâmetro do condutor do enrolamento primário isolado
$D_{Int1}$	Diâmetro interno do enrolamento primário
$D_{Ext1}$	Diâmetro externo do enrolamento primário
$D_{Int2}$	Diâmetro interno do enrolamento secundário
$D_{Ext2}$	Diâmetro externo do enrolamento secundário
$Dist_{1-2}$	Distancia de isolamento entre os enrolamentos primário e secundário
$Dist_{bob}$	Distancia de isolamento entre as bobinas
$Dist_{núcleo-molde}$	Distancia de isolamento entre o núcleo e o molde
$Dist_{col}$	Distancia de entre o centro das colunas
$d_1$	Densidade de corrente do primário
$d_2$	Densidade de corrente do secundário
$E_1$	Tensão induzida no primário
$E_2$	Tensão induzida no secundário
$Esp_{molde}$	Espessura do molde
$Esp_{cond2}$	Espessura do condutor do enrolamento secundário
$Esp_2$	Espessura do enrolamento secundário
$f$	Frequência
$f.m.m.$	Força magneto motriz

$F_C$	Fator de carga
$f_p$	Fator de potência da carga
$H$	Intensidade de campo magnético
$H_{janela}$	Altura da janela do núcleo
$H_{calço}$	Altura do calço
$H_{bobina1}$	Altura da bobina do enrolamento primário
$H_{bobina2}$	Altura da bobina do enrolamento secundário
$H_{cabeceira1}$	Altura da cabeceira do enrolamento primário
$H_{cabeceira2}$	Altura da cabeceira do enrolamento secundário
$I_N$	Corrente nominal
$I_0$	Corrente de excitação
$I_m$	Corrente magnetizante
$I_p$	Corrente de perdas no núcleo
$Isol_{cond2}$	Espessura do isolamento do condutor do enrolamento secundário
$Isol_{cam2}$	Espessura do isolamento entre camadas do enrolamento secundário
$K$	Fator de Rogowski
$k_H$	Constante de perda por histerese
$k_F$	Constante de perda por corrente Foucault
$k_u$	Fator de utilização
$k_e$	Fator de empilhamento
$k_t$	Relação de transformação
$k_{cond}$	Fator referente ao material do condutor
$k_{Wfe}$	Coefficiente de perda específica do aço
$k_{VAfe}$	Coefficiente da potência de excitação do aço
$l$	Comprimento circuito magnético
$l$	Comprimento do enrolamento
$l_{esp\ med1}$	Comprimento da espira média do enrolamento primário
$l_{esp\ med2}$	Comprimento da espira média do enrolamento secundário

L	Indutância
$L_{ar_{cond2}}$	Largura do condutor do enrolamento secundário
$L_{janela}$	Largura da janela do núcleo
$M_{fe}$	Massa do núcleo
$M_{cond1}$	Massa do condutor do enrolamento primário
$M_{cond2}$	Massa do condutor do enrolamento secundário
$n_1$	Numero de espiras do primário
$n_2$	Numero de espiras do secundário
$n_f$	Número de fases do transformador
$n_{cam1}$	Número de camadas do primário
$n_{cam2}$	Número de camadas do secundário
$n_{espcam1}$	Número de espiras por camada do primário
$n_{espcam2}$	Número de espiras por camada do secundário
$P_{exc}$	Potência aparente de excitação do núcleo
R%	Resistência percentual
$R_{eq1}$	Resistência equivalente refletida ao primário
$r_{extbob}$	Raio externo da bobina
S	Potência aparente
$S_N$	Potência aparente nominal
$S_0$	Seção circular circunscrita
$S_{cond1}$	Seção do condutor do enrolamento primário
$S_{cond1nu}$	Seção do condutor do enrolamento primário nu
$S_{cond2}$	Seção do condutor do enrolamento secundário
t	Espessura da chapa.
T	Temperatura fictícia para resistividade nula.
$V_1$	Tensão de linha do primário
$V_2$	Tensão de linha do secundário
X	Reatância
X%	Reatância percentual

$Z\%$	Impedância percentual
$Z$	Impedância
$Z_B$	Impedância de base
$W_{Fe}$	Perdas no ferro
$W_C$	Perdas em carga
$W_{c\text{fase}}$	Perdas em carga por fase
$W_{CN}$	Perdas nominais nos condutores
$W_{co}$	Perda ôhmica do enrolamento
$W_0$	Perda em vazio
$\varepsilon$	Distância de trespassamento da chapa
$\Phi$	Fluxo
$\gamma_{fe}$	Peso específico do ferro
$\gamma_{cond1}$	Peso específico do material do condutor do enrolamento primário
$\gamma_{cond2}$	Peso específico do material do condutor do enrolamento secundário
$\gamma_{Cu}$	Peso específico do cobre
$\gamma_{Al}$	Peso específico do alumínio
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\wp$	Permeância magnética
$\mathfrak{R}$	Relutância magnética
$\rho$	Resistividade
$\theta$	Temperatura



## Capítulo 1

---

# Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais objetivos desta dissertação de mestrado, assim como a estrutura utilizada em seu desenvolvimento.

## 1.2 Relevância do Tema

No Brasil, estima-se que 15% da energia gerada é perdida e que 70% desta perda ocorra nos sistemas de distribuição. Os transformadores são responsáveis por grande parte desta perda de energia. Hoje muito se fala em transformadores eficientes, mas pouco se conhece das características do projeto destes.

Muito se discute e se realiza no campo de eficiência de transformadores hoje no mundo, porém no Brasil este é um assunto pouco discutido no meio acadêmico. Já as Concessionárias colocam a questão para ser tratada por seus departamentos de compra que muitas vezes dão prioridade à redução do custo de aquisição enquanto os fabricantes têm pouco interesse em investir em pesquisas para melhorarem seus produtos no país.

Assim surge a necessidade de se discutir e comparar as diferentes formas de se projetar um transformador, pois há pouca literatura sobre o assunto. A necessidade também nos faz levar em consideração outros fatores não só técnicos para se chegar ao melhor projeto, como por exemplo, os aspectos econômicos.

Além disso, duas mudanças vêm ocorrendo nos transformadores fabricados no Brasil que apresentam impactos diretos na eficiência, a primeira a substituição do cobre pelo alumínio como condutor e a segunda a utilização de transformadores com núcleo de metal amorfo ao invés de aço silício. Desta forma são analisadas também estas duas mudanças.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Definir aspectos sobre eficiência e análise financeira sobre a avaliação do custo da eficiência para o comprador;
- Apresentar pontos relevantes sobre o projeto de transformadores, principalmente, de distribuição;

- Fazer uma comparação entre a utilização do cobre e do alumínio como materiais condutores com foco nas alterações técnicas e econômicas.
- Apresentar as diferenças advindas da utilização do metal amorfo nos transformadores de distribuição.

## 1.4 Estrutura

Esta dissertação está estruturada em nove capítulos:

- 1 Introdução
- 2 Conceitos
- 3 Projeto do Núcleo
- 4 Projeto dos Enrolamentos
- 5 Cálculo das Perdas
- 6 Cálculo das Demais Características
- 7 Comparativo da Utilização do Cobre e do Alumínio
- 8 Diferenças na Utilização do Metal Amorfo no Núcleo
- 9 Conclusões

No Capítulo 1 é comentada a motivação deste trabalho, mostrando a relevância do tema no cenário nacional.

No Capítulo 2 são introduzidos conceitos sobre eficiência e análise econômica de transformadores, principalmente utilizados para distribuição de energia.

No Capítulo 3 são discutidas as características do núcleo de um transformador. Também se apresentam as formas construtivas, características do material utilizado, os cuidados que se deve tomar durante o projeto do núcleo e a teoria de cálculo do núcleo.

No Capítulo 4 são discutidas as características do projeto das bobinas ou enrolamentos do transformador.

No Capítulo 5 são discutidas as mais diferentes perdas existentes em um transformador e a forma de se calculá-las.

No Capítulo 6 discutem-se as características restantes, ou seja, reatância e impedância que, porém possuem grande relevância no projeto de transformadores.

No Capítulo 7 é apresentada uma comparação entre a utilização do cobre e do alumínio como materiais condutores a serem utilizados nos enrolamentos de transformadores.

No Capítulo 8 se discute as diferenças na utilização do metal amorfo no projeto e construção de transformadores de distribuição.

Por fim, com capítulo 9 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido.



## Capítulo 2

---

# Conceitos

## 2.1 Considerações Iniciais

O projeto de um transformador não se restringe à simples aplicação de fórmulas bem definidas e de conhecimento comum. Esta tarefa envolve um conhecimento pouco divulgado além da utilização de gráficos e dados tabelados gerados de forma prática pela manufatura e testes durante anos. Este estudo se desenvolveu devido à constante necessidade de entender as rotinas de projeto existentes para seu uso consciente e devido aperfeiçoamento das mesmas.

Para uma dada especificação existem centenas de projetos capazes de atendê-la, porém todos eles com as mais diferentes características construtivas possíveis.

Desta forma, projetar um transformador dentro das especificações das normas vigentes não é o suficiente em um mercado com clientes cada vez mais exigentes e grande competição entre os fabricantes. De um lado, pressões geradas pelos órgãos reguladores, além de questões ambientais, geram a necessidade de se projetar transformadores cada vez mais eficientes para seus clientes. Do outro lado a competição acirrada existente no mercado exige que se reduzam os custos de produção no menor nível possível para que se tenha um preço competitivo maximizando o lucro.

Baseado nos fatos acima se chega ao trade-off existente no projeto de transformadores nos dias de hoje. Usualmente o aumento da eficiência implica no aumento do custo de fabricação de qualquer produto. Este conflito de escolha entre eficiência e custo de produção deve ser solucionado pela busca do projeto com o melhor custo benefício. Este projeto tem de atender as expectativas do cliente quanto à eficiência sem prejudicar a competitividade do produto no mercado.

Para uma concessionária, o transformador com o maior custo de aquisição não é necessariamente o transformador mais caro quando se leva em consideração seu custo benefício. Isto se deve à capitalização das perdas elétricas dos transformadores ao longo de sua vida útil ou de certo período de análise adotado pela concessionária. Um transformador com baixas perdas pode ter um custo de aquisição elevado se comparado a um transformador comum, porém com a capitalização das perdas seu custo pode-se mostrar mais atraente.

## 2.2 Rendimento

O termo eficiência é consideravelmente confundido e utilizado erroneamente no lugar do termo rendimento quando o assunto é transformador. Rendimento nada mais é que uma relação direta entre a potência de entrada e a potência de saída do transformador em um dado instante, como mostra a equação (2-1) abaixo. Sabe-se que o rendimento para um transformador não é uma grandeza constante podendo variar ao longo da operação do transformador. O rendimento, desta forma, qualifica uma grandeza instantânea e dependente da potência exigida do transformador pela carga em seu secundário.

$$\eta = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} = \frac{P_{Saída}}{P_{Saída} + Perdas} = \frac{S \cos(\phi)}{S \cos(\phi) + W_0 + W_c \cdot \left(\frac{S}{S_N}\right)^2} \quad (2-1)$$

Sendo  $\eta$  o rendimento,  $P_{Saída}$  a potência de saída do transformador,  $P_{Entrada}$  a potência de entrada do transformador,  $S$  a potência do transformador,  $S_N$  a potência nominal do transformador,  $\cos(\phi)$  o fator de potência,  $W_0$  as perdas em vazio e  $W_c$  as perdas em carga.

O rendimento de um transformador é, normalmente, padronizado em normas e medido para 50% de sua potência nominal. Isto não impede que dois transformadores com o mesmo rendimento a 50% de sua potência nominal, como na Figura 2-1, alimentando a mesma a mesma carga variável por certo período de tempo, tenham perdas energéticas distintas neste período. Tal fato se deve ao rendimento não ser constante e variar de acordo com a potência à qual o transformador é submetido. Os gráficos da Figura 2-1 e da Figura 2-2 foram construídos para dois transformadores hipotéticos, T1 e T2, de 30 kVA de potência com perdas em vazio de 150 W e 30W e perdas em carga de 350 W e 830 W, respectivamente. Estes valores foram escolhidos de forma didática não sendo representativos para transformadores presentes no mercado.

O rendimento de um transformador para uma dada potência depende da perda deste. Podemos classificar ou dividir esta perda em duas categorias. A primeira trata-se da perda em vazio que é independente da potência à qual o transformador é submetido existindo até mesmo quando o transformador não alimenta carga nenhuma. A segunda trata-se da perda em carga sendo totalmente dependente da potência

exigida pela carga tendo um comportamento quadrático. O comportamento das perdas de um transformador com relação à potência da carga pode ser visto na Figura 2-2.

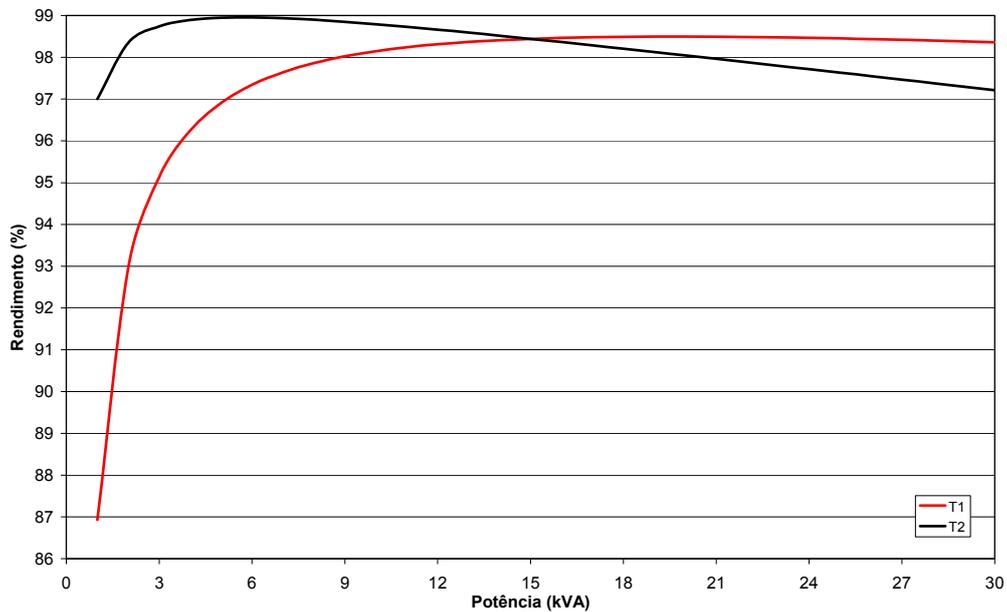


Figura 2-1 – Curvas de rendimento

A curva de rendimento do transformador mostrada na Figura 2-1 mostra duas curvas distintas. Pode-se retirar deste gráfico uma conclusão simples. Apesar de terem o mesmo rendimento a 50% de sua capacidade, os transformadores têm um comportamento diferente para cada tipo de carga. Assim, estes terão provavelmente uma perda de energia próxima uma da outra para o caso em que a carga opere a maior parte do tempo próxima a 50% da potência do transformador.

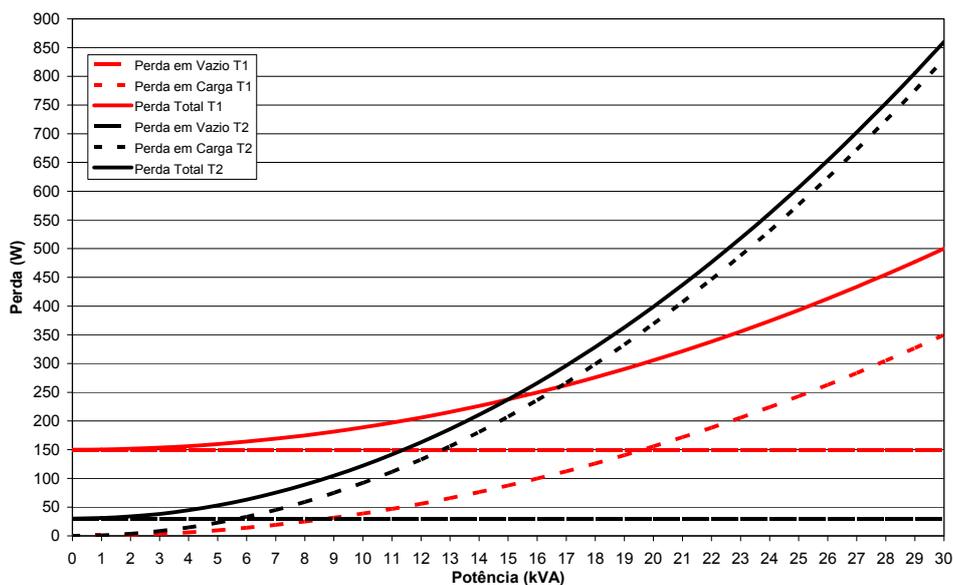


Figura 2-2 – Curvas das perdas

Para um dado transformador pode-se calcular o seu carregamento para o qual se terá o rendimento máximo. Este ponto de rendimento máximo depende exclusivamente das características do transformador sendo assim independente da carga como na equação (2-2) abaixo.

$$\eta_{máximo} = \sqrt{\frac{W_0}{W_c}} \quad (2-2)$$

Sendo  $\eta_{máximo}$  o rendimento máximo,  $W_0$  as perdas em vazio e  $W_c$  as perdas em carga.

### 2.3 Eficiência

A eficiência de um transformador, ao contrário do rendimento, não depende somente de um ponto de operação, mas sim de todo um regime de carga. A eficiência é dada para cada tipo de carga. Assim, tomando como base a figura 2-1, para uma carga operando a maior parte do tempo com 10% da potência do transformador, o transformador T2 é mais eficiente do que o transformador T1. Já para o outro caso, 90%, o transformador T1 é mais eficiente.

Com base nesta informação, conclui-se que a eficiência é uma medida dependente do regime de carga. Desta forma a eficiência é resultado de cada valor instantâneo do rendimento do transformador ao longo do período analisado. Como a carga dos transformadores, principalmente para os de distribuição, é variável ao longo do dia, escolher o melhor transformador com base em informações um único ponto de rendimento é uma atitude equivocada.

Para se escolher o melhor transformador para um sistema de distribuição, tem que se conhecer o regime de carga. Ou seja, tem que se conhecer o comportamento da carga durante 24 horas em vários períodos do ano. De posse deste conhecimento a escolha do melhor transformador passa ser uma tarefa técnico-econômica. Pois o transformador mais eficiente não necessariamente é o transformador que possui o melhor custo-benefício. Como o próprio nome da expressão já diz não basta analisar somente o benefício que este transformador traz para o sistema, mas também o custo para a implantação deste transformador.

Como já foi dito nas considerações iniciais não se consegue, usualmente, aumentar a eficiência de um transformador sem ter um aumento em contrapartida no seu custo de fabricação. Seja pela utilização de um maior volume de matéria-prima,

seja pela utilização de materiais mais nobres ou até mesmo por um processo ou construção inovador, o custo deste aumento de eficiência afeta o preço final do produto.

Um transformador eficiente é, geralmente, mais caro que o transformador comum. Porém, para uma dada aplicação ou perfil de carga conhecido, o transformador eficiente pode trazer, com a redução das perdas, um retorno financeiro maior que a diferença de preço entre ele e o transformador menos eficiente.

## 2.4 Descritivo de Perda sobre Carga

As perdas em um transformador são divididas em dois tipos principais: a perda em vazio e a perda em carga. A primeira é devido ao circuito magnético, ou seja, o núcleo do transformador e ocorre durante todo o período de vida do equipamento. Esta perda é constante, pois é independente de qualquer fator envolvendo a carga. Já a segunda depende, de forma quadrática, da corrente de carga.

Assim, para se fazer um comparativo da eficiência entre dois transformadores, tem de se realizar medições de cargas similares à carga à qual se pretende suprir e se possível, medições da própria carga à qual se pretende suprir. Com base nestas medições são elaboradas curvas como as apresentadas na Figura 2-3 e na Figura 2-4.

Para uma análise mais adequada, devem ser calculadas as perdas em carga dos transformadores sob análise para cada instante de medição obtendo-se no final as perdas totais dos dois transformadores durante o período de análise. Para facilitar esta tarefa foi criada a teoria do Descritivo de Perda sobre Carga (DPC), também chamado de Tempo Suprindo Máxima Potência (TSMP) ou Fator de Energia (FE). Esta teoria transforma, através de um cálculo simples, uma curva de carga de certo período de tempo em um índice de fácil compreensão e análise. Este índice corresponde ao tempo necessário para que o transformador, caso esteja operando em plena carga, gere a mesma perda em carga que este geraria durante todo o período em análise. Por exemplo, um resultado de duas horas para o DPC calculado em certo período significa que, caso o transformador opere a plena carga por duas horas, ele irá ter o mesmo consumo de energia que este teve operando no regime de carga medido durante todo o período de análise.

O regime de carga se difere de acordo com a finalidade da carga. Como podemos ver abaixo, temos comportamentos diferentes ao longo do dia devido ao tipo de carga.

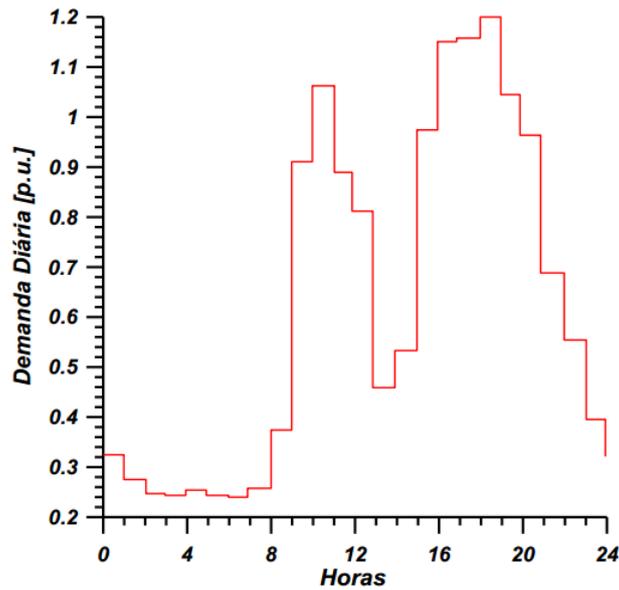


Figura 2-3 – Perfil de carga de área comercial

O gráfico da figura 2-3 representa um regime de carga de uma área comercial. Nota-se claramente o horário de início de funcionamento do comércio por volta das 9 horas da manhã.

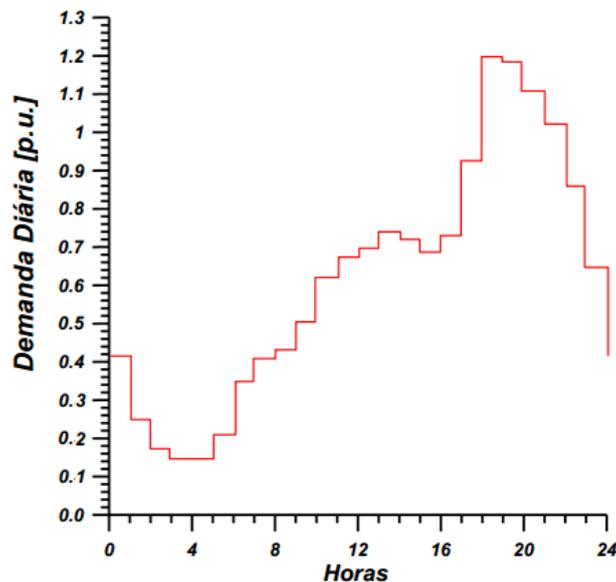


Figura 2-4 – Perfil de carga residencial

O regime de carga da figura 2-4 corresponde ao regime de carga de uma área residencial. Neste regime é facilmente percebido o pico de energia no horário das 18 horas. Hora esta em que boa parte das pessoas retorna para suas casas e devido ao anoitecer e outras atividades, se tem um maior consumo de energia nas residências a partir deste horário.

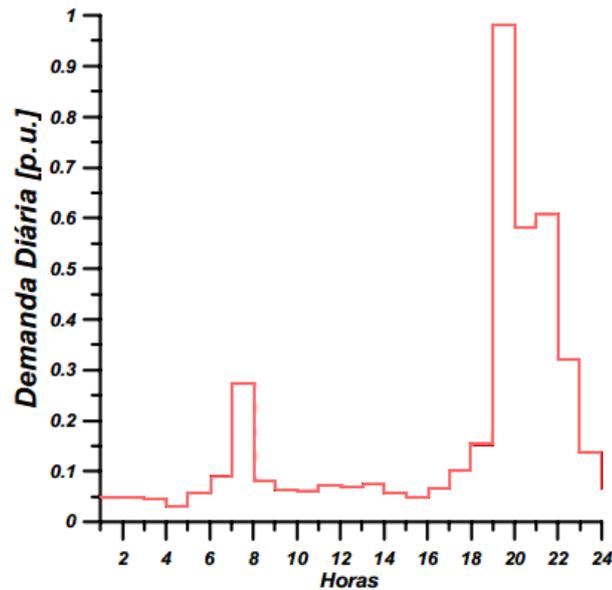


Figura 2-5 – Perfil de carga rural

Na figura 2-5 está representado o regime de carga de uma área rural. Este regime se caracteriza pelo baixo consumo de energia durante todo o dia tendo poucas horas, às vezes até minutos, de consumo de energia.

De posse das medições para o perfil de carga, o cálculo do DPC é realizado através da equação (2-3) abaixo, onde  $n$  corresponde ao número de amostras ou número de pontos adquiridos no período de 24 horas.

$$DPC = \frac{24}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{S_i}{S_N} \right)^2 \quad (2-3)$$

Sendo  $n$  o número de total de leituras,  $S_i$  a potência instantânea lida, e  $S_N$  a potência nominal do transformador.

## 2.5 Análise Econômica das Perdas

Como já foi dito para comparar dois transformadores é necessário fazer uma análise técnico-econômica. Um método simples e que gera bons resultados é o método do custo total de aquisição do equipamento. Este método leva em consideração não somente o custo de compra do equipamento, mas toda a sua operação para um dado período de análise e seu valor no período de análise. A equação matemática para o cálculo do custo total de aquisição é dada por (2-4).

$$TOC = PCC + A.W_0 + B.W_c \quad (2-4)$$

Sendo, TOC o custo total de aquisição em R\$, PCC o preço de compra capitalizado em R\$, A chamada parcela A em R\$/kWh, B chamada parcela B em R\$/kWh,  $W_0$  as perdas em vazio em kW e  $W_c$  as perdas em carga em kW.

Este método procura trazer todos os valores, ou lançamentos do fluxo de caixa, das perdas para a data presente e incorpora estes valores ao valor de compra capitalizado do equipamento. O tratamento matemático-financeiro para as perdas em vazio é feito pela parcela A, a qual é calculada da seguinte forma pela aplicação da equação (2-5) abaixo.

$$A = 8760 \frac{i(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} C_{kWh} \quad (2-5)$$

Sendo,  $C_{kWh}$  o custo da energia em R\$/kWh, n o número de períodos a serem analisados e i a taxa de juros adotada.

Já as perdas em carga têm seu peso dado pela parcela B, cujo significado é dado pela equação (2-6) abaixo.

$$B = 365 \frac{i(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} C_{kWh} \cdot DPC \quad (2-6)$$

Sendo,  $C_{kWh}$  o custo da energia em R\$/kWh, n o número de períodos a serem analisados, i a taxa de juros adotada e DPC o descritivo de perdas sobre carga.

O preço de compra capitalizado é dado pela equação (2-7) abaixo. O preço de compra é distribuído em uma série futura de desembolsos. O número de desembolsos desta série corresponde ao número total de períodos que equivalem à vida útil do transformador em análise. Desta forma, quando o período de análise é menor que a vida útil do transformador, o custo de aquisição analisado corresponde aos desembolsos realizados durante o período de análise.

$$PCC = PC \frac{j(1+j)^{nv} - 1}{j(1+j)^{nv} - 1} \cdot \frac{i(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2-7)$$

Sendo, PC o preço de compra em R\$, nv o número de períodos correspondente à vida útil do transformador, n o número de períodos a serem analisados e i a taxa de juros adotada e j a taxa de amortização.

Esta capitalização do preço de compra do transformador é importante ser realizada quando o período de análise é menor que o tempo de vida útil do transformador, pois assim evita-se que a diferença de preço entre os transformadores seja totalmente aplicada ao período de análise. Ao se capitalizar o preço de compra, a diferença de preço entre dois transformadores é distribuída em cada parcela da série de desembolsos. Assim, ao se analisar um período de tempo menor que a vida útil do transformador a diferença de preços utilizada será correspondente a este período e não a diferença total correspondente à vida útil.

Capítulo 3

---

# Projeto do Núcleo

### 3.1 Considerações Iniciais

Um transformador é composto basicamente de núcleo e enrolamentos. O núcleo é formado por material ferro-magnético com a função de conduzir o fluxo gerado pelos enrolamentos por um caminho de fácil circulação. Este faz o acoplamento magnético entre os enrolamentos. Assim, este capítulo discute as características do núcleo de um transformador. Também este apresenta as formas construtivas, características do material utilizado, os cuidados que se deve tomar durante o projeto do núcleo e a teoria de cálculo.

### 3.2 O Núcleo

O núcleo, como já foi dito, em geral é feito de material ferro-magnético e é responsável por transferir eletromagneticamente, através de seu fluxo, a corrente induzida de um enrolamento para outro enrolamento. O material mais comumente utilizado para construir o núcleo é uma liga de ferro-silício com cerca de 3 a 5% de silício. Esta adição de silício traz como uma vantagem o aumento da resistividade do aço. O gráfico da Figura 3.1 mostra a resistividade de aços siliciosos em função do teor de silício [5].

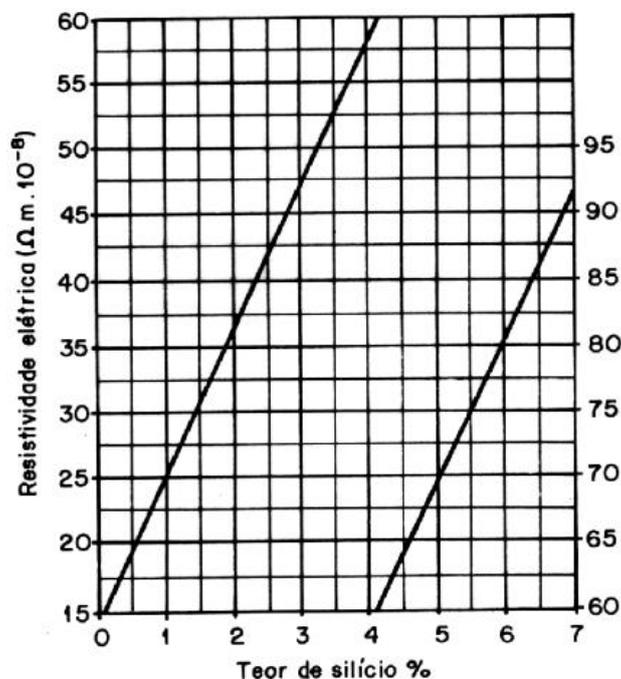


Figura 3-1 – Resistividade em função do teor de silício [5]

A equação para o traçado do gráfico na figura 3-1 é:

$$\rho = [13,25 + (11,3 \cdot \text{teor de silício em } \%) ] \quad (3-1)$$

Existem vários outros materiais capazes de exercer a mesma função que o ferro silício. Entre estes, pode se citar o ferrite, supermalloy, permalloy, aço amorfo, etc. O que define qual o material a ser utilizado na construção do núcleo é o custo final do transformador.

O ferro-silício é empregado na forma de chapas finas para reduzir a perda por correntes parasitas as quais serão detalhadas mais a frente. Sendo assim, o núcleo é construído com chapas, usualmente, com espessura de 0,23mm a 0,30mm, laminadas a frio, cobertas com uma camada fina de um isolante elétrico inorgânico capaz de aguentar as altas temperaturas do recozimento. A função deste material isolante é basicamente impedir o contato entre as chapas para reduzir os possíveis caminhos para correntes parasitas. Para grandes núcleos isolantes adicionais podem ser acrescentados entre pacotes de lâminas [1].

O motivo para a utilização de materiais ferros-magnéticos é criar um caminho favorável à circulação do fluxo magnético gerado pelos enrolamentos tendo um alto fluxo mútuo entre os enrolamentos e baixo fluxo de dispersão. Isto ocorre, de uma forma simplificada, como se o núcleo atraísse a maior parte do fluxo para si, forçando-o a circular pelo seu material. O alto fluxo mútuo e baixo fluxo de dispersão dão como resultado um alto grau de acoplamento entre o primário e o secundário. Deste modo é possível conseguir coeficientes de acoplamento que podem atingir valores da ordem de 0,998[1]. O fluxo mútuo pode ser obtido através das equações (3-2) e (3-3) abaixo.

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B \cdot A_{fe} \quad (3-2)$$

Sendo,  $E_1$  a tensão induzida no primário em V,  $N_1$  o número de espiras do primário,  $f$  frequência em Hz,  $\phi$  o fluxo mútuo em Wb,  $B$  a indução magnética em Wb/m<sup>2</sup> e  $A_{fe}$  a área do material magnético em m<sup>2</sup>.

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \phi = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot B \cdot A_{fe} \quad (3-3)$$

Sendo,  $E_2$  a tensão induzida no secundário,  $N_2$  o número de espiras do secundário,  $f$  frequência em Hz,  $\phi$  o fluxo mútuo em Wb,  $B$  a indução magnética em Wb/m<sup>2</sup> e  $A_{fe}$  a área do material magnético em m<sup>2</sup>.

Estas duas equações são fundamentais no dimensionamento dos transformadores, pois permitem determinar o número de espiras do primário e secundário, sendo conhecidos os demais valores. A indução magnética  $B$  deve ser estimada da melhor forma possível em função do material utilizado na construção do núcleo. Geralmente é tomado um valor próximo ao joelho da curva de magnetização, como mostra a Figura 3-2. A seção do núcleo de ferro é obtida por considerações geométricas e econômicas, sendo também comum ter a necessidade de se escolher a seção do núcleo com base em modelos de núcleo preexistentes devido à limitação do processo produtivo. As tensões  $E_1$  e  $E_2$  e a frequência  $f$  são definidas pela rede elétrica.

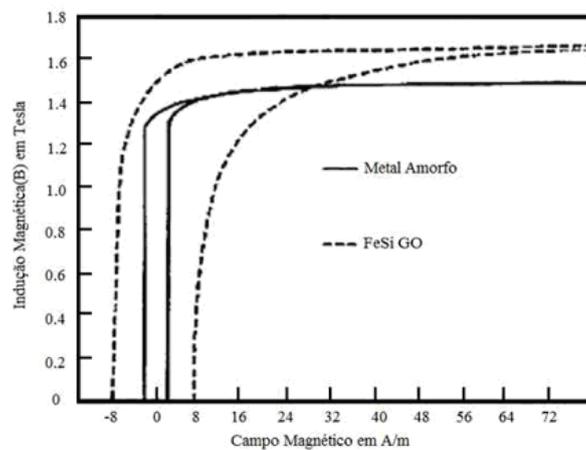


Figura 3-2 – Curvas de magnetização [25]

O núcleo é constituído pelas colunas, sobre as quais são montadas as bobinas, e pelas culatras que completam o retorno do circuito magnético do fluxo mútuo.

Devido ao formato do caminho magnético criado pelo núcleo podemos classificá-lo de duas formas: “núcleo envolvente” e “núcleo envolvido”. Nos transformadores do tipo núcleo envolvido, o núcleo é envolvido pelas bobinas, como pode se observar na Figura 3-3a. Já nos transformadores do tipo núcleo envolvente, as bobinas são envolvidas pelo núcleo, como é o caso da Figura 3-3b.

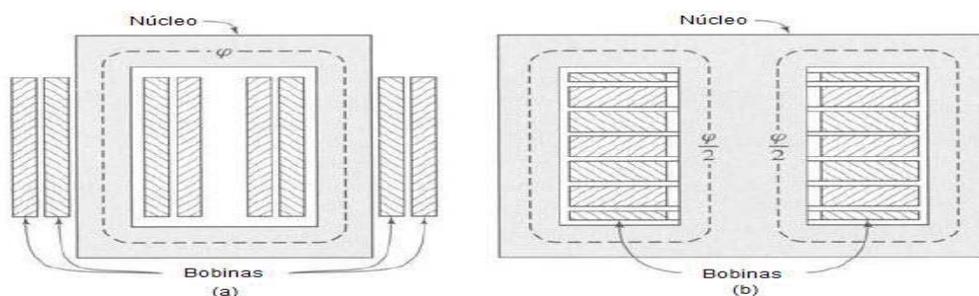


Figura 3-3 – Tipos de núcleo [1]

No caso específico do núcleo envolvente, nota-se, na Figura 3-4, que as colunas externas são mais finas que a coluna central do núcleo. Isto se deve pela divisão do fluxo que passa pela coluna central ao chegar à culatra em duas partes iguais. Assim, todo o restante do núcleo envolvente é formado com uma seção duas vezes menor que a seção da coluna central, por receberem somente metade do fluxo gerado na coluna central. Isto não ocorre para o tipo construtivo do núcleo envolvido, onde todo o núcleo possui a mesma seção.

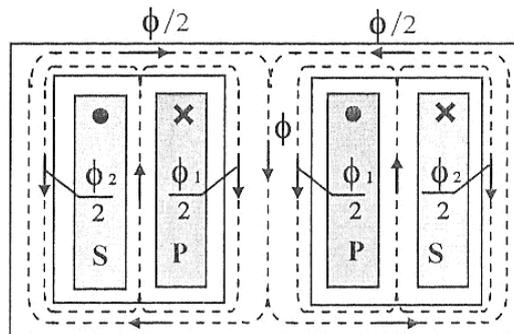


Figura 3-4 – Caminho percorrido pelo fluxo [1]

O núcleo pode ser classificado também quanto à forma de laminação. Uma das formas consiste em colocar lâmina sobre lâmina formando uma pilha de várias lâminas de formatos diferentes. A este núcleo dá-se o nome de núcleo empilhado, Figura 3-5. Na outra forma as lâminas são colocadas fazendo-se com que cada lâmina dê uma volta completa no enrolamento ao qual ela pertence. A este núcleo dá-se o nome de núcleo enrolado, Figura 3-6.

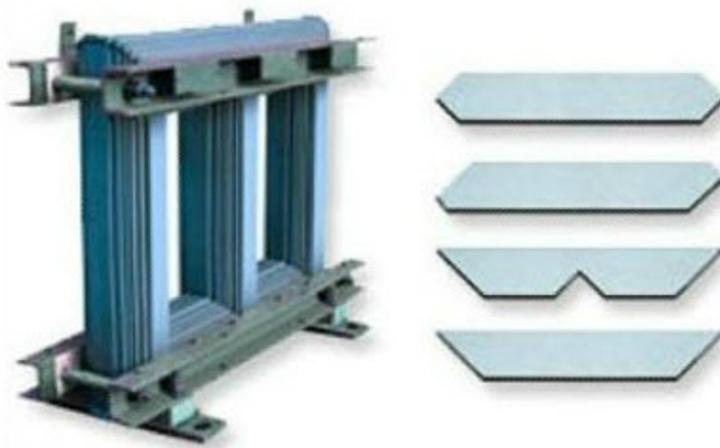


Figura 3-5 – Núcleo empilhado



Figura 3-6 – Núcleo enrolado

### 3.3 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados na manufatura de transformadores de distribuição e potência são, geralmente, chapas de grão orientado devido à sua melhor característica magnética no sentido de orientação dos grãos. Estas chapas possuem propriedades magnéticas, como corrente de excitação e perdas magnéticas, que dependem da orientação dos grãos magnéticos. Os grãos são orientados de acordo com o sentido de laminação a frio das mesmas. Conseqüentemente, estas chapas devem ser utilizadas de maneira que o sentido do fluxo magnético coincida com a orientação do grão. Deve-se evitar que o fluxo flua perpendicularmente ao sentido de orientação dos grãos magnéticos, pois para esta situação as características magnéticas da chapa não são boas se comparadas à situação em que o fluxo está na mesma direção dos grãos. Dependendo da forma construtiva do núcleo, no entanto, podem aparecer zonas em que o fluxo magnético tenha um sentido ortogonal ao do grão orientado. Assim devem-se saber as características magnéticas da chapa no sentido do grão orientado e no sentido ortogonal.

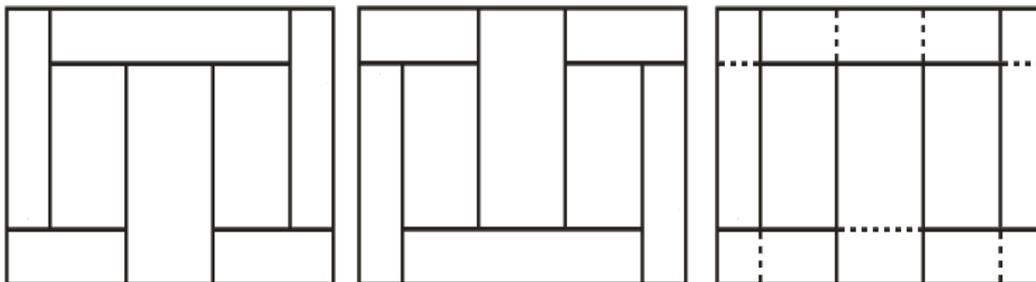


Figura 3-7 – Cortes das chapas em 90°

Para contornar o problema de se ter grandes massas de material com o fluxo no sentido perpendicular à orientação dos grãos como mostrado na Figura 3-7, procura-se cortar a 45° as chapas que compõem o núcleo, de modo que o fluxo

percorra sempre o circuito no sentido da orientação dos grãos, como pode ser visto na Figura 3-8.

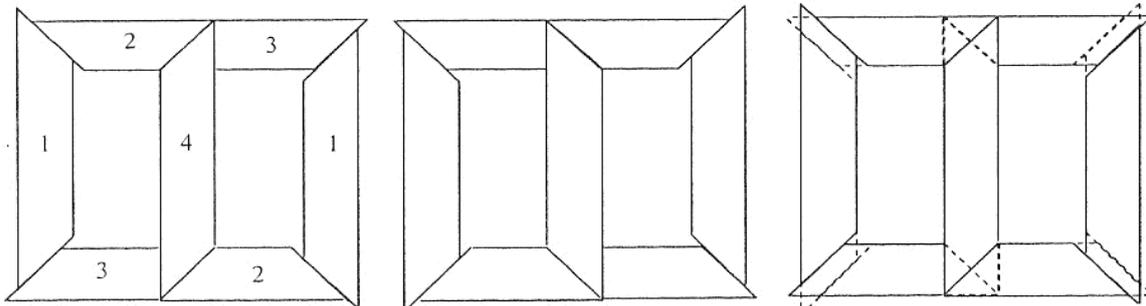


Figura 3-8 – Cortes das chapas em 45°

A Figura 3-9 mostra também que para evitar um pequeno entreferro contínuo nas junções das chapas, elas são montadas com um pequeno deslizamento cíclico, alternando o sentido deste deslizamento nas sucessivas camadas de chapa do núcleo. Este pequeno entreferro contínuo representaria uma relutância magnética grande, aumentando a Força magneto motriz, fmm, de excitação e, portanto, a corrente de excitação do transformador.

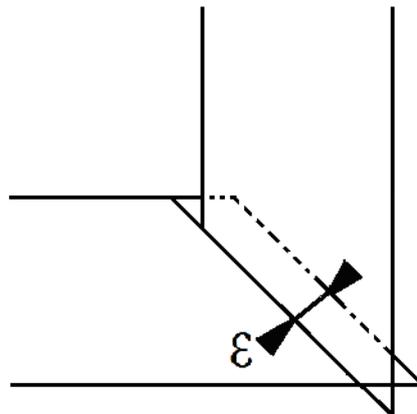


Figura 3-9 – Trespasseamento das lâminas do transformador

Na figura 3-10 observa-se em detalhe o trespasseamento entre as chapas.

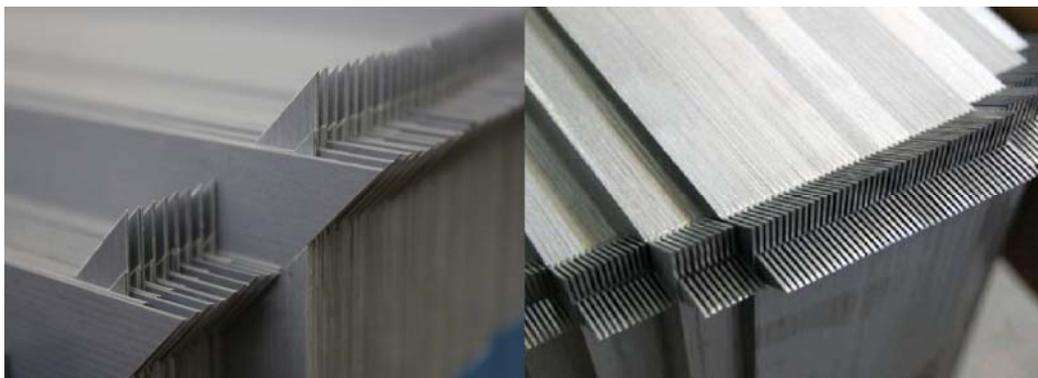


Figura 3-10 – Detalhe do trespasseamento das lâminas do transformador [31]

### 3.4 Construção de Núcleos

Por núcleo e elementos de montagem entende-se todo o circuito magnético do transformador e seus elementos de fixação e montagem, ou seja:

- O núcleo, propriamente dito, ou circuito magnético;
- As armaduras ou prensa-culatras;
- As prensa-colunas;
- Os tirantes;
- As sapatas.

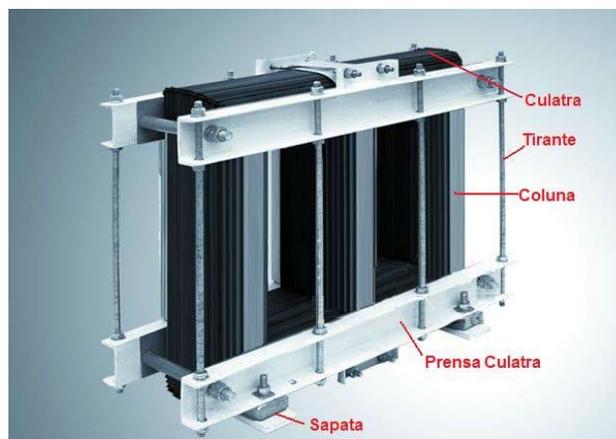


Figura 3-11 – Elementos do núcleo [32]

A seção do núcleo pode ser quadrada, retangular, cruciforme ou aproximadamente circular (em degraus).

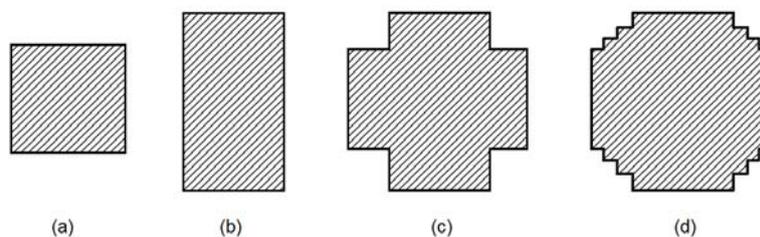


Figura 3-12 – Formatos para seção do núcleo

Para o núcleo em degraus, como na figura 3-12(d), o problema consiste em inscrever, num círculo, uma seção escalonada, de área máxima para um dado número de degraus. A escolha do número de degraus para um determinado diâmetro de núcleo é um compromisso entre custo de fabricação e vantagens advindas de um

maior coeficiente de utilização da seção circular. É normal que o número de degraus aumente com o diâmetro do núcleo. Porém, a partir de certo número de degraus o ganho em termos de área preenchida, como se observa na figura (3-14(b)), torna-se insignificante frente ao aumento no custo de produção devido ao gasto com ferramentaria e set-up de máquina.

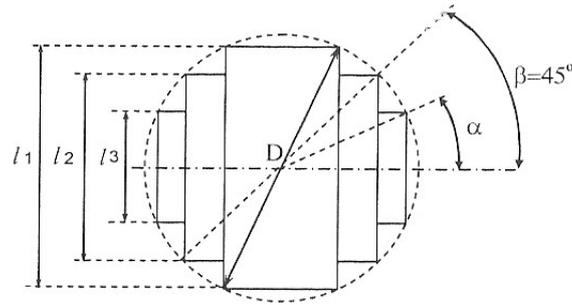


Figura 3-13 – Dimensões dos degraus [1]

Para três degraus, representados na figura 3-13, temos as seguintes relações abaixo. Sendo para a largura  $l_1$  temos a equação (3-4) abaixo [1].

$$l_1 = D \cdot \cos \alpha \quad (3-4)$$

Para a largura  $l_2$  temos a equação (3-5) abaixo.

$$l_2 = D \cdot \sen \beta \quad (3-5)$$

Para a largura  $l_3$  temos a equação (3-6) abaixo.

$$l_3 = D \cdot \sen \alpha \quad (3-6)$$

A área do núcleo é obtida pela substituição das equações (3-4), (3-5) e (3-6) em (3-7).

$$A_{fe} = l_1 \cdot l_3 + (l_2 - l_3) \cdot l_2 + (l_1 - l_2) \cdot l_3 \quad (3-7)$$

Substituindo-se as equações (3-4), (3-5) e (3-6) em (3-7) pode-se encontrar o valor máximo para  $A/D^2$ . A relação  $A/D^2$  representa o coeficiente de utilização em relação ao quadrado circunscrito. O coeficiente de utilização em relação à área do círculo de diâmetro  $D$ , o coeficiente de utilização, que um grandeza adimensional, é dado pela equação (3-8).

$$k_u = \frac{4 \cdot A_{fe}}{\pi \cdot D^2} \quad (3-8)$$

Assim basta multiplicarmos a relação  $A_{fe}/D^2$  já encontrada por  $4/\pi$ . Procedendo de maneira análoga para outras quantidades de degraus, tem-se a seguinte tabela.

Tabela 3-1 – Dimensões do núcleo em função do número de degraus [1]

Degraus	L <sub>1</sub> /D	L <sub>2</sub> /D	L <sub>3</sub> /D	L <sub>4</sub> /D	L <sub>5</sub> /D	L <sub>6</sub> /D	L <sub>7</sub> /D	L <sub>8</sub> /D	L <sub>9</sub> /D	A <sub>fe</sub> /D <sup>2</sup>	K <sub>u</sub>
1	0,707									0,500	<b>0,636</b>
2	0,850	0,526								0,618	<b>0,786</b>
3	0,906	0,707	0,424							0,668	<b>0,850</b>
4	0,934	0,796	0,605	0,358						0,696	<b>0,886</b>
5	0,950	0,846	0,707	0,534	0,313					0,713	<b>0,907</b>
6	0,959	0,875	0,768	0,640	0,483	0,281				0,725	<b>0,923</b>
7	0,967	0,898	0,812	0,707	0,584	0,436	0,255			0,734	<b>0,934</b>
8	0,974	0,914	0,841	0,755	0,654	0,554	0,404	0,234		0,740	<b>0,942</b>
9	0,077	0,929	0,867	0,798	0,707	0,608	0,498	0,370	0,214	0,745	<b>0,948</b>

Com o auxílio deste quadro, conhecido o diâmetro do núcleo e o número de degraus, determina-se as larguras dos degraus e as espessuras dos pacotes do núcleo, com o que se pode determinar o número de lâminas de cada pacote.

$$A_{fe} = D^2 \cdot \sum_{n=1}^m (0,5 \cdot \text{sen}2\theta_n - \text{sen}\theta_{n-1} \cdot \text{cos}\theta_n) \quad (3-9)$$

A equação (3-9) é uma equação genérica para um núcleo como mostrado na figura 3-14(a). A equação pode ser utilizada para um núcleo com n degraus [2].

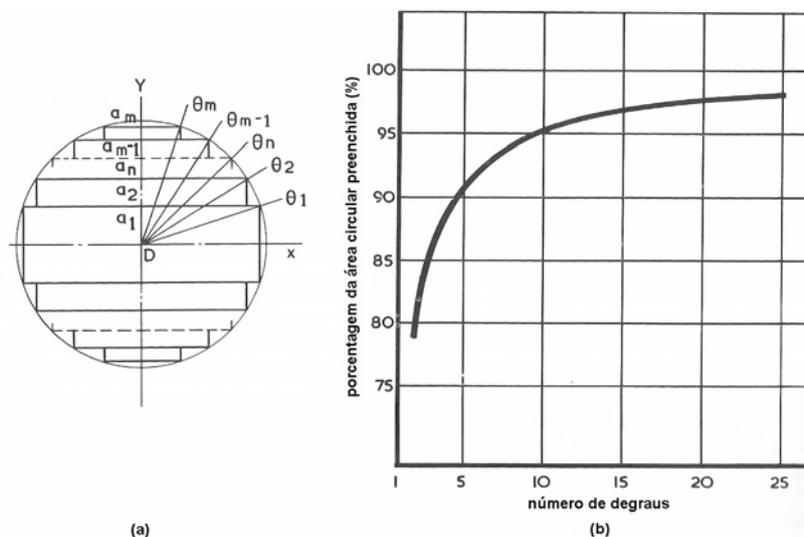


Figura 3-14 – Relação do número de degraus com a seção preenchida do círculo [3]

As dimensões básicas que definem o núcleo são:

1. A seção e o número de degraus;
2. A altura da janela;
3. Distância entre os centros das colunas.

A Figura 3-8 mostra como duas camadas consecutivas do pacote de lâminas são colocadas para evitar que os pequenos entreferros fiquem coincidentes na montagem. Normalmente, as seções das colunas e culatras são iguais. No entanto, com o intuito de diminuir as perdas no núcleo, as culatras podem ter uma seção de 10% a 15% maior que as das colunas.

As chapas de grão orientado, utilizadas na fabricação dos transformadores de potência, possuem espessuras de 0,23 a 0,30mm. Os núcleos são montados com as lâminas dispostas de forma a diminuir, tanto quanto possível, os efeitos danosos dos entreferros nas junções. Os entreferros são responsáveis por aumentar a corrente de magnetização. Assim procedendo, os entreferros nas juntas são praticamente eliminados, apresentando-se como na Figura 3-15 em que 50% das chapas terão uma maior indução no trecho onde há a presença de entreferros, conseqüentemente, apresentarão maiores perdas magnéticas nestas áreas.

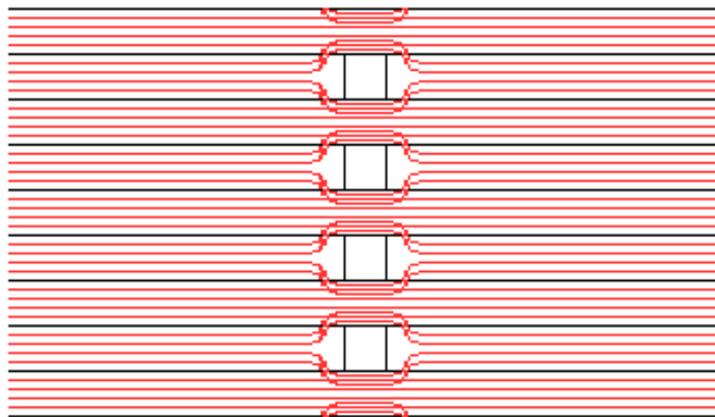


Figura 3-15 – Distribuição do fluxo com a presença de entreferro

Para evitar maiores correntes magnetizantes e maiores perdas magnéticas nos cantos, as chapas são cortadas em 45° como se pode observar na Figura 3-8 deve-se prover um deslocamento nas juntas como mostra a Figura 3-9. Um trespasseamento de poucos milímetros é suficiente, na maior parte dos casos, quer para evitar o efeito de um entreferro, quer para proporcionar boa rigidez mecânica quando o núcleo está prensado.

As culatras podem ter dois formatos básicos como pode ser visto na Figura 3-16. O formato da esquerda corresponde à escalonada circular como as colunas, já da direita é escalonada, mas com a face superior plana para a culatra superior e a face inferior plana para a culatra inferior. Nenhum dos dois tipos de culatras apresentado apresenta vantagens quando comparados entre si.

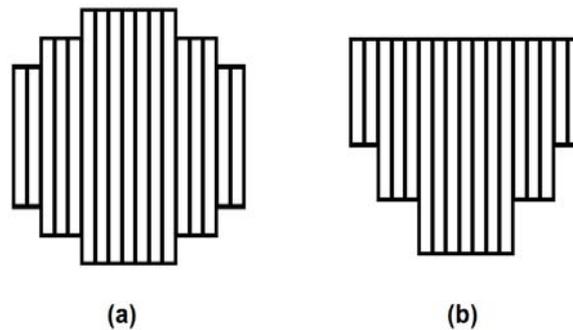


Figura 3-16 – Formatos da culatra

A pressão de empacotamento através das prensas-culatra e prensas-coluna deve ser grande o suficiente para manter o núcleo rígido e evitar vibrações. O fator de empilhamento é relação entre a seção efetiva de ferro do núcleo e a seção geométrica. É praticamente impossível evitar pequenos vazios entre as chapas, além do fato de existir um pequeno isolamento de alguns micrômetros na superfície das mesmas. O fator de empilhamento “ $k_e$ ” é, pois, menor que 1,00 e depende do tipo de isolamento utilizado entre as chapas.

A partir do diâmetro circunscrito ao núcleo, podem-se determinar muitos elementos de cálculo do transformador, como por exemplo, a seção efetiva do núcleo dada pela equação (3-10).

$$A_{fe} = k_u \cdot k_e \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3-10)$$

Sendo,  $A_{fe}$  a área do material magnético em  $m^2$ ,  $k_u$  o fator de utilização,  $k_e$  o fator de empilhamento e  $D$  o diâmetro do núcleo em m.

Em função do diâmetro do núcleo define-se o diâmetro mínimo que deve ter a bobina colocada imediatamente sobre o núcleo. O diâmetro da bobina deve ser acrescido da distância de isolamento necessário para atender as especificações obtendo-se assim o diâmetro interno da bobina.

Para a montagem da estrutura do núcleo são realizados primeiramente os cortes das chapas nos formatos mostrados nas figuras Figura 3-7 e Figura 3-8. Tais chapas podem receber furos.

A furação das chapas tem como função dar passagem aos parafusos de prensagem das culatras ou colunas. Porém deve-se evitar todo tipo de furação das chapas do núcleo. Esta operação gera certo custo adicional ao fabricante e, com isto, devido à tentativa de se reduzir custos ela é cada vez menos executada. Além de aumentar o custo, outro agravante é que com o estrangulamento da seção do núcleo, no trecho onde se localiza o furo, a seção fica reduzida provocando a concentração de fluxo. Esta concentração, ou seja, maior densidade de campo, reflete diretamente nas perdas e na corrente de magnetização.

Os núcleos são montados sobre um plano horizontal e nivelado. No processo são usadas guias de montagem para posicionar as chapas, evitando-se, ao máximo, os entreferros que são sempre origem de maiores correntes e perdas de excitação como já foi dito anteriormente.

Após montadas todas as chapas, o núcleo é prensado e somente então é colocado em pé para receber as cintas das colunas, como mostra a Figura 3-17. Para reforçar o isolamento entre as lâminas de núcleos de grande seção, é normal a colocação de um reforço de isolamento colocando folhas de material isolante a cada pacote de lâminas. Deste modo caso ocorram curtos-circuitos entre lâminas, devidos às sobretensões transitórias, eles ficam interrompidos nas zonas isoladas.

O núcleo deve passar por um processo de prensagem sendo empregados tirantes horizontais e verticais, prensa colunas e prensa culatras, calços e isolantes. Este processo deve ser feito antes de se colocar os enrolamentos para se realizar testes no núcleo. Isto evita que em caso de problemas na montagem, estes só sejam detectados depois do transformador montado, diminuindo assim a dificuldade e custo do retrabalho. Porém, para transformadores onde a probabilidade de ocorrer falhas no processo de fabricação do núcleo é pequena e o custo de retrabalho em caso de ocorrência é baixo, este processo de prensagem é feito somente com os enrolamentos no lugar.

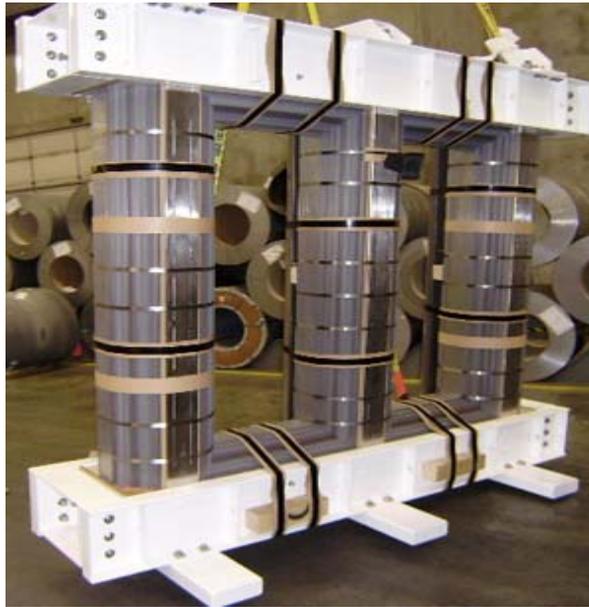


Figura 3-17 – Núcleo finalizado [33]

A prensagem é fundamental para diminuir o ruído gerado pelo núcleo do transformador. Este ruído se deve ao fenômeno da magnetostricção, o qual corresponde à expansão e contração do material ferromagnético ao ser percorrido por um fluxo magnético. Como o núcleo é constituído de chapas, estas geram este ruído ao se chocarem umas nas outras.

A prensagem das bobinas contra o núcleo também tem um papel importante que é dar maior estabilidade aos enrolamentos durante um curto-circuito. As forças geradas pelo curto-circuito podem fazer as bobinas se desalinharem e quanto mais desalinhadas maior se torna esta força levando o enrolamento ao colapso. Esta prensagem é feita através de calços geralmente de madeira tratada.

Grandes transformadores podem necessitar de refrigeração no núcleo devido à alta potência e ao tamanho. Os canais de refrigeração e as folhas de material isolante entre os pacotes fazem com que se diminua o fator de empilhamento das chapas do núcleo. Os diversos pacotes isolados entre si por estas lâminas de isolante devem ser aterrados em um determinado ponto por meio de chapas de cobre.

Todo o sistema de prensagem das culatras é isolado do núcleo através de espaçadores isolantes. A ligação elétrica das partes metálicas do sistema de prensagem ao núcleo é feita em um único ponto para evitar a circulação de correntes induzidas. Os passantes e os tirantes de prensagem são também isolados da mesma forma a fim de se evitar correntes.

Com o núcleo completamente montado e prensado, Figura 3-17, enrolam-se algumas espiras provisórias sobre as colunas e aplica-se uma tensão que produza a indução nominal de operação do núcleo. Verificam-se assim as perdas, a corrente de excitação percentual e eventuais zonas de aquecimento irregular.

### 3.5 Processo de Cálculo

Não existe uma rotina única para se projetar um transformador sendo que cada projetista desenvolve a sua rotina com base em seus estudos. Assim, existem várias formas de se calcular um transformador podendo, por exemplo, desprezar determinados parâmetros, de acordo com a pouca influência destes no resultado final.

#### 3.5.1 Indução Magnética da Coluna do Núcleo

A indução magnética máxima é um parâmetro que deve ser escolhido pelo projetista. Não há regra definida para tal. Dependendo do que se busca em cada projeto este valor pode ser diferente. Usualmente, escolhe-se um valor próximo ao joelho da curva de magnetização, pois pouco acima deste valor começa a ocorrer a saturação do material ferromagnético. Cada material ferromagnético possui uma curva característica de magnetização. Assim, para cada tipo de material a saturação ocorre para valores diferentes de indução, como se pode observar na Figura 3-2.

#### 3.5.2 Seção da Coluna

Uma das principais dimensões a ser calculada em um transformador é a seção do núcleo, pois dela dependem vários outros parâmetros e dimensões a serem calculados mais adiante. Uma forma bem prática de se realizar este cálculo é pela utilização de equação (3-2) repetida abaixo:

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B \cdot A_{fe}$$

Desta equação, por simples rearranjo se obtém a equação abaixo:

$$A_{feL-COL} = \frac{E_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_{COL}} \quad (3-11)$$

Sendo,  $A_{feL-COL}$  a área líquida do material magnético da coluna em  $cm^2$ ,  $E_1$  a tensão induzida no primário em V,  $N_1$  o número de espiras do primário,  $f$  frequência em Hz e  $B_{COL}$  a indução magnética na coluna em G.

A rotina desenvolvida tem como base um projeto padrão para cada potência de transformador, pois se trata de uma rotina para buscar desenvolver transformadores mais eficientes. Assim, ela parte de um transformador pré-existente buscando sua melhoria através da sua adaptação a uma determinada situação em que este transformador será empregado. Assim este será projetado para atender da melhor forma possível a carga tendo o menor custo total. O custo total se traduz em custo de compra e operação durante a vida útil do transformador.

Algumas obras trazem gráficos como o apresentado na Figura 3-18 abaixo:

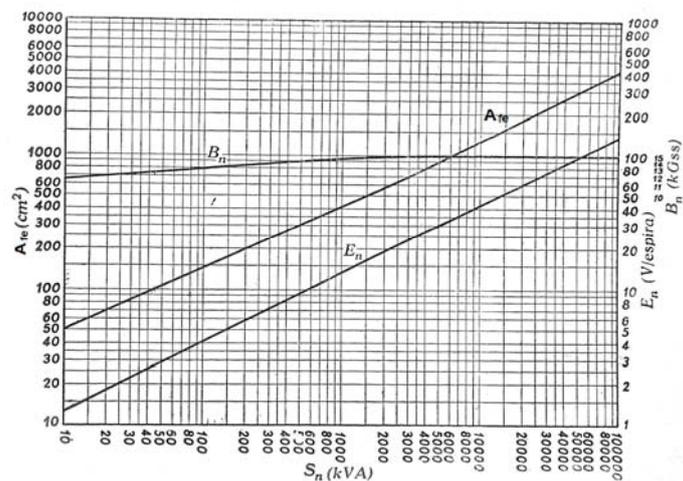


Figura 3-18 – Gráfico da seção, indução e f.m.m por espira pela potência nominal.

Deste gráfico pode-se obter, a partir da potência aparente do transformador a ser projetado, a seção do núcleo, a relação volts/espira e a indução magnética máxima do núcleo, sendo este um bom ponto de partida para o projeto.

### 3.5.3 Seção Líquida da Culatra

A seção líquida da culatra pode ser considerada como tendo a mesma seção da coluna do núcleo. Mas, por se tratar de um transformador de distribuição este sofre desequilíbrios entre as fases freqüentemente. Este desequilíbrio é devido à corrente da carga podendo ser referente ao módulo da corrente, seu ângulo ou ambos. Assim adota-se uma seção para a culatra 15% maior que a seção da coluna do núcleo, como se observa na equação (3-12).

$$A_{feL-CUL} = 1,15 \cdot A_{feCOL} \quad (3-12)$$

Sendo,  $A_{feL-CUL}$  a área líquida do material magnético da culatra em  $cm^2$ ,  $A_{feL-COL}$  a área líquida do material magnético da coluna em  $cm^2$ .

### 3.5.4 Indução da Culatra

Por ter uma área maior que a coluna, a culatra terá outro valor de indução. Assim deve-se fazer o cálculo desta indução através da equação (3-2) abaixo.

$$B_{CUL} = \frac{E_1}{4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot A_{feL-CUL}} \quad (3-13)$$

Sendo,  $B_{CUL}$  a indução magnética na culatra em G,  $A_{feL-CUL}$  a área líquida do material magnético da culatra em  $cm^2$ ,  $E_1$  a tensão induzida no primário em V,  $N_1$  o número de espiras do primário e  $f$  frequência em Hz.

Este cálculo é necessário, pois a perda do material magnético depende da indução magnética máxima à qual ele está sendo submetido.

### 3.5.5 Fluxo Magnético

O fluxo magnético do núcleo do transformador é dado pela equação (3-14) abaixo, onde os parâmetros desta equação já foram apresentados acima.

$$\phi = B_{COL} \cdot A_{feL-COL} \quad (3-14)$$

Sendo,  $\phi$  o fluxo magnético em Mx,  $B_{COL}$  a indução magnética na coluna em G e  $A_{feL-COL}$  a área líquida do material magnético da coluna em  $cm^2$ .

### 3.5.6 Seção Bruta do Núcleo

As chapas de aço silício são cobertas por uma camada de isolante. Este isolante não tem capacidade de condução de fluxo, porém, assim como outros que por ventura venham a ser inseridos na região do núcleo devem ser acrescidos à área do núcleo. Assim a área total ocupada pela coluna passa a ser a seção bruta e calculada pela equação (3-15), abaixo.

$$A_{feB} = \frac{A_{feL}}{k_e} \quad (3-15)$$

Sendo,  $A_{feB}$  a área bruta do material magnético da coluna em  $\text{cm}^2$ ,  $A_{feL}$  a área líquida do material magnético da coluna em  $\text{cm}^2$  e  $k_e$  é o fator de empacotamento ou empilhamento e seu valor corresponde à quantidade de aço presente na área ocupada pelas chapas na coluna ou culatra.

### 3.5.7 Seção Circular Circunscrita

A seção circular circunscrita nada mais é que a área correspondente à seção circular do núcleo. A seção Bruta calculada acima corresponde à área ocupada pelas chapas, porém devido ao arranjo das chapas utilizando-se degraus faz com que se tenham espaços vazios na área do núcleo. Assim, esta área nada mais é que o cálculo da área da circunferência da qual o núcleo está circunscrito. Esta é calculada através da equação (3-16) abaixo.

$$S_0 = \frac{A_{feB}}{k_u} \quad (3-16)$$

Sendo,  $S_0$  a seção circular circunscrita em  $\text{cm}^2$ ,  $A_{feB}$  a área bruta do material magnético da coluna em  $\text{cm}^2$ , e  $k_u$  é o fator de utilização.

### 3.5.8 Diâmetro

A partir da área da circunferência obtida da equação (3-16) acima se calcula facilmente o diâmetro do núcleo. Este diâmetro é importante para o cálculo de vários outros parâmetros, principalmente dimensionais.

$$D_{núcleo} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \quad (3-17)$$

Sendo,  $D_{núcleo}$  o diâmetro do núcleo em  $\text{cm}$  e  $S_0$  a seção circular circunscrita em  $\text{cm}^2$ .

A partir do diâmetro do núcleo e dados dimensionais dos enrolamentos podem-se obter outros dados do núcleo como, por exemplo, a largura da janela do núcleo a distância entre os centros das colunas, a altura da janela do núcleo a área da janela

do núcleo, o volume do núcleo e o comprimento médio do caminho do fluxo pelo núcleo.

### 3.5.9 Massa das Colunas e Culatras

A massa das colunas e culatras é calculada utilizando o volume do núcleo e multiplicando-o pela densidade do material ferro-magnético. A partir daí será possível calcular as perdas do núcleo como será visto mais a frente. As equações utilizadas para o cálculo das massas são as equações (3-18) e (3-19) abaixo.

A equação (3-18) traz o cálculo da massa das colunas.

$$M_{COL} = 3 \cdot H_{janela} \cdot A_{feL-COL} \cdot \gamma_{Fe} \quad (3-18)$$

Sendo,  $M_{COL}$  a massa da coluna em kg,  $H_{janela}$  a altura da janela do núcleo em mm,  $A_{feL-COL}$  a área líquida do material magnético da coluna em  $cm^2$ , e  $\gamma_{Fe}$  o peso específico das lâminas de aço em  $kg/dm^3$ .

Já a equação (3-19) traz o cálculo da massa das culatras.

$$M_{CUL} = C_{CUL} \cdot A_{feL-CUL} \cdot \gamma_{Fe} \quad (3-19)$$

Sendo,  $M_{CUL}$  a massa da culatra em kg,  $C_{CUL}$  o comprimento da culatra em mm,  $A_{feL-CUL}$  a área líquida do material magnético da culatra em  $cm^2$ , e  $\gamma_{Fe}$  o peso específico das lâminas de aço em  $kg/dm^3$ .

### 3.5.10 Massa Total do Núcleo

Após o cálculo das massas das colunas e das culatras a obtenção da massa total do aço a ser utilizado no núcleo é obtida pela equação (3-20). Este dado é fundamental para se calcular as perdas em vazio e o custo do núcleo que compõe o custo total do transformador.

$$M_{núcleo} = M_{col} + M_{cul} \quad (3-20)$$

Sendo,  $M_{núcleo}$  a massa total do núcleo em kg,  $M_{COL}$  a massa da coluna em kg e  $M_{CUL}$  a massa da culatra em kg.

Capítulo 4

---

# Projeto dos Enrolamentos

## 4.1 Considerações Iniciais

Os enrolamentos ou bobinas de um transformador são considerados a parte mais importante do equipamento e a que requer maior cuidado durante o projeto. A vida útil de um transformador esta diretamente relacionada à vida útil de suas bobinas. Suas características elétricas e mecânicas devem ser capazes de resistir à temperatura de operação compatível com sua classe de temperatura, aos esforços de curto-circuito e transitórios elétricos e seu isolamento deve suportar os níveis de tensão de sua classe de tensão. As bobinas são também a parte integrante do transformador de maior custo de fabricação devido ao valor de sua matéria prima.

## 4.2 Tipos de Bobinas

Normalmente as bobinas são enroladas sobre um cilindro isolante que lhe serve de base. Esses cilindros podem ser de papelão prensado, de pura celulose tipo presspahn ou Weidmann.

Fundamentalmente existem três tipos de bobinas:

- Bobina helicoidal:

É o tipo de enrolamento mais utilizado para baixa tensão e altas correntes. Ela é formada pelo condutor enrolado em forma de espiral em uma única camada, iniciando-se em um dos lados do enrolamento e terminando no outro, sem sobreposição dos condutores como na Figura 4-1(a). Este enrolamento pode ser bobinado diretamente sobre um cilindro isolante ou ter espaçadores entre eles para que se tenham canais de óleo para a refrigeração. Devido ao nível de corrente, vários condutores podem ser utilizados em paralelo para ampliar a capacidade de condução de corrente.

- Em camadas:

Nas bobinas em camadas, com fio de seção circular ou retangular, normalmente, é usado um cilindro isolante de base também chamado de molde, como ocorre nos transformadores de distribuição com este tipo de enrolamento. O enrolamento em camadas é construído praticamente de forma igual ao helicoidal. A grande diferença é a presença de várias camadas. Em cada camada o sentido de enrolamento do condutor se inverte do topo para a base e vice-versa mantendo-se o sentido horário ou anti-horário do

enrolamento até o término da última camada, como na Figura 4-1(b). Este enrolamento é geralmente empregado para enrolamentos de alta tensão e feito para uma grande gama de níveis de corrente. Os esforços radiais durante o curto circuito são maiores neste tipo de enrolamento do que no helicoidal. Entre as camadas deve haver um isolamento que suporte as tensões de ensaio correspondente a duas camadas. Esse tipo de bobina encontra limitações no isolamento entre camadas e na refrigeração sendo necessários cuidados específicos durante o projeto.

- Em discos:

O enrolamento em discos começa a ser empregado quando o enrolamento helicoidal deixa de ser economicamente viável com o aumento da tensão e diminuição da corrente. Este é utilizado para os mesmos níveis de tensão que o enrolamento em camadas. O enrolamento em discos é feito enrolando certo número de discos de forma alternada de dentro para fora e de fora para dentro sendo conectados em série, como na Figura 4-1(c).

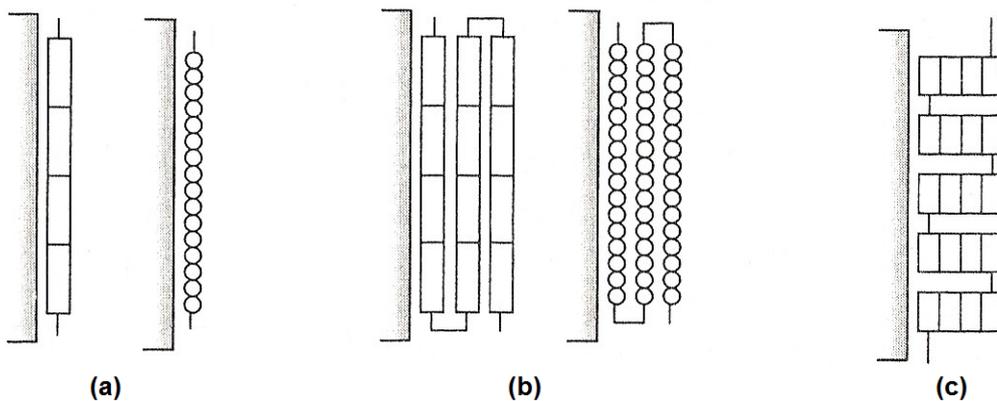


Figura 4-1 – Tipos de enrolamentos [1]

Quanto à disposição das bobinas os enrolamentos podem ser:

- Concêntricos:

Neste arranjo de bobinas, duas bobinas de enrolamentos diferentes, enrolamento de alta e baixa tensão, por exemplo, são alinhadas e dispostas umas sobre as outras de forma centralizada como já mostrado na Figura 3-3a.

- Intercalados ou em panquecas:

Neste tipo de arranjo de bobinas os enrolamentos são colocados de forma intercalada. Assim, tem-se uma bobina, por exemplo, de alta tensão ao lado de

uma bobina de baixa tensão intercalando-se desta forma até o fim do enrolamento havendo uma distribuição das bobinas, ou partes delas ao longo da coluna do núcleo não havendo sobreposição como na Figura 3-3b. As bobinas em panquecas podem ser feitas sem cilindro de base, pois, normalmente, elas são enfaixadas com tiras de papel Kraft ou impregnadas em verniz isolante para proporcionarem uma boa rigidez mecânica. O isolamento entre camadas é feito com papel Kraft. As bobinas em panquecas são mais bem refrigeradas pelo óleo que pode também circular nos intervalos entre as panquecas separadas por espaçadores vazados.

A escolha do tipo de bobina deve levar em consideração diversos fatores tais como:

- A distribuição de tensão ao longo de todo o enrolamento;
- Perdas adicionais;
- A rigidez mecânica para suportar curtos-circuitos;
- A disposição geométrica para facilitar a construção e as ligações;
- O custo de fabricação.

### 4.3 O Condutor

Existem vários formatos de condutores que podem ser utilizados nos enrolamentos de transformadores. A seleção da forma depende da necessidade de tensão e corrente. A escolha de cada tipo de condutor depende da necessidade de características específicas de cada formato para atender às especificações do projeto. Os tipos de condutores são:

- Condutores circulares:

São utilizados para bobinas com níveis de corrente reduzidos. A capacidade de se acomodar e de se distribuir ocupando melhor o espaço não é tão boa quanto os outros tipos de condutores. Condutores circulares são utilizados principalmente em transformadores de distribuição devido à baixa potência destes, quando comparado a transformadores de transmissão. São utilizados principalmente quando existem tensões elevadas e baixas correntes.

- Condutores retangulares:

São utilizados para altas correntes principalmente nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores de distribuição ou nos enrolamentos dos transformadores de potência. Devido a seu formato, se distribuem igualmente com facilidade ocupando os espaços reservados ao enrolamento de melhor forma que os condutores circulares.

- Chapas:

São utilizadas chapas de cobre ou alumínio principalmente em transformadores de distribuição e transformadores de potência menores. Ocupa o espaço reservado ao enrolamento da melhor forma possível. Possui a melhor distribuição de tensão entre camadas, pois cada camada corresponde a uma espira. Possui boa qualidade térmica devido à grande área superficial das espiras para troca de calor.

Normalmente, usa-se a forma circular até a seção de  $8\text{mm}^2$ , acima da qual é usada a forma retangular comum ou diversos condutores em paralelo. O condutor da seção retangular deve sempre ser disposto de modo a reduzir as perdas parasitas, isto é, com a menor dimensão no sentido perpendicular ao fluxo de dispersão. Até o limite, aproximadamente, de  $100\text{mm}^2$  de seção, as bobinas podem ser construídas com um só condutor. Acima deste limite, são usados condutores em paralelo, quer por facilidade mecânica de construção das bobinas, quer para manter as perdas parasitas dentro dos limites aceitáveis [1].

Igualmente, condutores retangulares com dimensões elevadas no sentido axial podem gerar excessivas perdas parasitas nas cabeceiras das bobinas onde o fluxo de dispersão se torna, em parte, transversal atravessando o condutor no sentido radial.

Com o uso de condutores em paralelo, surge a necessidade de se fazer transposições entre eles. Todos os condutores em paralelo devem ter depois de feita uma bobina, o mesmo comprimento e devem ocupar, relativamente ao fluxo disperso, todas as posições, no sentido radial, em igual número de vezes. Com isso, garante-se que todos os condutores em paralelo tenham a mesma resistência ôhmica e a mesma reatância de dispersão. Desse modo, a corrente que circula pelas espiras da bobina se distribui igualmente entre os condutores em paralelo e não há corrente circulante entre eles.

Os condutores de seção circular são, em geral, isolados com uma, duas ou três camadas de esmalte, ou ainda, papel, seda ou fibra de vidro. Os condutores retangulares são, geralmente, isolados com fitas de papel e/ou esmalte. A espessura do isolamento depende das solicitações dielétricas nos enrolamentos para altas tensões. Para bobinas de baixa tensão o fator determinante, para dimensionar a espessura do isolamento, é a resistência mecânica à abrasão.

As solicitações dielétricas não são somente aquelas de operação normal, mas, sobretudo, aquelas que se originam das sobretensões nos transformadores, quer em operação, quer nos ensaios de laboratório que simulam as possíveis ocorrências em operação.

A norma brasileira NBR5356 especifica os níveis de tensão para cada um dos ensaios acima em função da classe de tensão do projeto do transformador. Deste modo, tanto os condutores, como as demais partes sob tensão do transformador, devem ser isolados de modo a suportarem as solicitações decorrentes dos ensaios mencionados.

O material mais utilizado para o condutor é o cobre eletrolítico produzido por laminação e trefilação ou por extrusão. O condutor deve ser liso, sem rebarba, e limpo por decapagem. Quando o condutor for de seção retangular, deve apresentar os seus cantos arredondados a fim de diminuir os gradientes de potencial e evitar o corte do material isolante.

#### **4.4 Montagem**

As bobinas durante o enrolamento são prensadas contra as culatras através de calços vazados ou maciços e isolantes. Na bobina de AT em camadas, o isolamento é formado pelo isolamento entre camadas, que se sobressai do enrolamento a fim de criar um caminho superficial maior entre as camadas, e pelos calços de prensagem da bobina. Entre o isolamento, que sobressai do enrolamento, são colocadas tiras de papelão presspahn, com espessuras iguais ao do diâmetro do fio condutor, coladas com verniz isolante, de modo a tornar toda a cabeceira bastante compacta.

Devido à umidade absorvida pelo material isolante, as bobinas devem ser tratadas em estufa antes de montadas sobre o núcleo. Este tratamento se realiza em temperaturas de 90 a 100°C e durante 24 a 36 horas. Quando em tratamento de secagem, as bobinas devem estar prensadas entre duas placas de ferro, sendo

preferível que a tensão de prensagem permaneça ativa à medida que a bobina vai perdendo umidade.

Dependendo do grau de umidade do ambiente, o papel e o papelão isolante, bem como a madeira, podem absorver água até 10% de seu peso. Ambientes muito úmidos são, pois, desaconselháveis para operações de bobinagem e enrolamento de bobinas de transformadores, principalmente quando se trata de transformadores para altas tensões que possuam grande quantidade de material isolante.

#### 4.5 Cálculo do Enrolamento de Baixa Tensão

A seção do condutor de baixa tensão faz parte de um conjunto de dados estimados necessário para o cálculo do transformador. Esta estimativa inicial deve, porém ter alguma lógica. Projetistas que trabalham já há algum tempo na área tem uma boa noção devido à experiência de qual deve ser o melhor condutor para iniciar o cálculo. Porém pode-se utilizar como estimativa, por exemplo, a capacidade de condução de corrente do condutor à temperatura de operação do transformador. Dependendo do resultado final do projeto este item pode ser alterado devido à necessidade de se chegar a um resultado melhor.

No enrolamento de baixa tensão, geralmente, é empregado o condutor retangular. Assim, o próximo passo após a escolha da seção inicial é definir qual será a espessura e largura do condutor para o enrolamento de baixa tensão. Estes dados podem ser retirados da norma NBR 14193 – Fio de Cobre Nu de Seção Retangular – Especificação. Deve-se escolher o condutor com uma seção aproximada à desejada. A largura varia de 2,0 mm a 16,0 mm enquanto a espessura 0,8 mm a 5,6 mm.

A corrente do secundário pode ser facilmente calculada pela equação (4-1) amplamente conhecida.

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3}V_2} \quad (4-1)$$

Sendo,  $I_2$  a corrente no secundário em A,  $S_N$  a potência nominal em VA e  $V_2$  a tensão aplicada na bobina do secundário em V.

A densidade de corrente do enrolamento do secundário nada mais é que a representação da quantidade de corrente que atravessa o condutor por unidade de

área. A densidade de corrente do condutor do secundário é dada pela equação (4-2) abaixo.

$$d_2 = \frac{I_2}{S_{cond_2}} \quad (4-2)$$

Sendo,  $d_2$  a densidade de corrente no secundário em A/mm<sup>2</sup>,  $I_2$  a corrente no secundário em A,  $S_{cond_2}$  a seção do condutor do enrolamento secundário em mm<sup>2</sup>.

Como já foi dito acima, através de equação (3-3) pode-se encontrar agora facilmente o número de espiras do secundário. Depois de reorganizada para isolar  $n_2$  obtemos a equação (4-3).

$$n_2 = \frac{V_2 / \sqrt{3}}{4,44 \cdot f \cdot \phi} \quad (4-3)$$

Sendo,  $n_2$  o número de espiras do secundário,  $V_2$  a tensão no secundário em V,  $f$  a frequência em Hz e  $\phi$  o fluxo magnético do núcleo em Mx.

O valor encontrado deve ser arredondado para o número inteiro mais próximo. Isto por que não existe a possibilidade de se construir uma espira sem que ela seja uma volta completa.

Após isto é calculado o número de espiras por camada simplesmente dividindo-se o número total de espiras calculado pelo número de camadas, como se pode ver na equação (4-4) abaixo.

$$n_{espcam\ 2} = \frac{n_2}{n_{cam\ 2}} \quad (4-4)$$

Sendo,  $n_{espcam2}$  o número de espiras por camada do secundário,  $n_2$  o número de espiras do secundário e  $n_{cam2}$  o número de camadas do secundário.

Com as características elétricas já calculadas, é necessário agora calcular as dimensões físicas da bobina do secundário. As dimensões físicas do secundário tem impacto direto no enrolamento primário, pois este é construído sobre o enrolamento secundário e deve obedecer às dimensões deste.

Entre as características físicas a serem calculadas deve-se primeiramente se calcular a altura do enrolamento do secundário. Esta altura corresponde à altura

somente dos condutores que compõem as espiras do enrolamento, sendo calculada de forma simples pela equação (4-5) abaixo.

$$H_{Enrol2} = n_{espcam2} \cdot Esp_{cond2} \quad (4-5)$$

Sendo,  $H_{Enrol2}$  a altura do enrolamento secundário em mm,  $n_{espcam2}$  número de espiras por camada do secundário e  $Esp_{cond2}$  a espessura do condutor do secundário em mm.

A altura da cabeceira da bobina pode ser encontrada em gráficos, tabelas de fabricantes e livros técnicos da área. Um destes gráficos é apresentado na Figura 4-2. A partir dele pode se estimar o tamanho da cabeceira necessária para se isolar as camadas. Para isto basta considerar como aproximação o valor da tensão entre camadas e de posse deste valor procurar qual a distância necessária para isolar as camadas. Assim divide-se por dois a distância encontrada no gráfico e terá o tamanho da cabeceira da bobina.

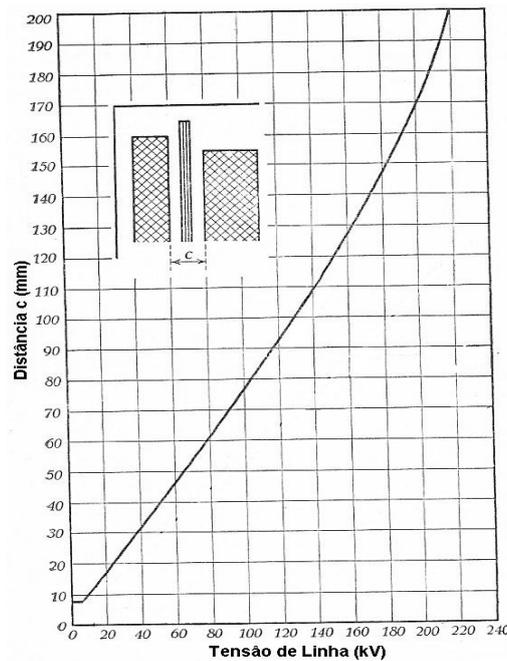


Figura 4-2 – Distância para cálculo da cabeceira e distância entre enrolamentos [2]

A altura da bobina é a altura do enrolamento mais a cabeceira como mostra a equação (4-6).

$$H_{bobina} = H_{Enrol2} + 2 \cdot H_{cabeceira2} \quad (4-6)$$

Sendo,  $H_{bobina}$  a altura da bobina em mm,  $H_{Enrol2}$  a altura do enrolamento secundário em mm e  $H_{cabeceira2}$  a altura da cabeceira do enrolamento secundário em mm.

A altura do calço de modo análogo à cabeceira também pode ser obtido com o auxílio de gráficos como o da Figura 4-3.

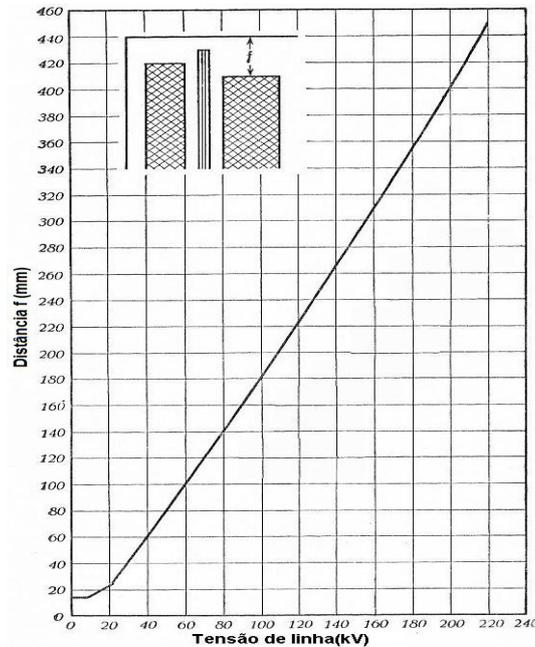


Figura 4-3 – Gráfico para determinação da altura do calço [2]

A altura mínima da janela do núcleo é dada pela equação (4-7):

$$H_{janela} = 2 \cdot H_{calço} + H_{bobina} \quad (4-7)$$

Sendo,  $H_{janela}$  a altura da janela do núcleo em mm,  $H_{bobina}$  a altura da bobina em mm, e  $H_{calço}$  a altura do calço da bobina em mm.

O comprimento da espira média do secundário é dado pela equação (4-8):

$$l_{esp\ med\ 2} = 2\pi \left( \frac{D_{Ext2} - Esp_2}{2} \right) \quad (4-8)$$

Sendo,  $l_{esp\ med\ 2}$  o comprimento médio da espira do enrolamento secundário em mm,  $D_{Ext2}$  o diâmetro externo do enrolamento secundário em mm e  $Esp_2$  a espessura do enrolamento secundário em mm.

Por fim a massa total do material do condutor utilizado nesta bobina é calculada através do volume do material e sua densidade, como apresentado pela equação (4-9).

$$M_{cond2} = n_2 \cdot l_{espmed2} \cdot S_{cond2} \cdot \gamma_{cond2} \quad (4-9)$$

Sendo,  $M_{cond2}$  a massa do enrolamento secundário em kg,  $l_{espmed2}$  o comprimento médio da espira do enrolamento secundário em mm,  $S_{cond2}$  a seção do condutor do enrolamento secundário em mm<sup>2</sup>,  $n_2$  o número de espiras do enrolamento secundário e  $\gamma_{cond2}$  o peso específico do material condutor do enrolamento secundário em kg/mm<sup>3</sup>.

#### 4.6 Cálculo do Enrolamento de Alta Tensão

A seção do condutor de alta tensão, assim como a seção do condutor de baixa tensão, também deve ser estimada fazendo parte do conjunto de dados necessários para o cálculo do transformador. No enrolamento de alta tensão, geralmente, é empregado o condutor circular esmaltado. Porém, quando se tem correntes elevadas nos enrolamentos de alta tensão, o que traz a necessidade de seções maiores, o condutor retangular passa a ser mais indicado. Os dados sobre estes condutores podem ser retirados de normas específicas para cada fio esmaltado. No caso de condutores circulares utiliza-se, usualmente, a escala AWG para especificar a bitola do condutor. Nas normas específicas deste tipo de condutor podem-se encontrar, além da seção do condutor isolado, os diâmetros do condutor nu e isolado.

Retirando-se da norma ou folha de dados do fabricante o diâmetro do condutor nu, o próximo passo será encontrar o valor da sua seção. O que é feito através da equação (4-10) abaixo.

$$S_{cond1nu} = \pi \cdot \sqrt{\frac{D_{cond1nu}}{2}} \quad (4-10)$$

Sendo,  $S_{cond1nu}$  a seção do condutor nu do primário em mm<sup>2</sup> e  $D_{cond1nu}$  o diâmetro do condutor nu do primário em mm.

Outra característica importante e de simples cálculo é a relação de transformação. A relação de transformação, como o próprio nome diz, nada mais é que a relação entre o valor da tensão do primário e tensão do secundário, como se pode observar na equação (4-11).

$$k_t = \frac{V_1}{V_2} \quad (4-11)$$

Sendo,  $k_t$  a relação de transformação,  $V_1$  a tensão aplicada na bobina do primário em V e  $V_2$  a tensão aplicada na bobina do secundário em V.

Como é sabido, a relação de transformação também é válida para a relação entre a corrente do primário e do secundário, porém de forma inversa à aplicada para a tensão. Assim de posse da relação de transformação e da corrente do secundário calculada através da equação (4-1) utilizando-se da equação (4-12) encontra-se a corrente do primário.

$$I_1 = \frac{I_2}{k_t} \quad (4-12)$$

Sendo,  $k_t$  a relação de transformação,  $I_1$  a corrente no enrolamento primário em A e  $I_2$  a corrente no enrolamento secundário em A.

Para o valor da distancia de isolamento entre os enrolamentos do secundário e do primário deve-se utilizar o gráfico apresentado na Figura 4-2.

Para o cálculo da densidade de corrente do enrolamento primário, da mesma forma que para o secundário através da equação (4-2), basta encontrar a relação entre o a quantidade de corrente pela área do condutor através da equação (4-13).

$$d_1 = \frac{I_1 / \sqrt{3}}{S_{cond1nu}} \quad (4-13)$$

Sendo,  $d_1$  a densidade de corrente no primário em A/mm<sup>2</sup>,  $I_1$  a corrente no primário em A e  $S_{cond1nu}$  a seção do condutor nu do enrolamento primário em mm<sup>2</sup>.

O cálculo do número de espiras do primário para o transformador é feito utilizando a equação (4-14) abaixo:

$$n_1 = \frac{n_2 \cdot V_1}{V_2 / \sqrt{3}} \quad (4-14)$$

Sendo,  $n_1$  o número de espiras do primário,  $n_2$  o número de espiras do secundário,  $V_1$  a tensão no primário em V e  $V_2$  a tensão no secundário em V.

Como a altura da janela do núcleo já foi definida, é a partir deste valor que se encontra a altura do enrolamento primário. Para tal, basta descontar as estruturas existentes dentro da janela do núcleo, mas que não fazem parte do enrolamento propriamente dito.

Este dado da altura do enrolamento é importante para se definir qual a quantidade de espiras haverá por camada no enrolamento primário. Isto é feito pela equação (4-15).

$$n_{\text{espcam1}} = \frac{H_{\text{Enrol1}}}{D_{\text{cond1iso}}} \quad (4-15)$$

Sendo,  $n_{\text{espcam1}}$  o número de espiras por camada do primário,  $H_{\text{Enrol1}}$  a altura do enrolamento primário em mm e  $D_{\text{cond1iso}}$  o diâmetro do condutor isolado do primário em mm.

A partir deste ponto, determinar o número de camadas do enrolamento primário passa a ser simples. O número de camadas do enrolamento primário é obtido pela equação (4-16) a seguir:

$$n_{\text{cam1}} = \frac{n_1}{n_{\text{espcam1}}} \quad (4-16)$$

Sendo,  $n_{\text{cam1}}$  o número de camadas do primário,  $n_{\text{espcam1}}$  o número de espiras por camada do primário e  $n_1$  o número de espiras do primário.

Outras características como, por exemplo, espessura do enrolamento primário, diâmetro interno e externo do enrolamento são calculados por análise das dimensões do transformador.

O comprimento médio da espira primária é um dado importante para o cálculo das perdas, pois através deste é calculado o volume e peso dos enrolamentos. Uma das formas de se encontrar o comprimento médio da espira é utilizando a equação (4-17).

$$l_{\text{espméd1}} = 2 \cdot \pi \left( \frac{D_{\text{Ext1}} - \text{Esp}_1}{2} \right) \quad (4-17)$$

Sendo,  $l_{\text{espméd1}}$  o comprimento médio da espira do enrolamento primário em mm,  $D_{\text{Ext1}}$  o diâmetro externo do enrolamento primário em mm e  $\text{Esp}_1$  a espessura do enrolamento primário em mm.

A massa do material condutor utilizado na bobina do primário é calculada através da mesma equação utilizada para o cálculo da massa da bobina do secundário, equação (4-9), com as características encontradas até o momento para a bobina do primário, como se segue.

$$M_{cond1} = n_1 \cdot l_{espmed1} \cdot S_{cond1} \cdot \gamma_{cond1} \quad (4-18)$$

Sendo,  $M_{cond1}$  a massa do enrolamento primário em kg,  $l_{espmed1}$  o comprimento médio da espira do enrolamento primário em mm,  $S_{cond1}$  a seção do condutor do enrolamento primário em mm<sup>2</sup>,  $n_1$  o número de espiras do enrolamento primário e  $\gamma_{cond1}$  o peso específico do material condutor do enrolamento primário em kg/mm<sup>3</sup>.

## 4.7 Massa Total dos Enrolamentos

Para se ter a massa total dos enrolamentos, basta somar a massa já calculada pelas equações (4-9) e (4-18) como se observa na equação (4-19) abaixo:

$$M_{cond} = M_{cond1} + M_{cond2} \quad (4-19)$$

Sendo,  $M_{cond}$  a massa total dos enrolamentos em kg,  $M_{cond1}$  a massa do enrolamento primário em kg e  $M_{cond2}$  a massa do enrolamento secundário em kg.

Capítulo 5

---

## Cálculo das Perdas

## 5.1 Considerações Iniciais

Um transformador ideal seria um transformador sem perdas de energia e, portanto, 100% eficiente. Todavia na prática, parte da energia transformada é dissipada nos enrolamentos, núcleo e estruturas adjacentes. Grandes transformadores são geralmente mais eficientes e em geral tem rendimento maior do que 99%. [6]

Transformadores experimentais, utilizando enrolamentos supercondutores alcançam rendimentos de 99,85% [7]. Um aumento na eficiência dos transformadores do sistema elétrico nacional é capaz de gerar uma economia de energia considerável, o que resulta na redução da necessidade de se construir novas usinas de geração de energia.

## 5.2 Perdas Magnéticas

A passagem de corrente pelos enrolamentos dá origem a um campo magnético induzido alternado. A intensidade deste campo magnético é proporcional à corrente que o gerou. Assim com a variação da corrente temos também a variação da intensidade do campo magnético. Isto ocasiona uma alteração no módulo do fluxo magnético ou da indução magnética.

Tais variações se dão respeitando a curva de saturação do material ferromagnético no qual foi gerado o campo. Para cada inversão no sentido de variação do campo magnético temos um momento em que a intensidade de campo se anula. Em um metal sujeito a um campo magnético alternado, os átomos se reorientam para estar alinhados com o campo magnético formando pequenos ímãs, chamados dipolos magnéticos. Quando o campo alternado se anula, os átomos retornam à mesma orientação que tinham antes de receberem a aplicação do campo magnético. O movimento dos átomos causa atrito molecular que resulta na geração e liberação de calor e é chamada de perda por histerese [4].

Esta energia é consumida para cada inversão no sentido de orientação dos dipolos. A área compreendida pelo ciclo de histerese corresponde à perda elétrica do equipamento. Ao final de um ciclo completo da intensidade de campo e da indução magnética correspondente temos o desenho do ciclo de histerese sobre o qual o equipamento irá operar.

As perdas por histerese dependem da indução magnética ao qual o material ferro magnético do núcleo esta sendo submetido. Assim, quanto maior a indução magnética maiores são as perdas por histerese. Porém, à medida que a indução magnética tende à saturação, as perdas por histerese tendem também à saturação, pois pouco cresce a área do laço após um determinado valor de indução. Tudo isso é válido para as perdas por histerese produzidas por fluxo pulsante como ocorre nos núcleos de transformadores. Nas máquinas rotativas, em algumas partes do circuito magnético, as induções nos materiais variam sob a ação de um campo girante. As perdas por histerese, neste caso, são diferentes daquelas produzidas por campos pulsantes, para os mesmos valores máximos de indução. Sob a ação de campos girantes muito intensos, que levam o material à saturação, as perdas tendem a ser nulas[1].

As perdas por histerese podem ser expressas através da equação (5-1) a seguir, para uma pequena faixa de variação da frequência.

$$p_H = k_H \cdot f \cdot B^x \quad (5-1)$$

Sendo,  $p_H$  a perda específica por histerese em W/kg,  $k_H$  coeficiente de perdas por histerese proporcional à superfície do ciclo de histerese [2],  $f$  a frequência em Hz,  $B$  a indução magnética máxima em T e  $x$  coeficiente que depende do material.

Na equação (5-1) o índice  $x$  varia de 0,5 até 2,3. Desta equação nota-se que a perda por histerese é linearmente proporcional à frequência. Assim, com o aumento da frequência aumenta-se o valor da perda por histerese. Desta forma, um transformador alimentando uma carga geradora de harmônicos terá sua eficiência reduzida. Mas a histerese não é a perda mais afetada pela presença de harmônicos.

### 5.3 Perdas Foucault

As perdas parasitas ou por correntes de Foucault se originam pelas correntes que são induzidas no material pelo fluxo gerado pela corrente que atravessa o enrolamento. Estas corrente induzidas surgem devido ao fato do material magnético ser também condutor. Neste material existem estruturas que podem formar um pequeno circuito fechado, como uma espira, no qual, ao ser atravessado pelo fluxo presente no núcleo, é induzida uma corrente chamada de corrente parasita ou corrente de Foucault. O material do núcleo como todo material condutor possui uma resistividade. Assim, neste circuito percorrido pela corrente parasita existe uma

resistência elétrica presente sendo responsável pelo consumo de energia pelo efeito Joule.

As perdas por Foucault podem ser expressas através da equação (5-2) a seguir.

$$p_F = k_F \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{ef}^2 \quad (5-2)$$

Sendo,  $p_F$  a perda específica por Foucault em W/kg,  $k_F$  coeficiente de perdas por Foucault inversamente proporcional à resistividade do ferro [2],  $f$  a frequência em Hz,  $B$  a indução magnética eficaz em T e  $t$  a espessura do material em mm.

Na equação (5-2) nota-se que a perda Foucault é proporcional à frequência de forma quadrática. Assim, com o aumento da frequência aumenta-se o valor da perda Foucault de uma forma muito mais acentuada do que ocorre na perda por histerese. Um transformador alimentando uma carga geradora de harmônicos também terá sua eficiência reduzida pela perda Foucault.

Também se conclui que quanto maior a resistividade do material do núcleo menor será a perda Foucault. Da mesma forma, quanto mais fina for a chapa do material menor será a perda.

#### 5.4 Perdas e Corrente de Excitação

A perda em vazio de um transformador é constante, independente da corrente de carga que normalmente é bastante variável durante o dia. Sob este ponto de vista, cada kW nominal de perda em vazio tem um custo maior do que um kW nominal de perda sob carga, pois o valor nominal da perda em vazio está presente durante as 24 horas enquanto a perda em carga nominal ocorrerá somente quando o transformador estiver a plena carga. Este é um fator que deve ser levado em consideração na compra de um transformador.

O desenvolvimento de chapas magnéticas para uso na construção de máquinas elétricas reduziu muito as perdas e a corrente de excitação destes equipamentos.

Basicamente, as chapas magnéticas de máquinas elétricas podem ser classificadas em:

- Chapas de grão não orientado (GNO): são normalmente laminadas a quente e possuem propriedades magnéticas iguais em todas as direções no plano da chapa.
- Chapas de grão orientado (GO): possuem propriedades magnéticas superiores no sentido de laminação. Estas chapas são laminadas a frio que, por um processo especial de laminação e recozimentos, associados a uma composição química adequada, adquirem propriedades magnéticas acentuadamente superiores no sentido da laminação, em detrimento de suas propriedades no sentido perpendicular.

Outro tipo de material que vem sendo utilizado em escala comercial atualmente são as fitas de metal amorfo. Este material, apesar de possuir um custo significativamente maior quando comparado às chapas de aço de grão orientado, ganha espaço no mercado devido a suas características magnéticas. O material amorfo tem o ciclo de histerese menor quando comparado ao aço silício o que lhe traz como vantagem uma perda relativamente baixa.

A fim de aumentar a permeabilidade magnética e diminuir as perdas, as chapas magnéticas possuem de 3% a 5% de silício, Figura 3-1.

Para núcleos de transformadores de distribuição e de transmissão são utilizadas chapas de grão orientado, M-3, M-4, M-5, M-6 e M-7 com espessuras de 0,18 a 0,35 e cobertas com uma finíssima camada de isolante de material inorgânico, material este que pode suportar temperaturas de recozimento da chapa de, aproximadamente, 850°C.

Os fabricantes destes materiais fornecem todas as curvas de características magnéticas necessárias para o cálculo das perdas e correntes de excitação. Exemplos destas curvas são dados nas Figura 5-1 e Figura 5-2 [1], abaixo.

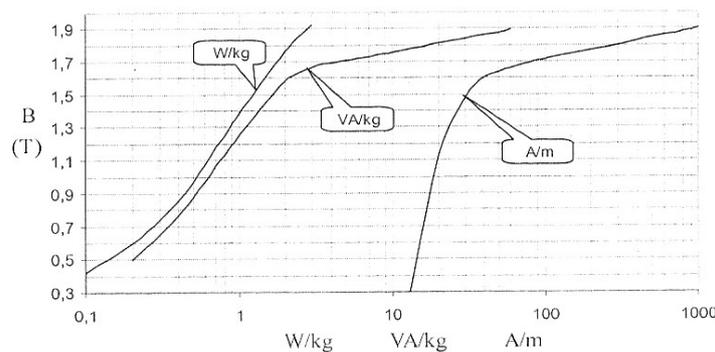


Figura 5-1 – Características magnéticas chapa M5 sentido do grão [1]

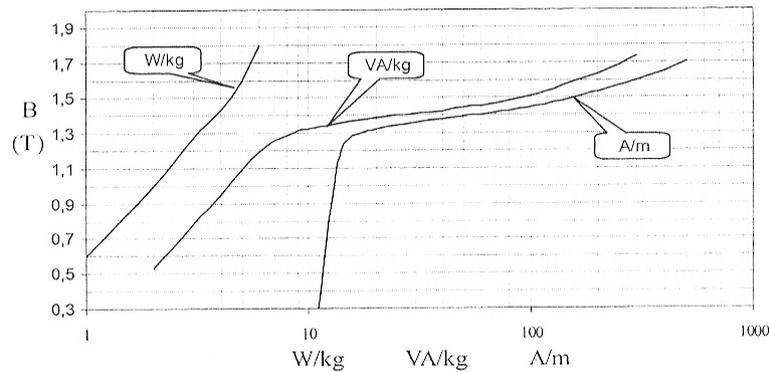


Figura 5-2 – Características magnéticas aço M5 sentido perpendicular ao grão [1]

## 5.5 Cálculo da Corrente de Excitação

O ponto de partida para o cálculo da corrente de excitação é a fixação da indução máxima “B”, admitida para a chapa magnética que é utilizada na construção do núcleo do transformador. Esta indução é escolhida nas proximidades do joelho da curva de magnetização  $H \times B$ , de modo que a corrente de excitação não ultrapasse o valor específico para o transformador.

Os fabricantes de chapas para construção de núcleos fornecem a indução em função da intensidade de campo eficaz, isto é, em função dos ampères-espiras por metro referentes à corrente de excitação “ $I_0$ ” eficaz. Desta forma pode se, através da curva, obter a corrente de excitação do transformador. A indução, no entanto se refere ao valor máximo.

Dado o valor da indução “B”, determina-se na curva de magnetização, o valor da intensidade de campo “H” em A/m eficazes. A “fmm”, em ampères-espiras (AE), necessária para fazer circular um fluxo com densidade de campo igual à indução “B”, num circuito magnético de seção constante igual a “ $A_{fe}$ ” e o comprimento “ $l_{fe}$ ”, serão dados pela equação (5-3), em que a corrente “ $I_0$ ” é a corrente eficaz de excitação, que é a soma da corrente eficaz de magnetização e da corrente eficaz de perdas.

$$fmm = n \cdot I_0 = H \cdot l_{fe} = \frac{B}{\mu} \cdot l_{fe} = \varphi \cdot \frac{l_{fe}}{\mu \cdot A_{Fe}} \quad (5-3)$$

Sendo, fmm a força magneto motriz em AE(ampère-espira) , n o número de espiras,  $I_0$  a corrente de excitação em A, H é a intensidade de campo,  $l_{fe}$  é o comprimento do circuito magnético em m, B a indução magnética em T,  $\mu$  a

permeabilidade magnética em,  $\varphi$  o fluxo magnético em Wb e  $A_{Fe}$  é a seção do circuito magnético em  $m^2$ .

O valor eficaz da corrente de excitação é dado pela equação (5-4).

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_p^2} \quad (5-4)$$

Sendo,  $I_0$  a corrente de excitação em A,  $I_m$  a corrente de magnetização em A e  $I_p$  a corrente de perdas em A.

Para se obter o valor da corrente de excitação, através da equação (5-3), é necessário conhecer o número de espiras do enrolamento primário e o comprimento médio do núcleo de ferro. O número de espiras do primário é obtido pela equação (3-2) admitindo-se " $V_1 = E_1$ ".

Deve-se observar que quando se usa uma chapa magnética de grão orientado, pode existir uma parte do núcleo em que a direção do fluxo não coincide com a orientação dos grãos da chapa. Neste caso, o cálculo da corrente de excitação, bem como o cálculo das perdas no núcleo do transformador, deve ser feito considerando, separadamente as zonas em que o fluxo se alinha com a orientação dos grãos e as zonas de transição em que o fluxo fica perpendicular à orientação dos grãos. Neste caso podem-se utilizar as curvas de magnetização que dão o valor de VA/kg e de W/kg do material em função da indução B. Conforme mostra nas Figura 5-1 e Figura 5-2.

A partir das Figura 5-1 e Figura 5-2 e através da equação (5-5), sabendo-se a massa total do núcleo, obtém-se facilmente a corrente de excitação.

$$I_0 = \frac{(VA/kg) \cdot M_{fe}}{n_f \cdot E} \quad (5-5)$$

Sendo,  $I_0$  a corrente de excitação em A, (VA/kg) o coeficiente específico da corrente de excitação em VA/kg,  $M_{fe}$  a massa do material magnético em kg,  $n_f$  o número de fases do transformador e E a tensão induzida em V.

Conforme as equações (5-1) e (5-2) as perdas no material que forma o núcleo dos transformadores são funções da indução magnética e frequência. Portanto, o fabricante da chapa magnética também fornece as curvas das perdas por kg da indução, tanto para material com grãos orientados no sentido do fluxo magnético, como para material com grãos orientados a  $90^\circ$  do sentido do fluxo.

As perdas de excitação ou a vazio e a corrente de excitação percentual são dadas por:

$$W_0 = (W / kg) \cdot M_{fe} \quad (5-6)$$

Sendo,  $W_0$  a perda em vazio, (W/kg) o coeficiente específico da perda em vazio em W/kg e  $M_{fe}$  a massa do material magnético em kg.

$$I_0 \% = 100 \frac{(VA / kg) \cdot M_{fe}}{S_N} \quad (5-7)$$

Sendo,  $I_0\%$  a corrente de excitação percentual, (VA/kg) o coeficiente específico da corrente de excitação em VA/kg,  $M_{fe}$  a massa do material magnético em kg e  $S_N$  a potência nominal do transformador em VA.

## 5.6 Cálculo das Perdas nos Condutores

As normas brasileiras da ABNT especificam os métodos de medidas da temperatura dos enrolamentos e do óleo, bem como as elevações máximas de temperatura permitidas para cada classe de material isolante empregado.

Nos transformadores com parte ativa imersa em óleo, o material isolante utilizado é normalmente classe A cuja temperatura máxima de trabalho especificada é de 105°C.

O nível de óleo no interior do transformador é mantido um pouco acima dos furos superiores pelos quais passa o óleo, como se observa na Figura 5-3.

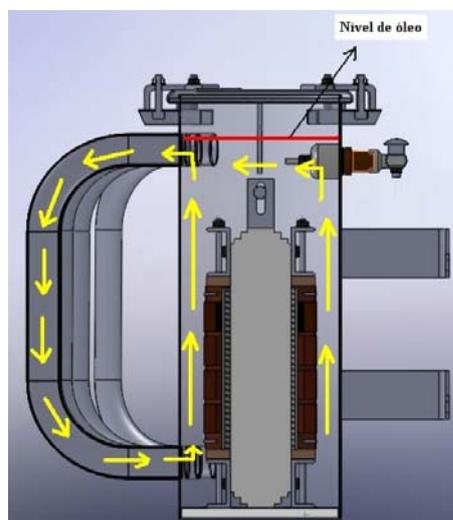


Figura 5-3 – Nível do óleo no transformador [29]

O transformador é hermeticamente fechado, mantendo uma camada de ar, na parte superior, para absorver a dilatação do óleo com o calor. A temperatura do líquido isolante é medida mediante termômetro cujo bulbo é mergulhado cerca de 5 cm no óleo, na parte superior do tanque. Esta temperatura se denomina de temperatura do topo do óleo.

As temperaturas dos enrolamentos são medidas pelo método da variação de resistência ôhmica dos condutores do enrolamento. Este método baseia-se no fato da resistividade variar com a temperatura, assim, a variação da resistividade dos condutores será proporcional à variação de temperatura dos condutores mais a variação de temperatura do ambiente.

Desta forma, por este método é necessário corrigir a variação calculada devido à variação do ambiente. A temperatura medida por este método da variação de resistência é um valor médio da temperatura da bobina, pois, a temperatura da bobina varia da base para o topo da bobina acompanhando o aumento de temperatura do óleo que a envolve. Para este ensaio as normas especificam que a temperatura no ponto mais quente não deve ultrapassar em 65°C a temperatura ambiente.

É importante ressaltar que ao circular uma corrente alternada por um condutor, o próprio fluxo gerado pela corrente induz tensões e correntes parasitas que aumentam as perdas joule neste condutor. Estas perdas parasitas dependem, entre outras causas, da configuração do fluxo que as produz e são calculadas separadamente para os diferentes enrolamentos do transformador.

As perdas por circulação de corrente podem ocorrer sempre que se tem condutores em paralelo que, por construção, ficam com comprimentos diferentes. Estas perdas são praticamente anuladas com a realização de transposições dos condutores em paralelos de modo a torná-los iguais em comprimento.

Quanto à margem de tolerância, a norma ABNT 5440 estipula uma tolerância de 10% para as perdas no núcleo e de 6% para as perdas totais. Estas tolerâncias devem cobrir todas as dificuldades de cálculo.

As perdas ôhmicas nos enrolamentos são calculadas utilizando-se a seguinte equação:

$$W_{co} = \frac{\rho}{\gamma_{cond}} \cdot d^2 \cdot M_c \quad (5-8)$$

Sendo,  $W_{co}$  as perdas nos condutores em W,  $\rho$  a resistividade em  $\Omega m$ ,  $\gamma_{cond}$  o peso específico do condutor em  $kg/m^3$ ,  $d$  a densidade de corrente em  $A/m^2$  e  $P_c$  o peso

do condutor em kg. A relação  $\rho/\gamma_{cond}$  é dependente do material do condutor. Seu valor para o cobre e para o alumínio é de  $2,36 \times 10^{-12} \Omega m^4/kg$  e  $12,8 \times 10^{-12} \Omega m^4/kg$ , respectivamente. Este fator nada mais é que a relação entre a resistividade e o peso específico do material utilizado como condutor.

Sendo o peso do condutor dado pela equação (5-9).

$$P_c = \pi \cdot D \cdot s \cdot \gamma_{cond} \cdot n \quad (5-9)$$

Sendo,  $P_c$  o peso do condutor em kg,  $D$  o diâmetro médio da bobina em m,  $s$  a seção do condutor em  $m^2$ ,  $\gamma_{cond}$  é o peso específico do condutor em  $kg/m^3$  e  $n$  o número de espiras da bobina.

As perdas nos enrolamentos são sempre dadas a uma temperatura de referencia em função da temperatura da classe de isolamento dos materiais isolantes empregados. A Tabela 5-1 mostra as classes dos materiais isolantes.

Tabela 5-1 – Classe térmica dos materiais isolantes

Classe	Designação	Alguns materiais representativos da classe
90 °C	O	Algodão, seda e papelão não impregnado, (fibras de celulose e derivados).
105 °C	A	Algodão, seda e papel impregnados ou revestidos ou quando imersos em líquido isolante.
120 °C	E	Mica, fibra de vidro e asbestos, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperaturas correspondentes.
130 °C	B	
155 °C	F	
180 °C	H	Elastômeros de silicatos, mica, fibra de vidro e asbestos, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de
Acima de 180 °C	C	Materiais formados inteiramente por mica, porcelana, vidro, quartzo e materiais orgânicos semelhantes.

Assim as perdas nos enrolamentos serão dadas por (5-10).

$$W_{cond} = \left( \frac{\rho_{cond1}}{\gamma_{cond1}} \right) \cdot d^2_{cond1} \cdot M_{cond1} + \left( \frac{\rho_{cond2}}{\gamma_{cond2}} \right) \cdot d^2_{cond2} \cdot M_{cond2} \quad (5-10)$$

O valor encontrado através da equação (5-10) é valido para transformadores monofásicos, pois correspondem às perdas por fase de um transformador, ou seja, a um conjunto de bobinas primário e secundário. Para um transformador trifásico o valor calculado pela equação (5-10) deve ser multiplicado por três.

Assim a perda total é para um transformador trifásico:

$$W_c = 3 \cdot W_{cond} \quad (5-11)$$

## 5.7 Cálculo das Perdas Parasitas nos Condutores

Por onde passa uma corrente alternada, um campo magnético alternado é gerado. Quando um fluxo magnético atravessa um material condutor, correntes parasitas aparecem juntamente com as perdas resultantes destas. Desta forma, os condutores dos enrolamentos do transformador conduzem não somente a corrente de carga, mas também correntes parasitas que são induzidas pelo fluxo gerado pelo próprio enrolamento e adjacentes. As perdas parasitas ou perdas Foucault podem ser calculadas de forma aproximada pela equação (5-12).

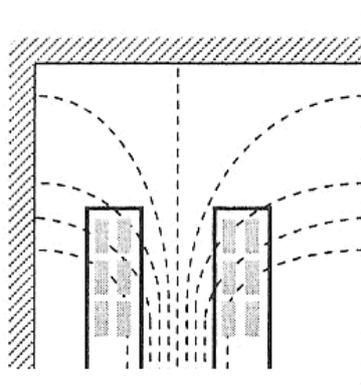


Figura 5-4 – Fluxo nos condutores [1]

$$P_{F-cond} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \gamma_{cond} \rho_{cond}} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2 \quad (5-12)$$

Sendo,  $\gamma_{cond}$  densidade de massa do cobre em kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{cond}$  a resistividade em  $\Omega\text{m}$ , B a indução magnética em T, f a frequência em Hz e  $t_{cond}$  a espessura do condutor em m. Sendo, assim as perdas para o condutor de cobre são dadas pela equação (5-13) abaixo.

$$P_{F-Cu} = 8825 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2 \quad (5-13)$$

Já, as perdas para o condutor de alumínio são dadas pela equação (5-14).

$$P_{F-Al} = 17634 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2 \quad (5-14)$$

Vale ressaltar que este tipo de perda que tem um acréscimo pequeno no valor das perdas totais. Porém, pela análise da equação (5-12), nota-se que a perda é proporcional ao quadrado da espessura do condutor. Desta forma com o aumento da espessura do condutor esta perda pode se tornar significativa e influenciar o valor da

perda total do transformador. Com base nesta análise aconselha-se a utilização de condutores em paralelo quando grandes seções forem necessárias.

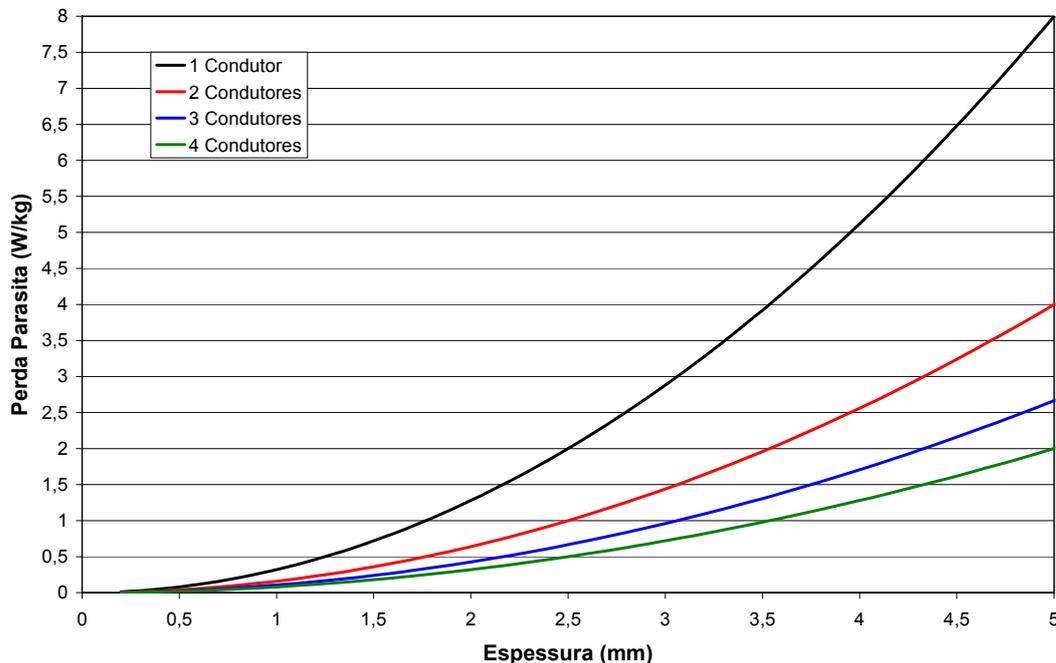


Figura 5-5 – Perdas parasitas

O gráfico da Figura 5-5 foi construído considerando para cada espessura a utilização de um ou vários condutores em paralelo. Fica evidente a redução das perdas que se obtém com a utilização de condutores em paralelo para grandes seções. Por este motivo, grandes transformadores de potência utilizam muitos condutores em paralelo para reduzir as perdas parasitas.

## 5.8 Perdas Adicionais Devido ao Fluxo de Dispersão

O fluxo de dispersão produzido pela corrente de carga pode também produzir perdas parasitas em outras partes do transformador, construídas com chapas ou perfis que utilizam materiais magnéticos, tais como prensas culatras, tirantes de prensagem das bobinas e paredes do tanque do transformador.

Essas perdas adicionais não podem ser calculadas com a facilidade desejada. Sabe-se que elas crescem quando aumenta a reatância de dispersão e são mais nocivas quando representam superaquecimentos localizados, embora representem uma parcela muito pequena das perdas totais do transformador.

Nos casos em que ocorrem superaquecimentos localizados devem ser feitas blindagens especiais para evitar este superaquecimento, pois este comprometerá a vida útil do transformador. Nas paredes do tanque, pode ser utilizada blindagem feita com tiras de chapa para núcleo de transformador, em forma de painéis. Estes painéis têm a função de prover um caminho para o retorno do fluxo disperso, com perdas reduzidas evitando-se que este fluxo atravesse o material protegido.

## 5.9 Perdas por Circulação de Corrente em Condutores Paralelos

Quando são utilizados condutores em paralelo, a fim de limitar a densidade de corrente, podem surgir condições de circulação de corrente entre os condutores, se não forem feitas transposições. Para dois condutores paralelos de forma radial, se as posições dos condutores não permanecem iguais em toda uma camada, os dois condutores não têm o mesmo comprimento e, portanto não tem a mesma resistência ôhmica e, também, não tem a mesma reatância de dispersão. Nos terminais da bobina os dois condutores que são isolados ao longo de todo o enrolamento, são ligados eletricamente entre si. Nessas condições, a tensão induzida na bobina fará circular correntes diferentes nos dois condutores o que equivale a dizer que vai existir uma corrente circulante entre os mesmos, produzindo perdas adicionais.

## 5.10 Perdas no Núcleo

Para se determinar a perda no núcleo primeiramente deve-se obter o coeficiente de perda específica,  $k_{W_{fe}}$ , do material utilizado no núcleo. Isto pode ser feito de forma prática através da utilização de curvas disponibilizadas pelos fabricantes do material ferromagnético.

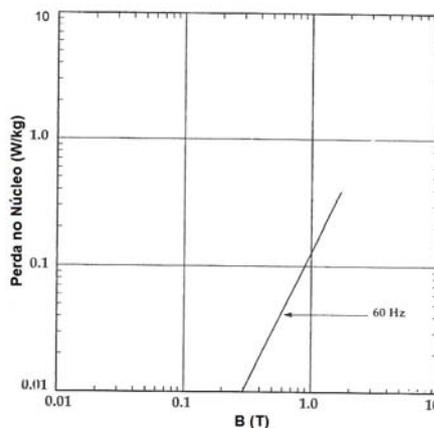


Figura 5-6 – Perda específica do aço amorfo [27]

A Figura 5-6, por exemplo, traz uma curva disponibilizada por fabricante de aço amorfo. A partir desta pode-se obter a perda específica para o material.

A perda na coluna é encontrada pela utilização da equação (5-15).

$$W_{col} = k_{wfe} \cdot M_{col} \quad (5-15)$$

Sendo,  $W_{col}$  a perda em vazio na coluna em W,  $k_{wfe}$  a perda específica do material magnético em W/kg e  $M_{col}$  a massa da coluna em kg.

Deve-se calcular de forma separada a perda na culatra, pois esta, dependendo de sua área, pode ter um valor de indução magnética diferente da existente nas colunas. Assim se tem uma perda específica diferente da adotada para a coluna.

$$W_{cul} = k_{wfe} \cdot M_{cul} \quad (5-16)$$

Sendo,  $W_{cul}$  a perda em vazio na culatra em W,  $k_{wfe}$  a perda específica do material magnético em W/kg e  $M_{cul}$  a massa da culatra em kg.

Os valores encontrados pelas equações (5-15) e (5-16) são por coluna ou por culatra se os valores da massa  $M_{col}$  e  $M_{cul}$  correspondem às massas de uma coluna e uma culatra respectivamente. Neste caso para o cálculo da perda total o valor a ser utilizado de  $W_{col}$  e  $W_{cul}$  deve ser multiplicado pelo número de colunas e culatras, respectivamente. Para evitar este percalço pode-se calcular  $M_{col}$  como sendo a massa total das colunas e  $M_{cul}$  a massa total das culatras.

$$W_{vazio} = W_{col} + W_{cul} \quad (5-17)$$

### 5.11 Perdas Totais do Transformador

As perdas totais de um transformador correspondem à simples soma das perdas do núcleo e as perdas em carga, conforme equação (5-18).

$$W_{Trafo} = W_c + W_{vazio} \quad (5-18)$$

Sendo,  $W_{Trafo}$  a perda total do transformador em W,  $W_c$  a perda total nos condutores em W e  $W_{vazio}$  a perda total em vazio em W.

Capítulo 6

---

# Cálculo das Demais Características

## 6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo foi desenvolvido para tratar do cálculo das demais características do transformador. Estas características apresentadas neste capítulo não são o foco deste trabalho. São elas, por exemplo, reatância, resistência, impedância, etc. Porém, estas características ou parâmetros não são menos importantes e merecem a devida atenção.

## 6.2 Cálculo da Reatância de Dispersão

Para um transformador ideal se espera que todo fluxo gerado seja aproveitado e conduzido pelo núcleo. Porém, parte do fluxo gerado pelos enrolamentos não se encaminham ao núcleo fechando seu caminho pelo ar ou óleo. A este fluxo se dá o nome de fluxo disperso.

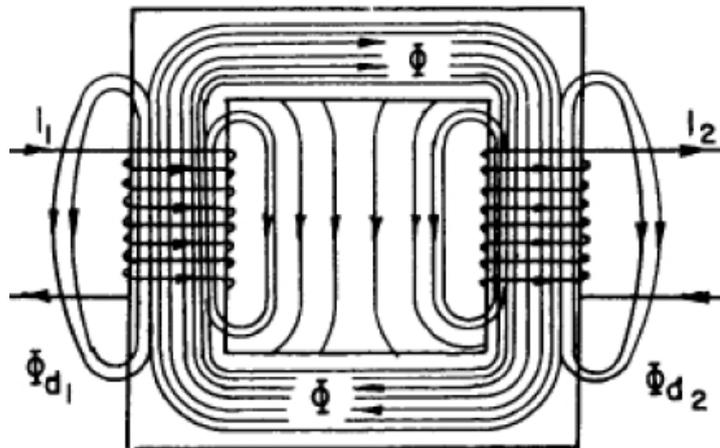


Figura 6-1 – Fluxo de dispersão

Para o cálculo da reatância de dispersão existem vários métodos apresentados nos livros de projeto. Um dos métodos é desenvolvido sobre o conceito do fluxo concatenado. Esse método é baseado nas equações de fluxo (6-1) e (6-2) abaixo.

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} \quad (6-1)$$

Sendo, L a indutância em H, N o número de espiras do enrolamento,  $\phi$  o fluxo mutuo em Wb e I a corrente do enrolamento em A.

$$L = N^2 \cdot \wp \tag{6-2}$$

Sendo, L a indutância em H, N o número de espiras do enrolamento e,  $\wp$  a permeância em Wb/AE.

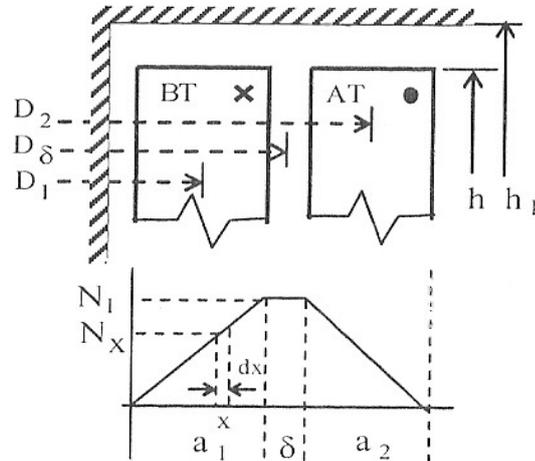


Figura 6-2 – Distribuição do fluxo de dispersão [1]

A indutância de dispersão total corresponde à soma de todas as indutâncias de dispersão obtidas pela aplicação da equação (6-2) a cada canal, correspondendo assim à indutância do transformador.

O fluxo de dispersão se distribui da forma como apresentado pela Figura 6-2. Ele depende do afastamento da bobina de alta em relação à bobina de baixa, além do número de espiras da bobina de baixa. Assim, o valor da indutância depende somente das dimensões físicas das bobinas e da permeabilidade do meio. Quanto mais distante a bobina de alta estiver da bobina de baixa maior será a dispersão, pois maior ser a quantidade de fluxo produzido pela bobina de alta que não atravessará por completo a bobina de baixa.

A cada camada de espiras da bobina de alta se acrescenta uma determinada quantidade de fluxo de dispersão à distribuição até que todas as camadas tenham dado sua contribuição ao fluxo de dispersão. Assim, no espaço entre as bobinas, ou seja, no canal de óleo, por exemplo, a indutância de dispersão permanece constante por não haver espiras capazes de aumentar o fluxo de dispersão. No espaço correspondente a bobina de baixa tensão este fluxo começa a decair devido a suas espiras. Este fluxo de dispersão não participa do acoplamento entre as bobinas.

$$d\varphi = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot dx}{h_K} \tag{6-3}$$

Sendo,  $\varphi$  a permeância em Wb/AE,  $D_1$  o diâmetro médio da bobina interna em mm,  $\mu_0$  a permeabilidade em H/m. A altura  $h_K$ , em mm, pode ser determinada pelo fator de Rogowski “K” que para bobinas concêntricas é:

$$K = 1 - \frac{c}{\pi \cdot h} = \frac{h}{h_K} \tag{6-4}$$

O fator K pode ser obtido através do gráfico abaixo:

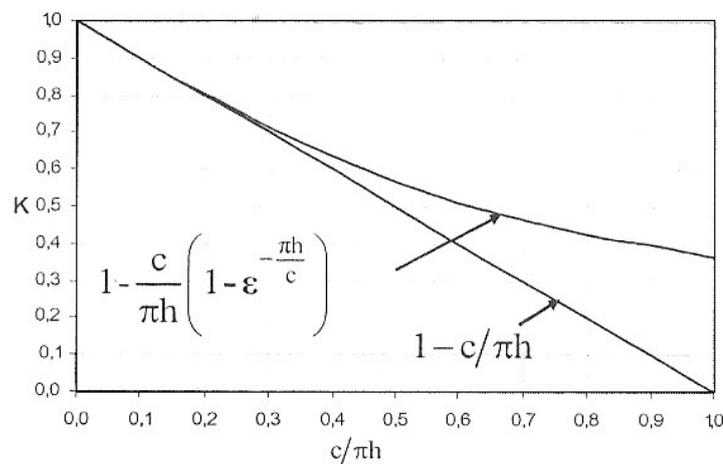


Figura 6-3 – Gráfico fator de Rogowski [1]

O valor da indutância corresponde à área do gráfico apresentado na Figura 6-2. Através da equação (6-3) se chega a:

$$L = \int N_x^2 \cdot d\varphi = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_1}{h_K} \cdot \int_0^X N_x^2 dx \tag{6-5}$$

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{2 \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \pi^2 \cdot D_1}{h_K} \cdot \int_0^X N_x^2 dx \tag{6-6}$$

Para se referir a indutância ao primário basta utilizar  $N_1$  no gráfico da Figura 6-2 e se obter a indutância refletida no secundário do transformador, basta utilizar  $N_2$  no gráfico da Figura 6-2. Dividindo o resultado da equação (6-6) pela base e multiplicando por cem tem-se a reatância percentual.

Outro método consiste no emprego de uma fórmula aproximada desenvolvida para transformadores de dois enrolamentos. Sabe-se que as linhas de fluxo próximas

ao topo do enrolamento deixam de ser perpendiculares como na Figura 6-4 (a), porém, foi assumido que a densidade de fluxo é paralela em toda a extensão do enrolamento, como na Figura 6-4 (b).

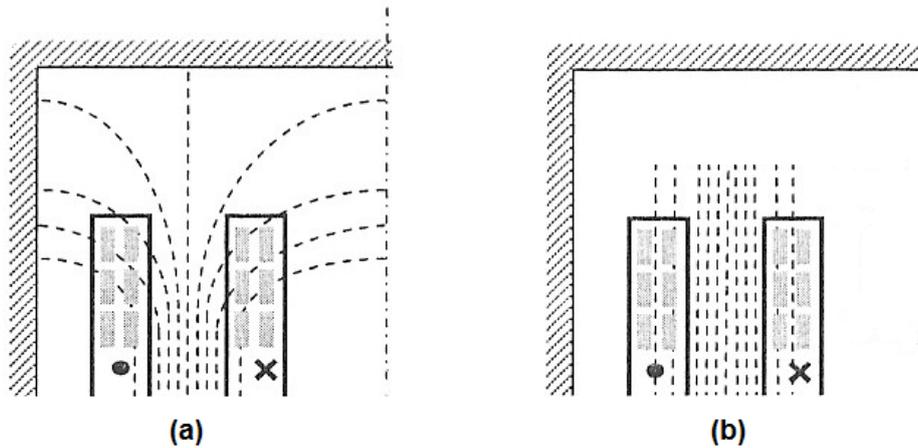


Figura 6-4 – Distribuição do fluxo no topo do enrolamento [1]

Assim, com a aplicação da equação (6-7).

$$X \% = \frac{0,79 \cdot (S_N / 3) \cdot f \cdot b_x}{\left(\frac{V_2}{n}\right)^2 \cdot H_{bobina} / s_x} \quad (6-7)$$

Sendo  $S_N$  a potência do transformador em MVA,  $f$  a frequência em Hz,  $H_{bobina}$  a altura da bobina em mm,  $V_2$  tensão do enrolamento em V,  $n$  o número de espiras. Onde  $s_x$  e  $b_x$  são obtidos pelas equações (6-8) e (6-9) abaixo, obtém-se a reatância percentual.

$$s_x = \left( \frac{l_{esp\ med1} + l_{esp\ med2}}{2} \right) \quad (6-8)$$

Sendo,  $l_{esp\ med1}$  o comprimento médio da espira do enrolamento primário em mm,  $l_{esp\ med2}$  o comprimento médio da espira do enrolamento secundário em mm.

$$b_x = Dist_{1-2} + \left( \frac{Esp_1 + Esp_2}{3} \right) \quad (6-9)$$

Sendo,  $Dist_{1-2}$  a distância entre os enrolamentos primário e secundário em mm,  $Esp_1$  a espessura do enrolamento primário em mm,  $Esp_2$  a espessura do enrolamento secundário em mm.

### 6.3 Cálculo da Impedância Percentual

A impedância percentual do transformador é valor da impedância interna por fase do transformador, dividida pela impedância base, dada em porcentagem, como mostra a equação (6-10).

$$Z\% = 100 \frac{Z}{Z_B} \quad (6-10)$$

A impedância percentual representa a porcentagem da tensão nominal que deve ser aplicada por fase no transformador em curto-circuito ( $Z_C=0$ ) para fazer circular pelos enrolamentos a corrente nominal.

A resistência equivalente,  $R_{eq1}$ , referida ao primário é calculada utilizando a perda ôhmica por fase. O cálculo é feito através da equação (6-11).

$$R_{eq1} = \frac{W_{cfase}}{\left(I_1/\sqrt{3}\right)^2} \quad (6-11)$$

Porém, o valor de interesse é o valor da resistência percentual, pois este é necessário para o cálculo da impedância percentual. O valor da resistência percentual é obtido pela equação (6-12).

$$R\%_1 = \frac{R_{ep1} \cdot I_1/\sqrt{3}}{V_1} \quad (6-12)$$

De posse dos valores da reatância percentual e da resistência percentual, a através da utilização da equação (6-13) encontra-se o resultado desejado para a impedância percentual.

$$Z\% = \sqrt{X\%^2 + R\%^2} \quad (6-13)$$

Capítulo 7

---

# Comparativo da Utilização do Cobre e do Alumínio

## 7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma comparação entre a utilização do cobre e do alumínio como materiais condutores a serem utilizados nos enrolamentos de transformadores. Este estudo se torna importante visto que a utilização do alumínio em substituição ao cobre na manufatura de transformadores de distribuição vem se tornando cada vez mais frequente devido principalmente à diferença existente no preço destes dois materiais condutores. Porém, para transformadores de potências mais elevadas a utilização do cobre como material condutor ainda predomina.

Desta forma este capítulo busca trazer informações importantes para a tomada de decisão na escolha do material a ser empregado no projeto do enrolamento. Tais informações não se restringem somente ao projeto de transformadores, pois estas podem ser utilizadas por projetistas de outros setores como motores, geradores, reatores entre outros.

## 7.2 Características

O cobre e o alumínio são os dois materiais condutores mais utilizados pelo setor de equipamentos elétricos, pois ambos têm uma boa capacidade de condução de corrente. Neste aspecto, o cobre é o segundo melhor condutor ficando atrás somente da prata, sendo que o alumínio vem logo em seguida em terceiro lugar nesta classificação. O que define a utilização destes dois materiais ao invés da prata é o custo de aquisição destes materiais. O cobre e o alumínio têm preços mais acessíveis e adequados para sua utilização pelo setor de energia.

A escolha do material certo a se empregar na construção de enrolamentos tem de ser feita pela consideração de vários fatores, principalmente, quais características do transformador são afetadas pela escolha do material. Deve ser analisado não somente o custo de manufatura do transformador com cada material, mas também como estes materiais se comportam durante os ensaios exigidos para a aprovação e liberação do transformador, inclusive, como este material se comportará durante a vida útil deste equipamento. Portanto a escolha do material adequado visa não somente a economia financeira com a redução do custo de manufatura, mas também a economia com a redução do número de falhas dos transformadores em campo.

A comparação entre os dois materiais, cobre e alumínio, é feita com base na análise comparativa das suas características físicas, como por exemplo, resistividade,

tensão de ruptura mecânica e densidade, buscando definir seus pontos fortes e fracos no emprego como materiais condutores na manufatura de enrolamentos para transformadores. Nesta comparação se busca definir o limite de custo para o qual é mais econômico produzir um transformador com um ou outro material.

Tabela 7-1 – Características físicas dos materiais

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>	<b>Cobre</b>	<b>Alumínio</b>
<i>Resistividade a 20°C</i>	$\Omega\text{m}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$2,83 \cdot 10^{-8}$
<i>Coefficiente de Temperatura a 20°C</i>	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00393	0,00403
<i>Temperatura ponto T</i>	$^{\circ}\text{C}$	234,5	228,1
<i>Tensão de Ruptura a 20°C</i>	$\text{kgf}/\text{mm}^2$	23	4,9
<i>Limite de Escoamento (<math>\sigma=0,2\%</math>)</i>	$\text{kgf}/\text{mm}^2$	7,0	1,3
<i>Módulo de Elasticidade</i>	$\text{kgf}/\text{mm}^2$	12032	7030
<i>Densidade de massa</i>	$\text{kg}/\text{dm}^3$	8,89	2,7
<i>Coefficiente de expansão</i>	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$23,86 \cdot 10^{-6}$
<i>Condutividade térmica</i>	$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	398	210
<i>Calor específico</i>	$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$	384,6	904
<i>Ponto de fusão</i>	$^{\circ}\text{C}$	1085	660

Como mostra a Tabela 7-1, a resistividade do cobre é 39% menor que a do alumínio podendo chegar até 41% dependendo do grau de pureza do material condutor, sendo a resistividade do cobre pouco mais estável termicamente que a do alumínio, desta forma, pode ser desprezada a diferença entre a variação da resistividade entre o cobre e o alumínio. Em contrapartida o cobre é 3,3 vezes mais pesado que o alumínio para um mesmo volume e 4,7 vezes mais resistente à ruptura que o alumínio. Por fim, outra característica na qual o cobre leva vantagem é quanto à condução de calor, na qual o cobre conduz 90% mais calor que o alumínio.

As ligas metálicas do cobre e do alumínio vem para tentar melhorar algumas das propriedades destes materiais condutores. A liga feita entre cobre e prata melhora significativamente a condutividade térmica do material resultante, isto sem afetar a condutividade elétrica do material. O condutor de cobre utilizado em transformadores, principalmente de potência, é composto por cobre eletrolítico com um grau de pureza superior a 99,9%. Pequenas quantidades de impurezas, assim como estanho, misturadas ao cobre para formação da liga do material condutor podem degradar a resistividade do condutor.

O alumínio é mais sensível as impurezas que o cobre, uma porcentagem menor que 0,5% de impurezas de alguns materiais podem facilmente reduzir a capacidade do alumínio de conduzir corrente em mais de 10%. Desta forma,

condutores de alumínio devem ter um alto grau de pureza para evitar esta degradação da condutividade, não sendo aconselhável a utilização de materiais provenientes de reciclagem. O processo de reciclagem, caso não haja um controle rigoroso, tende a inserir impurezas no material condutor afetando suas propriedades físicas.

### 7.3 Custo da Matéria Prima

Tanto o cobre quanto o alumínio são considerados commodities. A literatura caracteriza como commodities as mercadorias, em geral homogêneas, cuja oferta e demanda são praticamente inelásticas no curto prazo e cujas transações são efetuadas nas principais bolsas de mercadoria internacionais ou são realizadas com base nas cotações vigentes nesses mercados [8].

Em economia, quando se diz que a demanda é inelástica, isto indica que a variação percentual na quantidade demandada é menor que a variação percentual no preço. Em outras palavras, elevação no preço provoca redução na quantidade demandada relativamente menor que a elevação no preço. Interpreta-se como a sensibilidade relativamente baixa da demanda em relação ao preço [9].

Devido ao preço ser negociado em bolsas, este sofre variações diárias, o que pode afetar diretamente o preço do produto final, ou seja, do transformador. Porém, quando se fala a respeito dos preços internacionais destas duas commodities, principalmente com a intenção de comparação entre eles, um fato relevante que deve ser comentado, trata-se da alta desproporcional do cobre com relação ao alumínio.

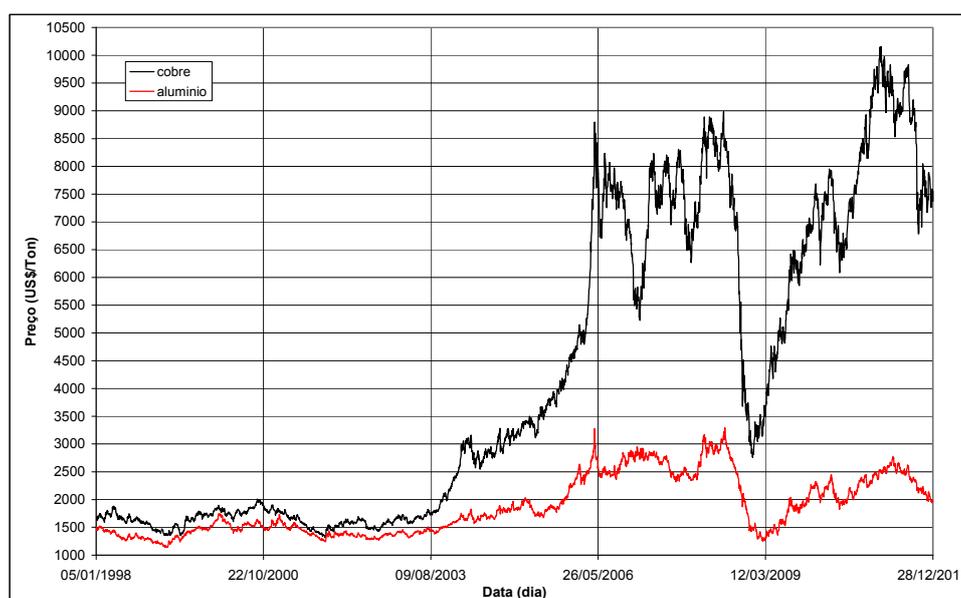


Figura 7-1 – Histórico de cotação de 1998 a 2011 para cobre e alumínio [30]

A partir de 2003, como se pode observar no gráfico com dados retirados da bolsa de metais Londres (London Metal Exchange) na Figura 7-1 acima, o preço do cobre que vinha ao longo do tempo muito próximo ao preço do alumínio, porém, começou a disparar se distanciando cada vez mais. E mesmo o efeito da crise econômica de 2008, figura 7-2, quase não foi sentido pela commodity que recuperou sua tendência de alta do preço rapidamente. Este fato vem dando força à utilização do alumínio em substituição ao cobre.

As reservas mundiais de cobre também são um fator que pode se tornar decisivo em um futuro próximo. Sabe-se que as reservas de cobre são bem menores que as reservas mundiais de alumínio, tendo o cobre uma relação entre o total da reservas pela taxa de consumo significativamente menor do que o alumínio. Assim, as reservas mundiais de cobre tendem a se esgotarem em um prazo mais curto que as reservas mundiais de alumínio, sendo outro fator a provavelmente afetar seu preço.

O processo produtivo de ambos os metais são considerados intensivos na utilização de energia. O consumo total para a produção do alumínio é de 27.511 kWh/ton enquanto o do cobre é de 21.332 kWh/ton [10]. O acréscimo no consumo de energia para a produção do alumínio é de 29%. Este valor por si só não é muito significativo, porém quando se traz a questão ambiental à tona com o foco nas emissões de CO<sub>2</sub>, o aumento das emissões pode fazer pender a balança nos tempos de hoje, principalmente, para consumidores com alto apelo ambiental como os consumidores europeus.

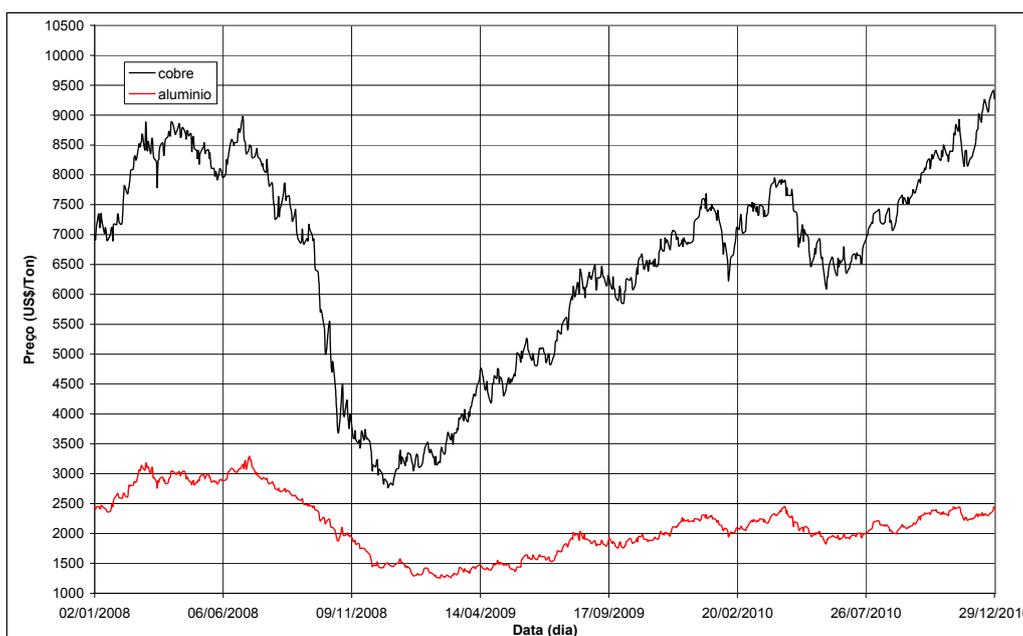


Figura 7-2 - Histórico de cotação de 2008 a 2010 para cobre e alumínio [30]

## 7.4 Custo Devido à Resistividade dos Materiais

A primeira análise é feita sobre os efeitos da diferença entre os valores de resistividade dos dois materiais. Para se ter uma análise correta, o valor de resistividade inicialmente deve ser corrigido para a temperatura de 75°C, pois a resistividade varia com a temperatura nos condutores metálicos, conforme pode se observar na figura, onde o ponto T é chamado de temperatura fictícia sendo a temperatura obtida com o prolongamento da faixa linear do gráfico de resistividade para se obter a resistividade nula. Pode se perceber regiões onde esta variação ocorre de forma linear.

Para se realizar o cálculo da perda ôhmica dos enrolamentos tem que se considerar a resistividade do material à temperatura de operação do transformador. Caso contrário o valor encontrado não será condizente com a real operação do transformador.

Uma técnica muito discutida atualmente hoje em dia são os equipamentos com supercondutores. Sua utilização se baseasse no fato que à medida que a temperatura decresce, a resistividade dos materiais metálicos diminui e a condutividade aumenta. Na temperatura do zero absoluto os materiais tornam se supercondutores, isto é, ficam com resistividade nula. A partir deste fato é que são criados transformadores com materiais supercondutores cuja perda em carga é praticamente nula, porém, estes ainda possuem custos proibitivos para sua larga implantação.

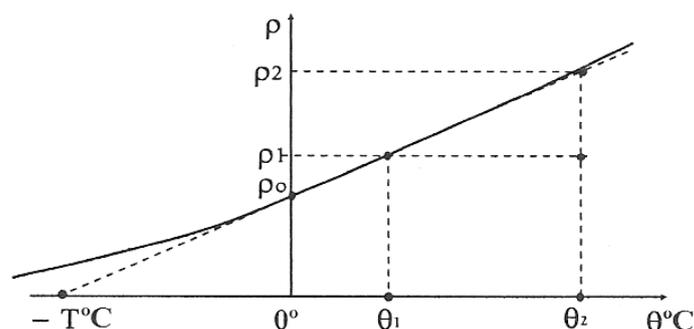


Figura 7-3 – Variação da resistividade com a temperatura [1]

O uso da equação para calcular a resistividade e, e em ultima análise a resistência do condutor, quando a temperatura varia de  $\theta_1$  para  $\theta_2$  é muito prática. Para tal utiliza-se uma temperatura fictícia T para o cobre de 234,5°C e para o alumínio de 228,1°C. A variação da resistividade é dada pela equação (7-1) abaixo.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T + \theta_2}{T + \theta_1} \quad (7-1)$$

Sendo,  $\rho_1$  a resistividade em  $\Omega m$  à temperatura  $\theta_1$  em  $^{\circ}C$ ,  $\rho_2$  a resistividade em  $\Omega m$  à temperatura  $\theta_2$  em  $^{\circ}C$  e  $T$  A temperatura fictícia do material em  $^{\circ}C$ . Assim temos para o cobre:

$$\rho_{Cu75^{\circ}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 2,09 \cdot 10^{-8} \Omega m \quad (7-2)$$

Já para o alumínio temos:

$$\rho_{Al75^{\circ}} = 2,83 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{228,1 + 75}{228,1 + 20} = 3,46 \cdot 10^{-8} \Omega m \quad (7-3)$$

Dando início à análise considera-se que ambos os enrolamentos tem a mesma resistência ôhmica. Neste momento são desprezadas as alterações no comprimento do condutor, sendo analisadas somente variações na seção deste. Assim chegamos à equação abaixo:

$$\rho_{Cu} \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} = \rho_{Al} \frac{L_{Al}}{S_{Al}} \quad (7-4)$$

Sendo,  $\rho_{Cu}$ ,  $\rho_{Al}$  as resistividades em  $\Omega m$  do cobre e do alumínio respectivamente,  $L_{Cu}$ ,  $L_{Al}$  os comprimentos do condutor em m do cobre e do alumínio respectivamente e  $S_{Cu}$  e  $S_{Al}$  as seções do condutor em  $m^2$  do cobre e do alumínio respectivamente.

Considerando  $L_{Cu}$  igual a  $L_{Al}$  temos a equação logo abaixo:

$$S_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} S_{Cu} \quad (7-5)$$

Substituindo na equação (7-5) os valores das equações (7-2) e (7-3), obtém-se (7-6).

$$S_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \cdot S_{Cu} \Rightarrow S_{Al} = \frac{3,46 \cdot 10^{-8}}{2,09 \cdot 10^{-8}} \cdot S_{Cu} \Rightarrow S_{Al} = 1,66 \cdot S_{Cu} \quad (7-6)$$

Desta forma conclui-se que para o alumínio ser empregado na manufatura de enrolamentos para transformadores, tendo a mesma resistência, a seção transversal

do condutor deve ser 1,66 vezes maior que a seção do cobre. Porém, o custo do condutor não está atrelado à seção do condutor e sim ao peso deste.

$$\gamma_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{L \cdot S_{Cu}}, \quad \gamma_{Al} = \frac{m_{Al}}{L \cdot S_{Al}} \quad (7-7)$$

Sendo,  $\gamma_{Cu}, \gamma_{Al}$  as densidades em kg/m<sup>3</sup> do cobre e do alumínio respectivamente,  $m_{Cu}, m_{Al}$  as massas do condutor em kg do cobre e do alumínio respectivamente,  $L$  o comprimento do condutor em m e  $S_{Cu}$  e  $S_{Al}$  as seções do condutor em m<sup>2</sup> do cobre e do alumínio respectivamente.

Prosseguido com a análise, a partir das equações (7-7) para a densidade de cada material consegue-se substituir na equação (7-6) os valores de  $S_{Cu}$  e  $S_{Al}$  obtendo a equação (7-8).

$$m_{Cu} = \frac{1}{1,66} \cdot \frac{\gamma_{Cu}}{\gamma_{Al}} \cdot m_{Al} \quad (7-8)$$

Utilizando os valores para a densidade de massa presente na tabela 7-1 se chega à relação (7-9) abaixo:

$$\frac{m_{Cu}}{m_{Al}} = 1,996 \quad \rightarrow \quad m_{Cu} = 1,96m_{Al} \quad (7-9)$$

Assim se conclui que é necessário um volume de alumínio 1,66 vezes maior que o volume utilizado de cobre. No entanto massa de cobre é 1,96 vezes maior que a do alumínio.

O preço do enrolamento é uma função do custo do material e de sua massa como nas equações (7-10) abaixo.

$$P_{Cu} = m_{Cu} \cdot c_{Cu}, \quad P_{Al} = m_{Al} \cdot c_{Al} \quad (7-10)$$

Sendo,  $P_{Cu}, P_{Al}$  os preços do enrolamento em R\$ de cobre e de alumínio respectivamente,  $m_{Cu}, m_{Al}$  as massas do condutor em kg do cobre e do alumínio respectivamente,  $L$  o comprimento do condutor em m e  $c_{Cu}, c_{Al}$  o custo de aquisição do condutor em R\$/kg de cobre e de alumínio respectivamente.

A partir de (7-9) e das equações (7-10) acima, se obtém a equação (7-11) a seguir.

$$\frac{P_{Cu}}{P_{Al}} = 1,96 \cdot \frac{c_{Cu}}{c_{Al}} \quad (7-11)$$

Desta forma para se obter um enrolamento com o mesmo preço final de matéria prima a relação entre o custo do cobre e do alumínio deve ser:

$$\frac{c_{Cu}}{c_{Al}} = \frac{P_{Cu}/P_{Al}}{1,96} = \frac{1}{1,96} \Rightarrow \frac{c_{Cu}}{c_{Al}} = 0,51 \Rightarrow c_{Cu} = 0,51 \cdot c_{Al} \quad (7-12)$$

Assim o custo de aquisição unitário do condutor de cobre deveria ser correspondente a 51% do custo de aquisição unitário do condutor de alumínio levando-se em consideração apenas o enrolamento. Nesta situação, estão sendo desprezados vários outros custos como, por exemplo, o aumento de tamanho do tanque do transformador. Porém, por se ter uma seção 1,66 vezes maior, a área da janela do núcleo, desprezando os espaços vagos, deverá ser também 1,66 vezes maior para o transformador com enrolamentos de alumínio quando se comparado com enrolamentos feitos de cobre.

Considerando o formato da janela do núcleo como sendo um quadrado de lado  $l$  temos que:

$$\text{Área}_{\text{janela}} = l_{\text{núcleo}}^2 \quad (7-13)$$

Sendo,  $\text{Área}_{\text{janela}}$  a área da janela do núcleo em  $\text{mm}^2$  e  $l_{\text{núcleo}}$  o comprimento médio do lado da janela do núcleo em mm.

Tomando como verdadeiro, devido à seção do condutor de alumínio ser 1,6 vezes maior que a seção do cobre, a área da janela ocupada por alumínio é 1,66 vezes a ocupada por cobre como abaixo.

$$\text{Área}_{\text{janela-Alumínio}} = 1,66 \cdot \text{Área}_{\text{janela-Cobre}} \quad (7-14)$$

Substituído (7-13) em (7-14) para cada material temos:

$$l_{\text{núcleo-Alumínio}}^2 = 1,66 \cdot l_{\text{núcleo-Cobre}}^2 \rightarrow l_{\text{núcleo-Alumínio}} = 1,29 \cdot l_{\text{núcleo-Cobre}} \quad (7-15)$$

Desta forma, o núcleo para um transformador manufaturado com enrolamentos de alumínio se tem um aumento mínimo de 29% em seu comprimento da linha média e conseqüente aumento de 29% da massa do núcleo e de seu custo final.

## 7.5 Conectividade e Oxidação

O alumínio, em contato com o ar, cobre-se com uma película de óxido que o protege de futuras oxidações, porém esta camada tem característica altamente isolante sendo de difícil remoção dificultando a execução de junções. Nas conexões com alumínio, um bom contato só será conseguido com a ruptura dessa camada. Além disso o alumínio em contato com alguns metais, dentre eles ferro e cobre, e em presença de umidade cria um par galvânico que o corrói lentamente até a degradação total. A eficiência de um transformador por esta característica do alumínio pode ser perdida se as conexões forem ruins, pois a perda Joule nestas podem influenciar na eficiência do transformador, principalmente em longo prazo com a possível degradação do alumínio. O cobre com relação a esse aspecto é superior ao alumínio.

## 7.6 Curto-Circuito

### 7.6.1 Comportamento Térmico Durante Curto-Circuito

O curto-circuito impõe ao transformador um grande valor de corrente instantaneamente. Este aumento brusco da corrente faz com que a temperatura do transformador e principalmente de seus enrolamentos suba rapidamente podendo chegar a limites prejudiciais a sua vida útil. O material mais afetado com este aumento da temperatura é o material isolante do enrolamento, sendo este o responsável por, basicamente, definir a vida útil de um transformador.

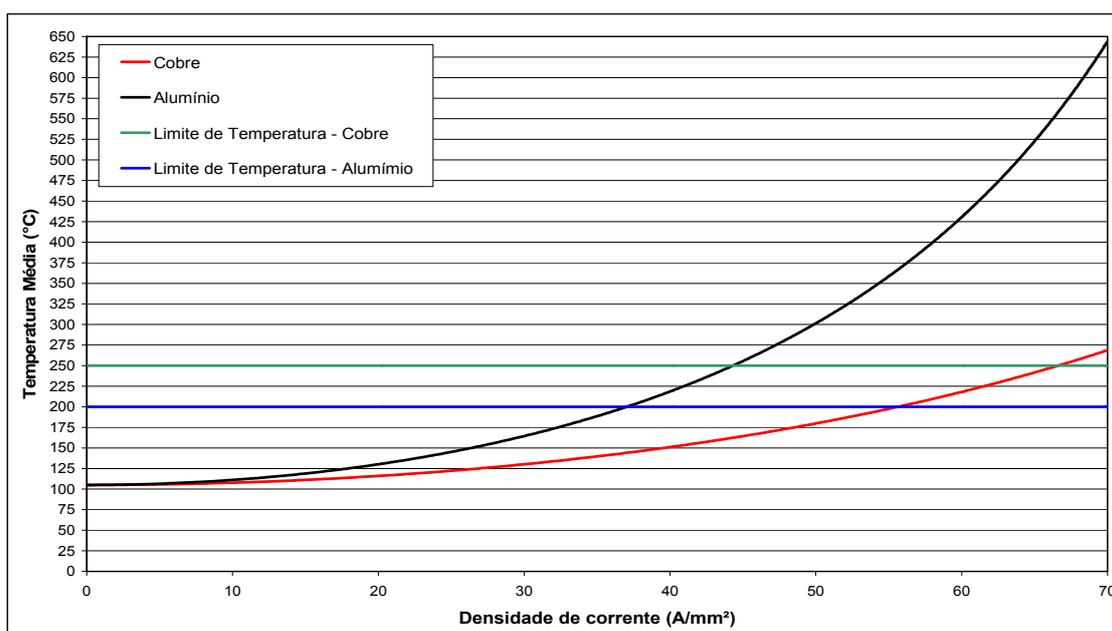


Figura 7-4 – Temperatura do enrolamento para curto-circuito de 4 segundos

Um ponto importante para a análise dos efeitos do curto-circuito sobre os enrolamentos é a velocidade com que a temperatura aumenta durante o curto-circuito. As curvas para o cobre e para o alumínio, levantadas para um curto-circuito com tempo de duração considerado de 4 segundos, presentes no gráfico da figura 7-4 foram obtidas através da equação (7-16) para o cobre.

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 235)}{(101000/d^2 \cdot t) - 1} \quad (7-16)$$

Sendo,  $\theta_0$  e  $\theta_1$  as temperatura em °C inicial e final respectivamente,  $d$  a densidade de corrente em A/mm<sup>2</sup> e  $t$  o tempo de duração do curto-circuito em s.

E através da equação (7-17) para o alumínio.

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 225)}{(43600/d^2 \cdot t) - 1} \quad (7-17)$$

Nesta situação é considerado que todo o calor gerado durante o curto-circuito é mantido no enrolamento. Neste gráfico também está presente o limite máximo permitido da temperatura para condutor de cobre que é de 250°C e de 200°C para condutor de alumínio.

O valor da densidade de corrente de curto-circuito, com duração de 4 segundos, capaz de fazer com que o enrolamento de cobre atinja sua temperatura máxima é de aproximadamente 66,6 A/mm<sup>2</sup>. Já para o alumínio, este limite é atingido mais cedo por volta de 37 A/mm<sup>2</sup>, para uma classe de temperatura de 105°C. Com base nesta informação obtemos a seguinte relação:

$$\frac{d_{Cu}}{d_{Al}} = \frac{66,6}{37} = 1,80 \rightarrow d_{Cu} = 1,80 \cdot d_{Al} \quad (7-18)$$

Assim, a densidade de corrente durante o curto-circuito pode ser 80% maior quando se tem condutores de cobre ao invés de alumínio. A fórmula da densidade de corrente para o cobre é:

$$d_{Cu} = \frac{I_{cc}}{S_{Cu}} \quad (7-19)$$

Sendo,  $d_{Cu}$  a densidade de corrente em A/mm<sup>2</sup> do cobre,  $I_{cc}$  a corrente de curto-circuito e  $S_{Cu}$  a seção do condutor de cobre em mm<sup>2</sup>.

E para o alumínio:

$$d_{Al} = \frac{I_{cc}}{S_{Al}} \tag{7-20}$$

Substituindo (7-19) e (7-20) em (7-18) chega-se à equação (7-21).

$$S_{Al} = 1,80 S_{Cu} \tag{7-21}$$

Assim, a seção do condutor de alumínio deve ser 80% maior que a seção do condutor de cobre para se ter desempenhos equivalentes frente ao curto-circuito. Desta forma conclui-se que para o alumínio ser empregado na manufatura, tendo a mesma resistência, a seção transversal do condutor deve ser 1,8 vezes maior que a seção do cobre. Porém, como já foi dito anteriormente o custo do condutor não está atrelado à seção do condutor e sim do peso deste.

Partindo-se de (7-21) e realizando o mesmo procedimento feito para a comparação dos materiais para a mesma resistência de enrolamento chega-se a relação das massas dada pela equação (7-22).

$$m_{Cu} = 1,83 m_{Al} \tag{7-22}$$

E a relação do custo dada pela equação (7-23).

$$c_{Cu} = 0,55. c_{Al} \tag{7-23}$$

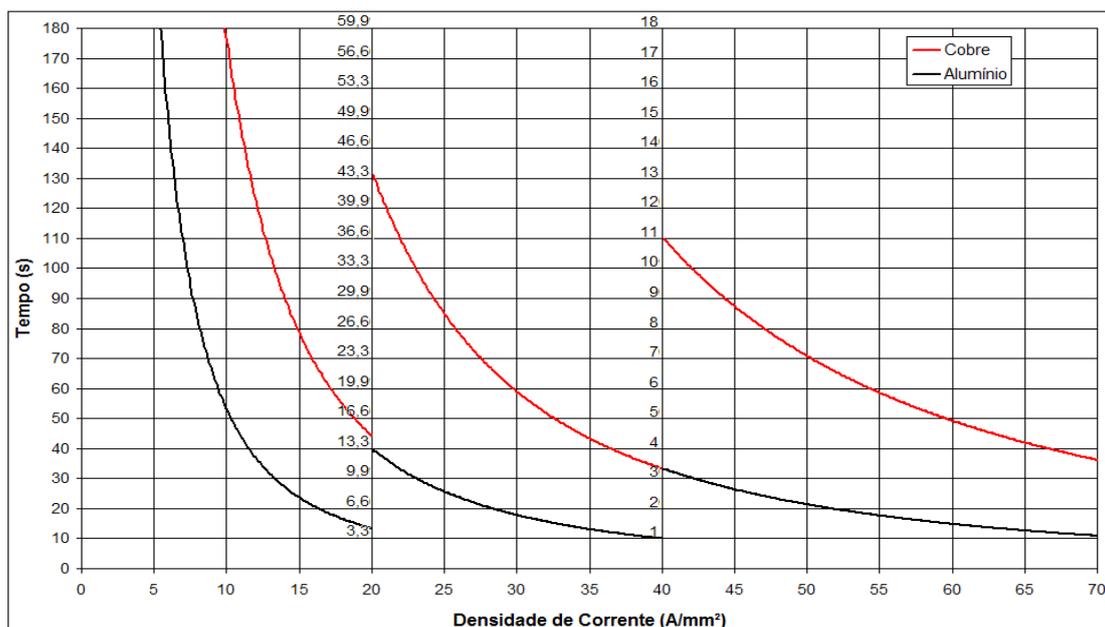


Figura 7-5 – Tempo suportável de curto-circuito

O gráfico apresentado na figura 7-5 traz a comparação entre o tempo que o transformador é capaz de resistir ao curto-circuito para cada valor de densidade de corrente possível para este curto-circuito. A vantagem do cobre como material a ser utilizado no enrolamento para esta condição é visível. Por estes motivos o cobre tende a ser utilizado em transformadores de potência mais elevada, pois este material mostra-se mais adequado para esta aplicação.

### 7.6.2 Comportamento Frente a Esforços Radiais no Curto-Circuito

Os esforços radiais nas bobinas podem ser calculados de acordo com (7-24) para o cobre.

$$\sigma_{med} = 0,48 \cdot 10^{-4} \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot \frac{Wc}{H_{janela} \cdot Z_{pu}^2} \quad (7-24)$$

Sendo,  $\sigma_{med}$  o esforço médio em kg/cm<sup>2</sup>, k é o fator de assimetria do curto-circuito, Wc a perda no enrolamento por fase em W, H<sub>janela</sub> a altura da janela do núcleo em m e Z<sub>pu</sub> a impedância em pu do transformador.

E de acordo com (7-25) para o alumínio.

$$\sigma_{med} = 0,29 \cdot 10^{-4} \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot \frac{Wc}{H_{janela} \cdot Z_{pu}^2} \quad (kg / cm^2) \quad (7-25)$$

O gráfico abaixo presente na figura 7-6 mostra as curvas traçadas pelas equações acima. Novamente nota-se a superioridade do cobre frente ao alumínio.

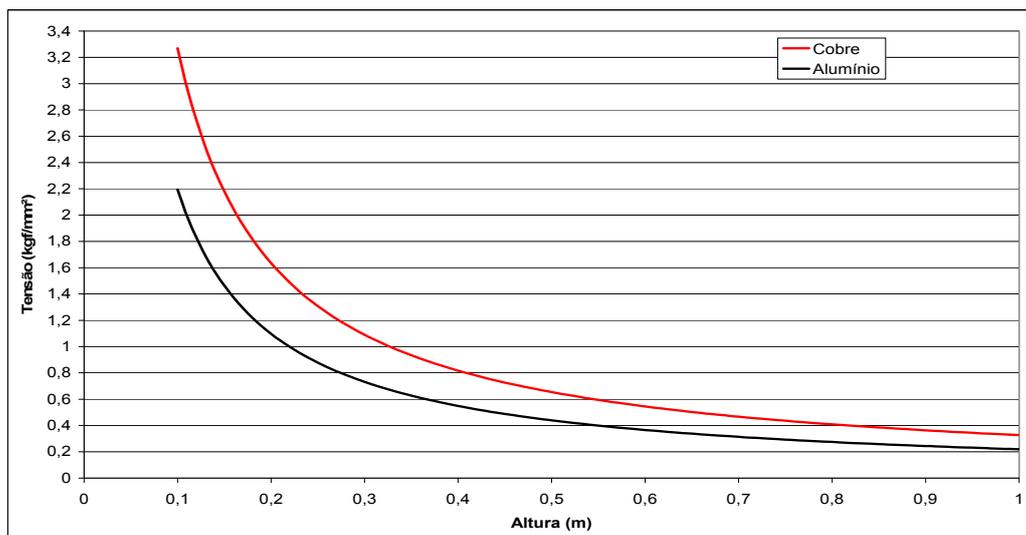


Figura 7-6 – Esforço radial sobre o enrolamento

## 7.7 Perdas Parasitas

Como já foi mostrado anteriormente temos as perdas parasitas definidas em (5-13) para o cobre.

$$P_{F-Cu} = 8825 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2$$

Sendo, B a indução magnética em T, f a frequência em Hz e  $t_{cond}$  a espessura do condutor em m.

E em (5-14) para o alumínio.

$$P_{F-Al} = 17634 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot t_{cond}^2$$

A partir destas equações chegamos à relação (7-26).

$$P_{F-Cu} = \frac{8825}{17634} \cdot P_{F-Al} \rightarrow P_{F-Cu} = 0,5 \cdot P_{F-Al} \quad (7-26)$$

Se for considerado que o acréscimo da seção dada por (7-6) necessário para que o condutor de alumínio se tenha a mesma resistência que o condutor de cobre seja distribuído igualmente em ambas às direções, largura e espessura de um condutor e a largura o mesmo valor da espessura, por exemplo, se obtém.

$$t_{Al}^2 = 1,66 \cdot t_{Cu}^2 \rightarrow t_{Al} = 1,29 \cdot t_{Cu} \quad (7-27)$$

Substituindo a relação (7-27) em (5-12) e seguindo o mesmo raciocínio utilizado para se chegar a (7-26) chega-se à relação (7-28) abaixo.

$$P_{F-Cu} = \frac{8825}{17634 \cdot 1,66} P_{F-Al} \rightarrow P_{F-Cu} = 0,30 \cdot P_{F-Al} \quad (7-28)$$

Desta forma a influência das perdas parasitas quando se utiliza o cobre como material condutor pode ser considerada aproximadamente 3,3 vezes menor que a perda por corrente parasita do alumínio como mostra (7-28).

# Diferenças na Utilização do Metal Amorfo no Núcleo

## 8.1 Considerações Iniciais

No Brasil, estima-se que 15% da energia gerada se perde e que 70% desta perda ocorra nos sistemas de distribuição [20]. As perdas nos transformadores são basicamente de dois tipos: as perdas no cobre, que dependem do carregamento do transformador, e as perdas no núcleo, que dependem do material magnético do mesmo, e estão presentes por toda a vida útil do transformador, independentemente da carga.

A utilização de transformadores de liga amorfa por diversos países tem demonstrado para concessionárias e unidades consumidoras que os transformadores de metal amorfo são capazes de substituir os transformadores tradicionais com núcleo de aço silício. Porém, embora estes transformadores de metal amorfo sejam capazes de reduzir significativamente as perdas, eles podem aumentar o custo operacional durante o ciclo de vida do transformador. Isto é devido ao alto custo inicial se comparado com um transformador tradicional de aço silício, sendo necessário para sua implantação conhecimento da carga a ser atendida e as exatas características do transformador a ser comprado.

Assim este capítulo busca mostrar as diferenças na utilização deste material no projeto e construção de transformadores de distribuição.

## 8.2 Metal Amorfo

Uma estrutura cristalina é a forma como é chamada a distribuição atômica ou molecular de forma ordenada, simétrica e homogênea em todo o material no qual os átomos pertencem como pode ser visto na figura 8-1(a). Já na estrutura amorfa, também chamada de vítrea, estas três características não são respeitadas, como pode ser visto na figura 8-1b. Assim o metal amorfo não tem uma estrutura cristalina como o aço silício. Isto significa que os átomos do metal amorfo estão arranjados em padrão diferente e desordenado quando comparado aos átomos do aço silício.

Este transformador vem sendo explorado comercialmente como uma das formas equipamento capaz de aumentar significativamente a eficiência de um sistema de distribuição quando o assunto é transformador. Entre as soluções técnicas possíveis para melhorar esta eficiência podemos citar:

- Aplicação de aço laminado a frio com grão orientado (CGO - Cold-rolled Grain Oriented), com tecnologia de corte avançada e espessura da laminação reduzida, as folhas de CGO tem espessura mínima de 0,23 mm podendo chegar até a 0,18 mm;
  - Otimização do projeto dos enrolamentos (alumínio ou cobre);
  - Otimização do projeto do núcleo;
  - Mudança das tecnologias de aço CGO para transformadores com núcleos amorfos;
  - Uso de tecnologia baseada em supercondutores e;
  - Outra possibilidade para minimizar as perdas é reduzir as redundâncias no sistema. Ou seja, reduzir o número de transformadores na rede e aumentar a capacidade de utilização dos remanescentes, como feito por algumas distribuidoras de energia na Alemanha. No entanto, essa opção pode não ser viável para a maioria das indústrias e comércios.
- [17]

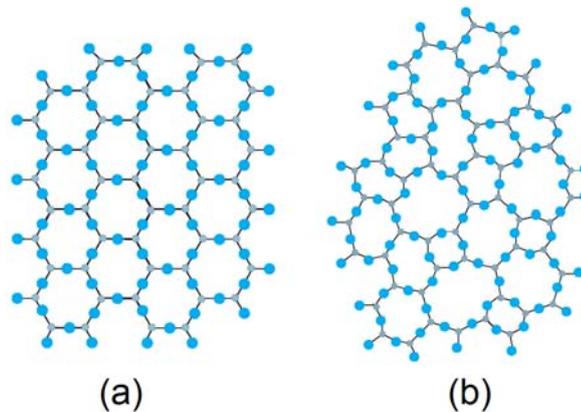


Figura 8-1 – Estrutura cristalina e amorfa

Devido ao processo de fabricação os metais amorfos são extremamente duros, com uma dureza da ordem de quatro a cinco vezes maior que os aços usados como materiais elétricos convencionais [4]. Esta característica além de dificultar sua laminação também prejudica o controle de sua espessura, uma vez que não é possível garantir a mesma espessura durante toda a laminação do metal amorfo [4]. As ferramentas de corte não possuem grau de exatidão estável, desregulando-se durante o processo, devido ao desgaste mais rápido do que as ferramentas quando utilizadas para cortar aço silício.

### 8.3 Dados sobre Utilização

Os transformadores amorfos tem tido desempenho apropriado fora da Europa (principalmente na Ásia), mas não encontraram ainda seu lugar no mercado europeu. Na Espanha, a empresa de energia Endesa tem trabalhado essa questão: em 2007, realizou várias análises técnico-econômicas juntamente com os fabricantes asiáticos e em 2008 realizou um projeto-piloto inovador com 20 unidades de transformadores de núcleo amorfo (400 kVA), o que reduziu em mais de 50% as perdas sem carga em relação ao transformador mais eficiente padronizado na Europa. Em cada unidade, a Endesa economiza 5,5 MWh por ano. Após seis meses de monitoramento dessas unidades em diferentes ambientes (áreas urbanas, rurais e de turismo), a empresa planejava expandir o projeto para cinco países da América do Sul (Brasil, Chile, Argentina, Colômbia e Peru) [17].

A substituição dos 40 milhões de transformadores de distribuição existentes nos Estados Unidos poderia reduzir a perda dos estimados 52 bilhões de kWh por ano devido às perdas em vazio dos transformadores de distribuição para 10 bilhões de kWh, assumindo que 80% das perdas em vazio possam ser economizadas [4].

Como a redução de perdas e a eliminação de desperdícios estão diretamente relacionadas com o aumento da eficiência energética nos sistemas de distribuição de energia elétrica, estratégias para o desenvolvimento e a difusão de transformadores de distribuição com núcleo de metal amorfo continuam sendo postas em prática nos Estados Unidos e também no Japão [14].

Na tabela 8-1 abaixo se pode observar a cronologia do desenvolvimento do metal amorfo e do aço silício.

Tabela 8-1 – Cronologia do metal amorfo [11]

Estrutura molecular	$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	$\text{Fe}_{82}\text{B}_{12}\text{Si}_6$	$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13,5}\text{Si}_{3,5}\text{C}_2$	$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	$\text{FeSi(GO)}$
Ano de introdução no mercado	1976	1978	1979	1980	1935
Indução de saturação (T)	1,6	1,61	1,61	1,58	1,89
Força coercitiva (A/m)	8	-	6,4	4	-
Força coercitiva (A/m) (recozido)	-	2,4	3	1,6	10
Temperatura de Curie (°C)	374	374	370	420	-
Temperatura de cristalização (°C 20/mim)	390	472	480	560	-

## 8.4 Redução das Perdas

Os metais amorfos apresentam perdas por histerese bem pequenas devido à sua estrutura molecular que torna o movimento de orientação dos átomos mais fácil e com atrito reduzido se comparado ao aço silício. Os Metais amorfos apresentam características magnéticas consideravelmente favoráveis ao estabelecimento de indução magnética. O ciclo de histerese do material é estreito e alta permeabilidade magnética é encontrada no mesmo. Estas propriedades garantem um projeto de um circuito magnético com baixa corrente de magnetização e alta eficiência em ampla faixa de potência. Esta é uma das grandes vantagens na adoção do material amorfo [20].

Como pode ser visto através das curvas de magnetização, figura 8-2, o metal amorfo satura em um nível mais baixo de magnetização que o ferro silício. Em complemento à redução das perdas por histerese, os transformadores de metal amorfo têm perdas por correntes parasitas no núcleo, também, reduzidas. As perdas por correntes parasitas de Foucault mais baixas que os transformadores de aço silício devido à pequena espessura da lamina, ou fita, de aço amorfo. Chapas de aço silício tem usualmente de 0,18 a 0,30 milímetros de espessura. Enquanto as fitas de metal amorfo tem menos de 0,03 milímetros. A laminação nesta espessura reduzida resulta em baixas perdas por correntes parasitas [4].

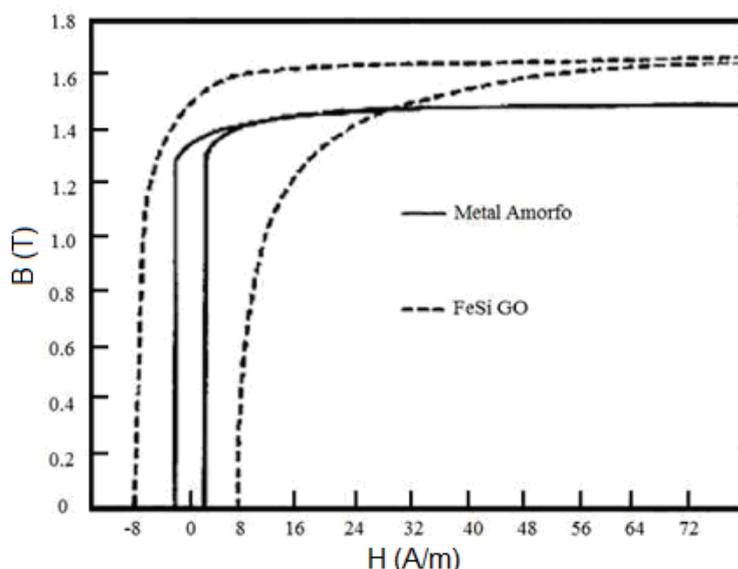


Figura 8-2 – Características de magnetização do metal amorfo e do aço silício [25]

A combinação destas duas perdas reduzidas dá ao transformador construído com metal amorfo um total de 70% a 80% de redução do consumo de energia pelo seu núcleo quando comparado ao transformador tradicional construído com aço silício.

## 8.5 Tratamento Térmico

Tanto para o aço silício quanto para o metal amorfo, existem processos de tratamentos térmicos. Para o aço silício o processo de tratamento pode ser utilizado dependendo das necessidades de cada projeto. As operações de corte e estampagem, bem como a forma original da chapa em bobinas criam, no material, tensões internas que desorientam parcialmente os grãos e aumentam as perdas e a corrente de magnetização. A recondução do material ao seu estado primitivo é conseguida através do recozimento da chapa em atmosfera inerte e a uma alta temperatura [10].

Em chapas de grão de grão orientado com isolamento silicônico, a rebarba gerada pela estampagem não deve exceder a duas vezes a espessura do isolamento. Os excessos de rebarba devem ser eliminados a fim de evitar curto-circuito entre chapas adjacentes, o que aumenta as perdas. A rebarba deve ser eliminada sem chanfrar a chapa. Quando se realiza um recozimento da chapa, a rebarba pode ser parcialmente eliminada. Isto se deve ao fato de que no recozimento da chapa, uma boa parte das rebarbas do corte é eliminada devido à oxidação das mesmas. Sendo assim, o núcleo é construído com chapas finas laminadas a frio, cobertas com uma camada fina de um isolante elétrico inorgânico capaz de agüentar altas temperaturas de recozimento. A função deste material isolante é basicamente impedir o contato entre as chapas para reduzir os possíveis caminhos para correntes parasitas.

Aços elétricos convencionais, por serem magneticamente orientados, têm estresse elástico bem menor que metais amorfos. Estes por não serem, a priori, magneticamente orientados e terem elevado stress elástico, introduzido durante o processo de fabricação, devem ser imperativamente recozidos. [20]

O objetivo do tratamento térmico é prover a relaxação estrutural do material amorfo, diminuindo o número de vazios. Como as ligas amorfas obtidas por solidificação rápida encontram-se num estado de não-equilíbrio, elas devem ser submetidas a um processo de relaxação para o estado de equilíbrio metaestável sempre que o sistema dispuser de mobilidade atômica suficiente, o que é favorecido por meio da temperatura.

Já a imposição de um campo magnético longitudinal durante o ciclo térmico tem por objetivo introduzir uma permeabilidade magnética elevada na direção do fluxo magnético líquido produzido pelas bobinas do primário e do secundário do transformador. Para que o tratamento térmico seja realizado com êxito é impositivo que, durante o processo, a temperatura do núcleo seja mantida abaixo da temperatura de cristalização e da temperatura de Curie. Acima desse valor a liga amorfa deixa de ser um material ferromagnético, de alta permeabilidade, para se tornar um material paramagnético, de baixa permeabilidade. Após o processo térmico o material do núcleo perde a dureza inicial, tornando-se mais rígido e quebradiço, o que requer cuidados adicionais em sua manipulação [19].



Figura 8-3 – Tratamento térmico [19]

## 8.6 Diferenças de Projeto

Abaixo são apresentadas e discutidas algumas características que devem ser levadas em consideração durante o projeto de um transformador com núcleo de metal amorfo.

- Fator de empilhamento

A espessura reduzida traz problemas para a manufatura e projeto de transformadores com metal amorfo. O problema é o fator de empilhamento reduzido devido à pequena espessura das fitas de metal amorfo. O baixo fator de empilhamento resulta em um transformador com a seção do núcleo maior e mais pesado que o transformador tradicional feito de aço silício. O fator de empilhamento é definido como

a taxa de seção do núcleo utilizada, ou preenchida pelo metal. Núcleos feitos com chapas de aço silício tem um fator de empilhamento da ordem de 96%, enquanto núcleos fabricados com metal amorfo tem um fator de empilhamento de apenas 80%.

Conseqüentemente, a área do núcleo destes transformadores é cerca de 18% maior que dos transformadores com núcleo de ferro-silício. Este problema de manufatura resulta em um aumento do custo inicial do transformador com núcleo de metal amorfo de 25% a 30% maior [4].

Os materiais amorfos têm em geral uma composição de 80% de ferro e 20% de boro. Esta composição leva estes materiais a terem uma indução de saturação 20% menor quando comparados aos materiais de ferro puro para a mesma temperatura[20]. De fato, tanto o aumento da temperatura, quanto o aumento de Boro e Silício na liga amorfa, diminui sua indução de saturação.

- Indução máxima

O valor da indução máxima, ou de saturação, das ligas amorfas era muito inferior ao das chapas de aço silício convencional, o que tornavam os transformadores de distribuição com núcleo de metal amorfo demasiadamente largo, devido ao aumento da área do núcleo, e mais caros que os transformadores de distribuição com núcleo de aço silício. Com o aumento do valor da indução de saturação e a redução da força coerciva das ligas amorfas, houve redução no tamanho dos transformadores de distribuição com núcleo de metal amorfo, reduzindo custos e tornando-os competitivos com relação aos transformadores de distribuição com núcleo de aço silício [15]. Porém ainda possuem valores menores de indução máxima quando comparados ao aço silício.

- Aumento do peso do transformador

O baixo fator de empilhamento do metal amorfo causa ao núcleo de metal amorfo a necessidade mais espaço físico do que o núcleo de ferro silício. O baixo nível de saturação do metal amorfo também requer mais metal que o núcleo tradicional de aço silício. Isto resulta no fato de transformadores com núcleo de metal amorfo tenderem a ser mais pesados e maiores que transformadores feitos com núcleo de aço silício. A tabela 8-2 ilustra uma comparação demonstrando o aumento de peso dos transformadores com núcleo de metal amorfo em relação aos transformadores de núcleo de aço silício para diversas potências, monofásicas e trifásicas.

Tabela 8-2 – Comparação do peso entre amorfo e silício [4]

Potência (kVA)	Peso (kg)		
	Metal Amorfo	Aço Silício	Diferença (%)
<b>Monofásico</b>			
<b>10</b>	144	136	6%
<b>15</b>	191	146	31%
<b>25</b>	200	184	9%
<b>50</b>	326	322	1%
<b>75</b>	451	372	21%
<b>100</b>	513	436	18%
<b>Trifásico</b>			
<b>75</b>	921	907	2%
<b>150</b>	1302	1315	-1%
<b>300</b>	1978	1633	21%
<b>500</b>	2762	2223	24%
<b>750</b>	2994	3084	-3%

O aumento do peso e do tamanho dos transformadores com núcleo de metal amorfo pode causar dificuldades para as concessionárias e demais compradores durante a instalação dos transformadores com núcleo de metal amorfo em postes pré-existentes com estruturas projetadas para unidades menores e mais leves como as dos transformadores com núcleo de aço silício. Uma forma de lidar com este custo extra é adicionar o aumento do custo de instalação com a troca de postes ou cubículos para transformadores e aumento das demais estruturas utilizadas para fixação dos transformadores ao investimento inicial para o cálculo do custo total de aquisição.

- Ferrorressonância

Outro problema técnico com transformadores com núcleo de metal amorfo devido às baixas perdas em vazio é a tendência em entrar em ferrorressonância. A ferrorressonância em transformadores ocorre quando a indutância do transformador entra em ressonância com a capacitância do alimentador. A condição de ressonância pode resultar em sobre tensões ferros-ressonantes. As perdas em vazio maiores presentes nos transformadores com núcleo de aço silício podem agir como atenuantes das sobretensões de ferrorressonância o que se torna mais difícil quando se trata de transformadores com núcleo de metal amorfo. Assim, transformadores com baixas perdas em vazio se tornam mais susceptíveis a ferrorressonância quando ocorre um chaveamento próximo ao transformador.

- Dificuldade para reciclagem

Até o momento, existe muita dúvida sobre a capacidade de reciclagem do metal amorfo. Acreditava-se que o metal amorfo utilizado em transformadores não podia ser reciclado. Isto se deve ao fato dos processos de reciclagem do aço de transformador convencional não são aplicáveis aos núcleos amorfos por causa do teor de boro presente no metal amorfo. Porém, a Hitachi Metals acaba de desenvolver um processo de reciclagem através do qual os núcleos usados ganharam uma destinação sendo utilizados no processo de fabricação da fita metálica amorfa nova [26]. Assim, o Japão passa a ser o primeiro país a contar com uma unidade especializada na reciclagem de metal amorfo para utilização em transformadores.

Capítulo 9

---

Conclusões

## 9.1 Conclusões

Esta dissertação de mestrado buscou apresentar o equacionamento para projetos de transformadores para de distribuição de média tensão. Através dos cálculos realizados com a rotina apresentada, foi visto que a necessidade de se utilizar dados de projeto de um transformador preexistente pode manter os vícios deste projeto anterior. Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de melhorias na rotina de cálculo para não mais necessitar de dados de outros projetos para a rotina utilizada.

Apesar da forma como a rotina é utilizada atualmente, este equacionamento, com algumas alterações, pode se tornar capaz de gerar um projeto independente de outros preexistentes. Para tal basta o conhecimento ou capacidade de se estimar certos valores de entrada como foi descrito na dissertação.

O projeto do núcleo de um transformador envolve conhecimentos de cada forma construtiva possível para o núcleo e suas diferenças a serem adotadas durante o projeto. O equacionamento apresentado é capaz de atingir bons resultados se restringindo a utilização para núcleos envolvidos, empilhados e circulares com degraus. Assim, os resultados a serem obtidos para outras configurações podem não serem os esperados, devido a diferenças técnicas que devem ser adotadas.

O projeto dos enrolamentos, assim como do núcleo, também é capaz de atingir bons resultados para bobinas helicoidais utilizando condutores circulares e retangulares, sendo necessários a pesquisa e desenvolvimento deste equacionamento para a utilização de chapas e outras configurações de bobinas.

Existe a necessidade de diferenciar algumas características de projeto que não foram o foco deste trabalho, como as diferenças a serem consideradas na realização de um projeto para núcleo envolvente ou utilizando chapas ao invés de condutores circulares ou retangulares. Este desenvolvimento é fundamental para a realização de análises comparativas mais completas e confiáveis.

A comparação feita entre o cobre e o alumínio aponta o cobre como sendo tecnicamente superior ao alumínio como material condutor, sendo o custo do alumínio a única vantagem em substituição ao cobre. Para uma melhor comparação entre o cobre e o alumínio, o equacionamento apresentado tem de ser expandido para contemplar o cálculo térmico do transformador e, que assim seja possível, agregar ao

custo final do transformador todo o acréscimo de material devido à utilização do alumínio.

Estudos em campo comparativos e mais aprofundados através do acompanhamento dos equipamentos que utilizam tanto o cobre, o alumínio ou ambos para verificar como se comportam durante a vida útil são necessários. Pois, o resultado desta substituição pode implicar no aumento do número de falhas de transformadores em campo devido às características que conferem ao alumínio um aspecto aparentemente mais frágil como condutor do que o cobre.

O cobre apresenta características elétricas mais favoráveis a sua utilização, assim como uma resistividade 39% menor e resistência à ruptura 4,7 vezes maior. Isto torna o cobre um bom material para aplicação em grandes transformadores que necessitam de um material capaz de resistir aos transitórios eletromagnéticos existentes no sistema.

A disparada do preço do cobre frente ao alumínio serviu para o distanciamento entre o preço das duas commodities. O que resulta em maior facilidade econômica para a substituição do cobre pelo alumínio. O cobre, mesmo utilizando condutores com bitolas menores, por necessitar de apenas 60% da seção necessária para conduzir a mesma quantidade de corrente que o alumínio, acaba utilizando uma massa maior de condutor. Sua massa devido à sua maior densidade é quase que o dobro do que a massa de alumínio resultando em aumento de custo para uma análise quanto à resistividade. Porém utilizar somente esta análise como tomada de decisão seria um erro, pois ao somar todos os custos acrescentados pela utilização do alumínio, como por exemplo, maior volume de óleo e maior tanque, o projeto com alumínio não terá tanta vantagem frente ao cobre.

A utilização do alumínio no lugar do cobre ainda gera dúvidas e com isto a necessidade de se investigar melhor quais características do transformador que serão diretamente afetadas pela troca do material condutor. As características que devem ser mais bem analisadas são o comportamento frente a curto-circuito e o comportamento térmico, principalmente, do ponto mais quente do enrolamento.

Desta forma, a utilização do alumínio ainda é capaz de gerar problemas futuros afetando sua eficiência em campo, além de poder resultar em falhas de operação devido ao possível problema de conexão do alumínio com outros metais. A eficiência pode ser perdida se as conexões são ruins devido à perda Joule.

Os Metais amorfos apresentam características magnéticas consideravelmente favoráveis ao estabelecimento da indução magnética. Seu ciclo de histerese é estreito e possui permeabilidade magnética razoável. Graças a isto, é obtido de 70% a 80% de redução no consumo de energia o que traz benefícios para o sistema como um todo devido às perdas a vazio serem mais significativas que as perdas em carga. O benefício desta substituição tem maior impacto na utilização em transformadores de distribuição com perfil de carga rural. Porém, a análise de viabilidade econômica do investimento deve ser feita de forma mais criteriosa devido às diferenças com relação ao transformador tradicional com núcleo de aço silício e os possíveis problemas que esta substituição pode trazer.

Devido ao fator de empilhamento de 80% do núcleo com metal amorfo contra um fator da ordem de 96% para núcleos com aço silício, o transformador com núcleo de metal amorfo terá um aumento significativo em seu tamanho e peso. Assim, este aumento deve ser diferenciado e mensurado no processo de análise de compra devido ao aumento de custos para sua instalação.

Um possível problema que deve ser analisado futuramente é o aumento da possibilidade de se ter ferrorressonância. Pois, caso este problema comece a surgir no sistema de distribuição em grande número, este começará a prejudicar a rede de distribuição como um todo.

A dificuldade de reciclar este metal amorfo, dada pelo teor de boro presente na liga, o que faz com que este metal não possa ser misturado a outros tipos de liga sem afetar as características desta outra liga, pode gerar inconvenientes ambientais até que se tenha uma unidade capaz de processar e reciclar este material no Brasil de forma eficiente.

## 9.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se para continuação deste trabalho:

- Implementar o procedimento para projeto térmico de transformadores;
- Implementar o procedimento para projeto da isolação de transformadores em substituição à utilização de dados tabelados;
- Implementar o procedimento para projeto de curto-circuito de transformadores;

- Implementar o procedimento para cálculo mecânico do tanque.
- Realizar comparações entre os materiais condutores considerando os fatores térmicos e de curto-circuito.

## Referências Bibliográficas

- [1]. Ries, W. *Transformadores Fundamentos para o Projeto e Cálculo*. 1ed. EDIPUCRS, 2007.
- [2]. Martin, J. C. *Teoría, Calculo y Construcción de Transformadores*. 3ed. Labor S.A., 1957.
- [3]. Feinberg, R. *Modern Power Transformer Practice*. 1ed. Macmillan, 1979.
- [4]. Kennedy, B. *Energy Efficient Transformers*. 1ed. McGraw-Hill, 1998.
- [5]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5161. *Produtos laminados planos de aço para fins elétricos - Verificação das propriedades* JUL.1977.
- [6]. Nema Standards Publication – TP1 – *Guide for determining Energy Efficiency for Distribution Transformers*. 2002.
- [7]. Riemersma, H.; Eckels, P.; Barton, M.; Murphy, J.; Litz, D.; Roach, J. *Application of Superconducting Technology to Power Transformers*. IEEE. 1981
- [8]. Williamson, J. *Economia aberta e a economia mundial*. Rio de Janeiro Campus, 1989.
- [9]. Cotta, J. L., *Elasticidade - Demanda e Preço*. 2005. Monografia (Especialização em Matemática) - Departamento de Matemática – Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005
- [10]. Do Rio, A. C.; Neto, J. M. S.; Torres, E. A. *Análise Comparativa Entre Condutores de Cobre e Alumínio – Uma Abordagem Sob a Ótica de Energia Agregada ao Produto*. CLADE. 2008
- [11]. Fish, Gordon E., *Soft magnetic materials*. Proceedings of the IEEE, 1990.
- [12]. Luciano, B. A. Castro, W. B. *Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfo*. REMAP, Revista Eletrônica de Materiais e Processos. 2011
- [13]. NG, H. W., HASEGAWA, R., LEE, A. C. e LOWDERMILK, L. A. *Amorphous alloy core distribution transformer*. Proceedings of the IEEE, 1991.

[14]. Hasegawa, R. *Application of rapidly solidified metals in the USA and Japan*. Bern: Technische Rundschau, 1991.

[15]. Hasegawa, R.; Azuma, D. *Impact of amorphous metalbased transformers on energy efficiency and environment*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008.

[16]. Irrek, W. Targosz, R. Topalis, F. V. *Uso de transformadores mais eficientes na indústria e no comércio*. Revista Eletricidade Moderna, Aranda Editora, 2010.

[17]. Luciano, B. A.; Freire, R. C. S.; Bezerra R. B.; Inácio, R. C. *Transformadores com núcleo de liga amorfa em sistemas de distribuição*. Eletricidade Moderna, 2010.

[18]. Couto, E. C.; Freitas, A. G.; Vilegas, E. A.; Oliveira, P. S. *Transformadores com núcleo de metal amorfo: uma solução viável para redução de perdas técnicas da distribuição*. SENDI. 2010

[19]. Fonseca W. S. Lopes A. C. Nunes M. V. A. *Análise de Esforços Eletromecânicos em Transformadores Amorfo através de Modelagem Computacional comparando à Norma IEC 60076-5*. CIIT - Conferencia Ibero-Americana de Ingeniería e Innovación Tecnológica. 2010

[20]. Silva, S.R. Vasconcelos, F.H. Ragone, J.C. Pinto, M.F. *Caracterização de Transformadores com Núcleo de Metal Amorfo para Aplicação em Redes Monofásicas de Distribuição de Energia Elétrica*, CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2001.

[21]. Campos, M. L. B., *Estudo de Aplicação Experimental e Viabilidade de Utilização de Transformadores de Distribuição com Núcleo Amorfo*. Dissertação de Mestrado em Energia, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo - SP, 2006.

[22]. Barros, D. F. T. *Análise da Viabilidade Financeira da Utilização de Transformadores de Núcleo Amorfo – Estudo de Caso Aplicado ao Projeto de Subestação Aérea de 75 KVA*. Monografia Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2011.

[23]. Chaves, D., *Eficiência Energética com Transformadores de Distribuição de Metal Amorfo*. Promotion Partnership Vijai Elétrica do Brasil, 2010.

[24]. DeCristofaro, N. *Amorphous Metals in Electric-Power Distribution Applications*, In MRS Bulletin, 1998

[25]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5440- Transformadores para redes aéreas de distribuição - Padronização (Projeto de revisão da NBR 5440/1987)*. Rio de Janeiro: ABNT, dezembro de 1997.

[26]. Hitachi Metals. Reciclagem Disponível na internet via URL:[http://www.hitachi.com/rev/archive/2011/\\_\\_\\_icsFiles/afiedfile/2011/09/06/r2011\\_05\\_113.pdf](http://www.hitachi.com/rev/archive/2011/___icsFiles/afiedfile/2011/09/06/r2011_05_113.pdf). Arquivo capturado em Fevereiro de 2012.

[27]. McLyman, C. W. T. *Magnetic Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors: a user's guide to practice and specification* 2ed. Marcel Dekker.

[28]. Galván , J.C.O., León F., Georgilakis, P.S., Pérez, R. E., Selection of copper against aluminium windings for distribution transformers, IET. 2009 IEEE.

[29]. Datalink. Nível do Óleo Disponível na internet via URL: <http://www.datalink.srv.br/cuidados-com-transformador>. Arquivo capturado em Fevereiro de 2012.

[30]. London Metal Exchange. Cotações Cobre e Alumínio Disponível na internet via URL: <http://www.lme.com>. Dados capturados em Janeiro de 2012.

[31]. Hedric. Trespasseamento. Disponível na internet via URL: [www.hedrich.com/products/core-cutting-and-stacking.html](http://www.hedrich.com/products/core-cutting-and-stacking.html). Imagem capturada em Janeiro de 2012.

[32]. Mipon Core. Núcleo. Disponível na internet via URL: <http://www.nipponcore.com/b-02>. Imagem capturada em Janeiro de 2012.

[33]. Intermountain Electronics. Núcleo. Disponível na internet via URL: <http://intermountainelectronics.com/Transformers-Dry-Type.aspx>. Imagem capturada em Dezembro de 2011.