



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

Centro de Tecnologia e Urbanismo
Departamento de Engenharia Elétrica

Saulo da Silva Ferraz Junior

Avaliação e Seletividade de Técnicas de Montagens de Núcleos de Transformadores

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Londrina, PR
2012



Saulo da Silva Ferraz Junior

Avaliação e Seletividade de Técnicas de Montagens de Núcleos de Transformadores

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica
Especialidade: Transformadores

Orientador:
Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo

Londrina, PR
2012

Ficha Catalográfica

da Silva Ferraz Junior, Saulo

Avaliação e Seletividade de Técnicas de Montagens de Núcleos de Transformadores. Londrina, PR, 2012. 85 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Núcleo de transformadores. 2. Transformador de Potência I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Título.

Saulo da Silva Ferraz Junior

Avaliação e Seletividade de Técnicas de Montagens de Núcleos de Transformadores

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica
Especialidade: Transformadores

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo
Depto. de Engenharia Elétrica.
Orientador

Prof. Dr. Márcio Mendonça
Depto. de Engenharia Elétrica.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Ruberlei Gaino
Depto. de Engenharia Elétrica.
Universidade Estadual de Londrina.

27 de maio de 2012

Elevo a ti, Pai de bondade, o meu agradecimento pelo sucesso que acabo de conseguir. Meu espírito se enche de paz porque atendestes às minhas esperanças e às minhas fervorosas súplicas. Sem ti não chegaria a celebrar esta vitória, mas, ao mesmo tempo, sinto-me feliz e recompensado.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por iluminar os meus passos e me guiar para o lugar certo, a felicidade.

Aos meus pais Saulo e Irani, que me ajudaram a chegar até aqui e dando-me muita força para prosseguir na minha vida acadêmica.

A minha esposa Ana Paula e ao meu filho Heitor, por estar sempre ao meu lado me ajudando e me passando muita coragem e confiança.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Henrique Geromel pelo incentivo em iniciar o mestrado.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo pela paciência e todo apoio para que fosse possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcio Mendonça professor da UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela ajuda e sugestões para a conclusão do trabalho.

A empresa Romagnole pelo apoio e ajuda sobre o estudo em fábrica.

A Universidade Estadual de Londrina por possibilitar a realização dessa importante fase em minha vida.

Deus obrigado por tudo.

Resumo

O trabalho proposto refere-se à avaliação e seletividade (prática em chão de fábrica) de técnicas de montagem de núcleo de transformadores, visando à redução nos custos capitalizados e maior eficiência energética podendo assim mostrar as concessionárias de energia elétrica a tão importante redução das perdas dos transformadores. Tais perdas se traduzem em custo para a concessionária, como solução para este problema o trabalho realizará dois protótipo de transformadores, um de 300kVA e outro de 500kVA onde poderá ser analisado qual a melhor técnica de montagem dos núcleos em estudo, o tipo Convencional (Single Step-lap) e o Step-lap (Multi Step-lap), o resultado mostrado traz uma comparação detalhada entre os protótipos, e com os resultados obtidos sobre a otimização da técnica de montagem dos mesmos, que visa sempre a redução de suas perdas.

Palavras-chave: núcleo de transformadores, transformador de potência, ensaios elétricos em transformadores.

Abstract

The proposed paper refers to the evaluation and selectivity (for practical factory floor) of assembling transformers cores techniques, aiming at reductions of capitalized costs and more energy efficiency, so that it can be shown to energy utilities an important reduction in the losses of the transformers. Such losses represent costs to utilities, and as a solution to this problem, it will be made two prototypes, a 300 kVA transformer and a 500 kVA transformer, so that it will be possible to analyze the better assembling transformer cores techniques, Single Step-Lap or Multi Step-Lap, and the results obtained on the optimization of the technique of assembling the same, which always aims to reduce its losses.

Keywords: core transformers, power transformer, electrical tests in transformers.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos e Abreviaturas

1	Introdução	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Principal	18
1.1.2	Secundário	18
1.1.3	Justificativas	18
1.1.4	Metodologia	20
1.1.5	Estruturação do Trabalho	20
2	Estudos e Pesquisas sobre Núcleos de Transformadores, Perdas e Rendimento.	22
2.1	Introdução	22
2.2	Estudo de análise de característicos de transformadores trifásicos step-lap wound core.	22
2.3	Um método prático de engenharia para simulação e validação das juntas de núcleo anisotropia laminado.	22
2.4	Fluxo magnético das juntas do núcleo de transformador de distribuição.	23
2.5	Verificações computacionais e experimentais da permeabilidade equivalente das juntas step-lap dos núcleos de transformadores.	23
2.6	Redução de perdas em transformadores de distribuição.	23

2.7	Avaliação econômica de transformadores de distribuição.	24
2.8	Transformador de Potência	24
2.8.1	Introdução	24
2.8.2	Características Nominais	25
2.8.3	Rendimentos e Perdas de Potência	26
2.9	Tipos de Transformadores Comercializados	33
2.9.1	Transformadores de Distribuição	33
2.9.2	Transformadores Industriais	34
2.9.3	Transformadores Pedestais	35
2.9.4	Transformadores Secos	36
2.10	Conclusão	37
3	Materiais para Núcleo de Transformadores	38
3.1	Introdução	38
3.2	Metal Amorfo	39
3.2.1	Núcleo Amorfo x Núcleo de Aço Silício - Fator de Elevação de Temperatura	41
3.2.2	Núcleo Amorfo x Núcleo de Aço Silício - Vantagens	42
3.2.3	Comparação das Perdas em vazio do Núcleo de Metal Amorfo x Núcleo de Aço Silício	42
3.3	Aço Silício	43
3.3.1	Aço Silício de Grão Orientado (GO)	44
3.3.2	Orientação dos Grãos	46
3.3.3	Laminação	47
3.3.4	Tratamento Térmico	48
3.3.5	Isolamento Superficial das Chapas	48
3.3.6	Perdas - Normas e Valores para Referência	49
3.3.7	Processos de Fabricação de Ligas de Aço Silício	51
3.4	Conclusão	52

4	Comparação experimental entre os Núcleos Single Step-lap e Multi Step-lap.	53
4.1	Introdução	53
4.2	Núcleo em processo de montagem	53
4.3	Aspectos Construtivos para a Diminuição das Perdas no Núcleo . .	58
4.4	Anisotropia Cristalina	59
4.5	Conclusão	61
5	Resultados Obtidos e Sugestões para Melhorias.	63
5.1	Introdução	63
5.2	Procedimento para a realização do ensaio de curva de saturação .	63
5.3	Dados obtidos sobre os ensaios de curva de saturação	66
5.4	Perda em um Transformador	70
5.5	Estudo Prático de Redução das Perdas no Núcleo	70
5.6	Estudo da viabilidade econômica	75
5.7	Conclusão	77
6	Conclusão	78
	Referências	79
	Apêndice A – Fluxo de Produção das Ligas de Aço-silício de Grão Orientado	82
	Apêndice B – Ensaio de Curva de Saturação do Núcleo Convencional (Single Step-Lap)	84
	Apêndice C – Ensaio de Curva de Saturação do Núcleo Step-lap (Multi Step-Lap)	85

Lista de Figuras

2.1	Transformador de Potência.	25
2.2	Curvas Rendimento x Carga.	27
2.3	Relação entre as perdas no núcleo e as perdas nos enrolamentos, em função da carga imposta ao transformador.	28
2.4	Curva de histerese.	30
2.5	Transformador de Distribuição Monofásico.	33
2.6	Transformador de Distribuição Trifásico.	34
2.7	Transformador Industrial.	35
2.8	Transformador Pedestal.	36
2.9	Transformador Seco.	37
3.1	Elevação de Temperatura Núcleo Amorfo.	41
3.2	Elevação de Temperatura Núcleo de Grão Orientado.	41
3.3	Características Garantidas do aço silício GO.	44
3.4	Construção de lâmina de aço para núcleos magnéticos com no plano da laminação.	47
3.5	Perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo(GO- M4).	50
3.6	Potência de excitação em função da densidade máxima de fluxo, em 60 Hz (GO-M4).	50
3.7	Perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo(GO- M5).	50
3.8	Potência de excitação em função da densidade máxima defluxo, em 60 Hz (GO-M5).	50
4.1	Núcleo magnético de transformador com destaque para as regiões das juntas.	53

4.2	Detalhe da montagem do núcleo Single Step-lap.	54
4.3	Detalhe da montagem do núcleo Multi Step-lap.	54
4.4	Junta Single Step-lap do núcleo de um transformador de potência.	55
4.5	Junta Multi Step-lap do núcleo de um transformador de potência.	55
4.6	Perfis das juntas Single Step-lap.	56
4.7	Perfis das juntas Multi Step-lap.	56
4.8	Montagem do núcleo Single Step-Lap sem a furação nas chapas. .	57
4.9	Detalhe da furação nas chapas do núcleo Multi Step-lap e montagem dos tirantes.	57
4.10	Núcleo Multi Step-lap e tirantes após aperto.	57
4.11	Seção transversal do núcleo.	58
4.12	- Núcleo com chapas em corte de 90°.	58
4.13	Núcleo com chapas em corte de 45°.	59
4.14	Composição de núcleo com chapas em corte de 45° nas juntas. . .	60
4.15	Detalhe do corte representando a junta de núcleo Single Step-lap.	61
4.16	Detalhe do corte representando a junta de núcleo Multi Step-lap .	61
5.1	Tela inicial do analisador de perdas do ensaio de saturação.	65
5.2	Curva do núcleo no analisador de perdas do ensaio de saturação. .	65
5.3	Gerador 300kVA.	66
5.4	Curva do núcleo Single Step-lap W/Kg x Indução.	67
5.5	Curva do núcleo Multi Step-lap W/Kg x Indução.	70
5.6	Transformador 300 kVA, Padrão x Protópico = - 5,60% (Padrão ABNT)	73
5.7	Transformador 500 kVA, Padrão x Protópico = - 6,20% (Padrão COPEL)	73
5.8	Comparação das perdas do núcleo W/Kg transformador 300 kVA - Padrão ABNT.	74
5.9	Comparação das perdas do núcleo W/Kg transformador 500 kVA - Padrão ABNT.	74

A.1 Fluxo de produção das ligas de aço-silício de grão orientado. . . .	83
---	----

Lista de Tabelas

2.1	Rendimentos típicos para transformadores trifásicos imersos em fluido isolante (%).	26
2.2	Rendimentos típicos para transformadores monofásicos imersos em fluido isolante (%).	27
3.1	Perdas com Núcleo Amorfo	42
3.2	Perdas com Núcleo em Aço Silício	43
3.3	Chapas de aço-silício - Características garantidas por normas. . .	49
3.4	Fator de utilização	51
5.1	Dados obtidos de um transformador de 300kVA com montagem do núcleo em Multi Step-lap.	68
5.2	Dados obtidos de um transformador de 500kVA com montagem do núcleo em Multi Step-lap.	69
5.3	Comparação das perdas e custo capitalizado de um transformador 300kVA - Padrão ABNT	71
5.4	Comparação das perdas e custo capitalizado de um transformador 500kVA - Padrão COPEL	72
5.5	Comportamento do mercado cativo aberto por classe de consumo - COPEL	75

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Φ	fluxo magnético no material
fmm	força magnetomotriz
\mathfrak{R}	relutância
PN	potência aparente nominal
WE	perdas por efeito Joule nos enrolamentos
WN	perdas magnéticas no núcleo
$\eta_{Máximo}$	magnitude do rendimento máximo
B	Indução magnética
WΩ	perdas ôhmicas
Hc	forças coercivas
Fe	ferro puro
<i>T</i>	Tesla
σ	condutividade
GO	grãos orientados
ccc	fase ferrítica
kVA	Kilovolt-ampères
kV	Kilo Volt
V	Volts
A	Ampere
g	entreferro
Fe-Si	ferro-silício
W/Kg	Watts por Kilograma
GWh	Gigawatts-hora
MVA	Megavolts-ampères
MW	Megawatts

1 Introdução

Tanto a eletricidade quanto o magnetismo são manifestações de um mesmo tipo de fenômeno físico: o eletromagnetismo.

Eis alguns exemplos de fenômenos eletromagnéticos: a existência de cargas elétricas, luz, ondas de rádio e TV, microondas, raios infravermelhos, raios ultravioletas, raios X, etc.

Diversos pesquisadores contribuíram ao longo de séculos para descobrir as leis que regem o eletromagnetismo. No século XIX, o físico James C. Maxwell conseguiu sintetizar e tornar úteis todas as descobertas anteriores sobre o assunto resumindo-as em quatro equações, chamadas de equações de Maxwell.

Entretanto, no trabalho proposta onde envolve um estudo sobre transformadores principalmente aplicados aos projetos referentes à construção dos núcleos Single Step-lap e o tipo Multi Step-lap, podemos expressar algumas idéias preliminares envolvendo o magnetismo sem precisar recorrer a conhecimentos avançados.

Os transformadores começaram a ser fabricados no final do século XIX e desde então a cada ano há um número crescente de artigos relacionados ao mesmo. Os transformadores de potência são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para outro mantendo a mesma frequência em diferentes níveis de tensão e de corrente. Por motivo dos transformadores estarem relacionados ao sistema de energia elétrica grande parte desses tem como foco o interesse sobre estudos relacionados às perdas magnéticas nos núcleos de transformadores. Com a preocupação relacionada à eficiência energética, vários estudiosos estão aumentando seus interesses em reduzir o consumo de energia dos transformadores aumentando a concorrência entre empresas que procuram melhorar o seu rendimento.

As concessionárias também são grandes interessadas nos estudos voltados a redução de custos proporcionando um grande enlace entre o setor industrial e de pesquisa. Os transformadores de potência empregam materiais com custos mais elevados como aço-silício, cobre ou alumínio, óleo, etc, o núcleo magnético não é a principal parte do transformador que apresenta falhas, porém é a que necessita de um melhor desempenho, pois o mesmo apresenta cerca de 40% do custo final do

transformador.

A evolução desse trabalho é a comparação dos tipos de montagens dos núcleos de transformadores, o tipo Convencional (Single Step-lap) e o tipo Step-lap (Multi Step-lap), visando à melhoria em sua montagem e proporcionando uma redução nas perdas dos núcleos dos transformadores e conseqüentemente melhorando seu desempenho.

As concessionárias de energia elétrica e as indústrias solicitam aos fabricantes de transformadores um nível máximo por norma para as perdas do equipamento. Caso seja ultrapassado esse nível, o transformador é reprovado ou o fabricante paga uma multa ao cliente, isso também é um dos grandes motivos para o estudo de perdas nos núcleos dos transformadores.

Este trabalho utiliza método de aplicações e testes em núcleo de transformadores de potência, em especial os tipos, Convencional (Single Step-lap) e o Step-lap (Multi Step-lap) em estudo, com o objetivo da otimização de seu rendimento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Principal

O objetivo principal do trabalho proposto é o estudo voltado a perdas nos núcleos de transformadores, com o pensamento sempre voltado a redução e eficiência energética.

Parte deste trabalho foi publicado no CBEE 2011 IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética Julho 2011.

1.1.2 Secundário

Após os resultados obtidos em relação e redução das perdas nos núcleos de transformadores, poderemos futuramente trabalhar em parceria junto às concessionárias de energia elétrica indicando uma possível revisão nas normas estabelecidas por elas, onde assim seria empregada em todas as indústrias fabricantes de transformadores.

1.1.3 Justificativas

Este trabalho proposto apresenta a importância de ações para redução de perdas nos transformadores, onde contamos com tecnologias que ajudam na melhoria da eficiência energética desses equipamentos.

Para isso, na construção de núcleos de transformadores de potência, o trabalho foca a comparação entre os dois tipos de núcleos com utilização de chapas de aço silício, o tipo Convencional (Single Step-lap) e o tipo Step-lap (Multi Step-lap). Com esse estudo será possível trabalhar em paralelo as concessionárias, como por exemplo, com o plano de crescimento da Copel até 2015.

Para a Copel o objetivo da empresa é expandir seu sistema próprio em 1 mil km de novas linhas de transmissão (hoje são quase 2 mil km de linhas) e aumentar a capacidade de transformação das subestações em até 4 mil MVA (megavolts-ampères), ampliando em 62% suas receitas na atividade, esse plano se encontra no site da copel (www.copel.com).

Pela primeira vez desde abril de 1994, quando se tornou uma companhia de capital aberto com ações negociadas em bolsa, a Copel divulgou ao público seu planejamento estratégico de longo prazo, informando à sociedade e ao mercado investidor quanto e em quais atividades pretende vir a se expandir, considerando um horizonte de quatro anos.

As metas propostas no documento apresentado pela Copel ao público e ao mercado financeiro são arrojadas e alcançam todos os negócios da sua atividade principal - geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica e negócios em áreas complementares (distribuição de gás canalizado, saneamento, telecomunicações e serviços especializados de engenharia).

Está nos planos da Copel, por exemplo, expandir em até 44% a sua atual capacidade instalada para geração de eletricidade, que é de 5.158 MW (megawatts), aí incluída a potência proporcional de empreendimentos onde a estatal tem participação. O documento previne que o alcance da meta dependerá do sucesso de operações para a aquisição de novos ativos e de vitória nos leilões de novas usinas que venham a ser realizados pela Aneel.

Contudo, o texto também antecipa que boa parte dessa disponibilidade futura deverá resultar do aproveitamento de fontes alternativas - naturais, limpas e renováveis - de produção de energia. A pretensão da companhia é que tais fontes representem 22% de participação na sua matriz energética em 2015.

Na área da comercialização de energia, a estatal pretende aumentar para até 34% a parcela de sua geração própria negociada no ambiente de contratação livre, ampliando a rentabilidade dos seus ativos. No segmento de transmissão de energia, atividade que faz o transporte da eletricidade por longas distâncias, o objetivo da Copel é expandir seu sistema próprio em 1 mil km de novas linhas de transmissão (hoje são quase 2 mil km de linhas) e aumentar a capacidade de transformação das subestações em até 4 mil MVA (megavolts-ampères), ampliando em 62% suas receitas na atividade.

Ainda para 2012 a Copel tem diversos empreendimentos e projetos em andamento. Entre eles está a conclusão da Usina de Mauá, que acrescentará 361 MW ao parque gerador da companhia, e dar seqüência à já iniciada construção da Usina Hidrelétrica Colíder, no Mato Grosso, que agregará - a partir de janeiro de 2015 - 300 MW às disponibilidades da empresa.

Outras usinas estão nos planos da Copel. Este ano, a companhia quer concluir os estudos para participar da Usina Baixo Iguaçu (350 MW) e ter as condições necessárias para iniciar a construção da Usina de São Jerônimo, no rio Tibagi (331 MW). Ainda em 2012 a Copel também pretende ter em andamento - além da PCH Cavernoso 2, de 19 MW, cujos trabalhos já foram iniciados - as obras da PCH Dois Saltos, com potência projetada de 25 MW, além de concluir os estudos de viabilidade de diversas PCHs no Rio Chopim cuja potência conjunta somará até 120 MW.

Ainda em relação à geração, até o final do ano a Copel pretende participar de leilões de energia renováveis, que podem acrescentar até 500 MW de capacidade no seu parque instalado.

O planejamento estratégico foi elaborado de acordo com o novo referencial estratégico da Companhia - formado pelos conceitos de missão, visão, valores e diretrizes estratégicas, que estabelece e baliza o posicionamento futuro.

1.1.4 Metodologia

O trabalho proposto como estudos, ensaios e demais testes em relação à montagem dos núcleos de transformadores dos tipos Single Step-lap e Multi Step-lap, serão realizados em uma empresa fabricante nacional de transformadores Romagnole Produtos Elétricos S.A, onde poderá ser adquirido um banco de dados dos ensaios de curva de saturação podendo assim realizar uma análise crítica sobre as perdas nos núcleos, e posteriormente dar início a um protótipo de 300kVA e 500kVA onde será aplicado os valores adquiridos dos ensaios, e assim, podendo ser mostrado a redução das perdas e custo em comparação aos dois tipos de montagem dos núcleos, o tipo Single Step-lap e Multi Step-lap.

1.1.5 Estruturação do Trabalho

O capítulo 1 mostra ao leitor uma introdução sobre o estudo das perdas e eficiências nos núcleos de transformadores.

No capítulo 2 será apresentado alguns estudos e pesquisas sobre núcleo de transformadores, perdas e rendimento, podendo assim ser analisado o quanto cresce o

estudo voltado a eficiência energética.

No capítulo 3 será apresentado um histórico sobre transformadores de Potência, os conceitos sobre perdas no ferro ou perdas no núcleo do transformador (Histerese, Foucault e Suplementares), e também os tipos de transformadores comercializados como os transformadores de Distribuição, Industrial, Pedestal e Seco.

O capítulo 4 mostra os materiais utilizados em núcleo de transformadores, como aço silício e o metal amorfo.

O capítulo 5 mostra a comparação experimental dos dois tipos de construção de núcleo para transformadores de potência, o tipo Single Step-lap e o tipo Multi Step-lap.

O capítulo 6 será apresentado os resultados obtidos e sugestões para melhorias em relação aos protótipos dos transformadores de 300kVA e 500kVA, podendo assim mostrar os resultados obtidos como a eventual redução de perdas e custo.

O capítulo 7 nos mostra a conclusão geral sobre esse importante estudo.

O apêndice A mostra o fluxo de produção das ligas de aço-silício de grão orientado.

No apêndice B encontram-se os alguns ensaios de curva de saturação referente a montagem do núcleo do tipo Single Step-lap.

O apêndice C mostrará alguns ensaios de curva de saturação referente a montagem do núcleo do tipo Multi Step-lap.

2 Estudos e Pesquisas sobre Núcleos de Transformadores, Perdas e Rendimento.

2.1 Introdução

Este capítulo cita fundamentos sobre estudos relacionados ao desenvolvimento desse trabalho.

2.2 Estudo de análise de característicos de transformadores trifásicos step-lap wound core.

Neste trabalho, o algoritmo analítico usando curvas de magnetização equivalente é proposto para análise de transformador trifásico com wound core em consideração de uma junta step-lap ou estrutura sem corte.

Influências na corrente de excitação e perdas no núcleo do transformador trifásico também são examinadas (MAE, A., HARADA, K., ISHIHARA, Y., TODAKA, T., 2002).

2.3 Um método prático de engenharia para simulação e validação das juntas de núcleo anisotropia laminado.

Este trabalho apresenta uma introdução prática lidando com juntas de núcleo anisotrópicos laminados em problemas de engenharia, principalmente em transformadores de larga escala. Um modelo de núcleo aproximado é proposto através da discussão da viabilidade dos trabalhos no mercado doméstico e internacional. Indica-se que este modelo trará bons resultados nas articulações de três níveis de juntas step-lap para condições de saturação acima de um nível adequado (CHENG, Z., HU, Q., JIAO, C., ZHANG, J., WANG, J., ZHANG, X., DU, Y.,

FAN, Y. and LIU, L., 2007).

2.4 Fluxo magnético das juntas do núcleo de transformador de distribuição.

Este trabalho apresenta resultados de um estudo analítico rigoroso realizado para entender o papel que as juntas têm para determinar o desempenho dos núcleos em transformadores de força e de potência.

Este trabalho apresenta os detalhes da distribuição e redistribuição do fluxo magnético na região da junta do núcleo ao longo da direção da altura do pacote do núcleo com a função de operar a densidade do fluxo, o material da junta do núcleo, configuração da junta e os parâmetros do projeto da junta. Os resultados são apresentados tanto para juntas convencionais como para step-lap.

Os resultados ilustram os benefícios da junta step-lap na redução de perdas no núcleo, barulho e corrente de excitação. Os resultados tb explicam o impacto da sobreposição do comprimento, o número de laminações, e a contribuição da região da junta para a performance do núcleo todo. A densidade calculada do fluxo em formato de ondas na região da junta se encontraram em acordo com as ondas medidas (GÜNTHER F. MECHLER and RAMSIS S. GIRGIS, F., 2000).

2.5 Verificações computacionais e experimentais da permeabilidade equivalente das juntas step-lap dos núcleos de transformadores.

Este trabalho desenvolve um eficiente método computacional para estabelecer características equivalentes de juntas magnéticas de núcleo de transformadores, com ênfase especial no projeto de step-lap. Isto permite análise comparativa sem a necessidade de medições difíceis (LOFFLER, F., BOOTH, T., BENGTSSON, C. and GRAMM, K., 1995).

2.6 Redução de perdas em transformadores de distribuição.

Este trabalho examina três métodos de reduzir perdas nos transformadores de distribuição. O primeiro método analisa os efeitos de usar escudos eletromagnéticos de alumínio em um transformador de distribuição. O objetivo de colocar escu-

dos eletromagnéticos nas paredes do tanque do transformador de distribuição é reduzir perdas em devaneio.

Um transformador de 500 kVA (shell-type) foi usado nos experimentos. Os resultados globais apresentados indicam que as perdas em devaneio podem ser consideravelmente reduzidas qdo escudos eletromagnéticos são aplicados no tanque do transformador.

No experimento, as paredes do tanque foram forradas com lâmina de alumínio. A possibilidade de reduzir as perdas dielétricas foi mostrada através de experiências no segundo método. E o terceiro método de trabalho analisa o comportamento das perdas em transformadores de distribuição, como uma função da configuração dos parâmetros do projeto da junta.

A configuração da junta usada neste trabalho é chamada de junta step-lap (CARLOS, J., YILU L., CAÑEDO, J., ESCARELA, R., DRIESEN, J. and MORENO, P., 2003).

2.7 Avaliação econômica de transformadores de distribuição.

O transformador de distribuição tem a função de transformar o nível de tensão e por isso, desempenha papel fundamental na rede de distribuição. Assim, esta característica é responsável por 33,3% das perdas totais na rede onde atua.

Tais perdas de energia acarretam custos para a concessionária. Como solução para este problema, foi proposto, neste trabalho, uma metodologia para descrever as perdas do transformador em função do custo sob a perspectiva do fabricante e da concessionária.

Esta metodologia foi realizada em forma de um algoritmo permitindo adequar o transformador de distribuição com a demanda, obtendo-se menor custo operacional deste equipamento mais eficiente, com um tempo de retorno razoável para um investimento (LEONARDO E., 2004).

2.8 Transformador de Potência

2.8.1 Introdução

Dentre os vários equipamentos que compõe os sistemas elétricos, se destacam os transformadores de potência. Esse tipo de equipamento é de grande importância,

sendo utilizado para proporcionar nível de tensão adequado para o transporte de energia elétrica e também para o funcionamento dos equipamentos elétricos. Transformadores de potência como mostra a figura 2.1 (FIEE, 2011) são equipamentos importantes e de alto custo no contexto dos sistemas elétricos de potência. São equipamentos elétricos estáticos que, por indução eletromagnética, transformam níveis diferentes de tensão e de corrente alternada existentes em dois ou mais enrolamentos isolados eletricamente, com a mesma frequência. Uma de suas principais aplicações é abaixar ou elevar o nível de tensão nas malhas de transmissão e distribuição de energia elétrica (FITZGERALDO, A. E, 2006).



Figura 2.1: Transformador de Potência.

2.8.2 Características Nominais

A característica nominal se refere ao transformador fornecendo a corrente para o qual o enrolamento foi dimensionado sob condição de carga constante, sem exceder os limites de perdas e de elevação de temperatura fixados por norma. A potência nominal (valor convencional de potência aparente que serve de base ao projeto, aos ensaios e às garantias do fabricante) é determinada pelo valor da corrente que deve circular no enrolamento, sob tensão nominal (valor da tensão no enrolamento operando em vazio).

Quando a potência aparente nominal (P_n) de um enrolamento varia, por exemplo, com diferentes métodos ou estágios de resfriamento, a potência máxima é que

deve ser considerada a potência nominal do transformador, pois é através dela que calculamos as perdas e temperatura do transformador.

2.8.3 Rendimentos e Perdas de Potência

Como já visto, os transformadores normalmente têm como finalidade transferir energia elétrica entre dois ou mais circuitos, separados eletricamente e com níveis de tensão diferentes. Por outro lado, essa transferência de energia não é ideal, já que desse processo resultam perdas de energia, que, por sua vez, são dissipadas na forma de calor. As perdas em transformadores classificam-se, basicamente, em dois tipos: perdas por efeito Joule nos enrolamentos (W_e) e perdas magnéticas no núcleo (W_n).

Transformadores geralmente possuem rendimento elevado, devido às baixas perdas em relação à potência elétrica nominal (BLUME, L. F., BOYAJIAN, A., CAMILI, G., LENNOX, T. C., and MINNECI, S., 1951).

As tabelas 2.1 e 2.2 trazem valores típicos de rendimento para transformadores trifásicos e monofásicos, respectivamente, e imersos em fluido isolante. Nestas tabelas os rendimentos estão classificados em conformidade com a potência e a classe de tensão (tensão para a qual o isolamento é dimensionado) do equipamento (DORF, RICHARD C., 2002) e (HURLEY, W.G., WÖLFLE, W.H., and BRESLIN, J.G., 1998).

Os valores de rendimentos mostrados nas tabelas 2.1 e 2.2 consideram o transformador operando com 100% de sua carga nominal e à temperatura de 75°C.

Tabela 2.1: Rendimentos típicos para transformadores trifásicos imersos em fluido isolante (%).

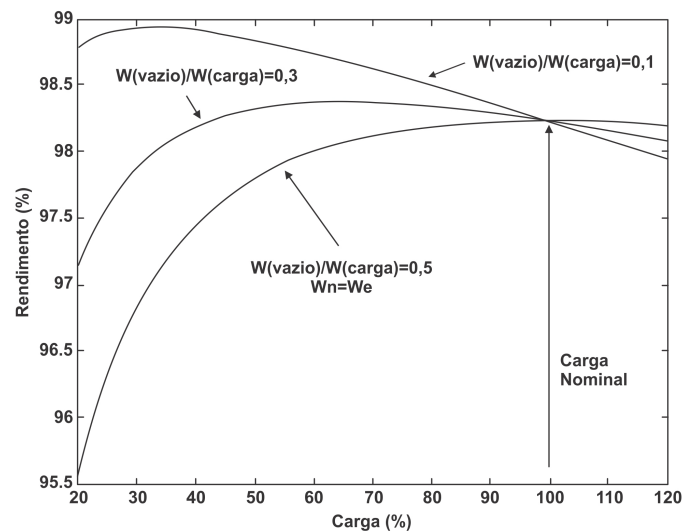
<i>TRANSFORMADOR TRIFÁSICO</i>									
<i>CLASSE(kV)</i>	<i>POTÊNCIA(KVA)</i>								
	<i>15</i>	<i>30</i>	<i>45</i>	<i>75</i>	<i>112,5</i>	<i>150</i>	<i>225</i>	<i>300</i>	<i>500</i>
<i>15</i>	96,52	97,07	7,35	97,66	97,88	98,04	98,15	98,27	98,48
<i>24,2</i>	96,08	96,74	96,06	97,40	97,65	97,81	98,01	98,15	98,36
<i>36,2</i>	96,08	96,74	96,06	97,40	97,65	97,81	98,01	98,15	98,36

Tabela 2.2: Rendimentos típicos para transformadores monofásicos imersos em fluido isolante (%).

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO								
CLASSE(kV)	POTÊNCIA(KVA)							
	15	10	15	25	37,5	50	75	100
15	96,26	96,52	97,18	97,52	97,76	98,02	98,15	98,21
24,2	95,94	96,59	96,88	97,25	97,52	97,68	98,00	98,15
36,2	95,94	96,59	96,88	97,25	97,52	97,68	98,00	98,15

O regime de funcionamento dos transformadores de potência pode oscilar entre operação em vazio, operação com carga nominal, e até mesmo em sobrecarga, sendo que, geralmente, na maior parte do tempo muitos operam com uma carga bastante reduzida. Diferentemente das perdas nos enrolamentos, que variam com o valor da carga, as perdas magnéticas no núcleo praticamente independem da carga aplicada ao transformador. Considerando o exposto e o fato de os transformadores estarem permanentemente submetidos à tensão (energizados), evidencia-se a importância das perdas magnéticas restringirem-se a valores muito reduzidos, para que rendimentos melhores sejam obtidos com o equipamento operando sob, aproximadamente, 50% de sua carga nominal. Porém, dependendo da aplicação destinada ao equipamento, pode ser conveniente que o rendimento máximo ocorra em outro ponto da curva *rendimento x carga*.

A figura 2.2, mostra um gráfico com três exemplos de curvas do tipo rendimento x carga, onde $W(\text{vazio})/W(\text{carga})$ é a relação entre as perdas no transformador operando em vazio e em carga plena.

**Figura 2.2:** Curvas Rendimento x Carga.

Basicamente, nesse tipo de curvas, o valor ideal da carga onde o rendimento máximo deva ser alcançado no projeto é definido através da carga média estimada imposta ao equipamento durante a sua operação.

Observe-se que, embora o rendimento seja igual para a carga nominal (gráfico da figura 2.3), o valor máximo para cada curva vai depender da relação existente entre as perdas.

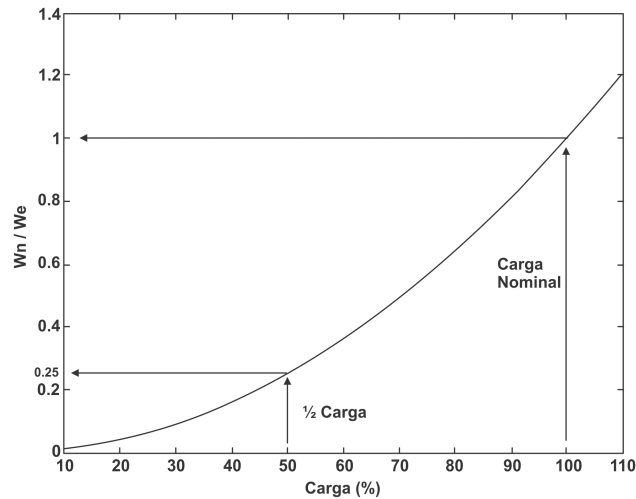


Figura 2.3: Relação entre as perdas no núcleo e as perdas nos enrolamentos, em função da carga imposta ao transformador.

A equação 2.1 fornece a magnitude do rendimento máximo $\eta_{Máximo}$, em função da respectiva carga onde ele ocorre.

$$\eta_{Máximo} = \frac{P_N \cos \varphi}{P_N \cos \varphi + 2k_C W_E} \quad (2.1)$$

2.8.3.1 Perdas no Núcleo

As perdas no núcleo são determinadas pelo fluxo estabelecido no circuito magnético e são constantes em uma dada tensão para cada transformador. Elas aparecem sempre que o transformador é ligado à rede e praticamente independem da carga que está sendo alimentada. As características construtivas do transformador e as propriedades magnéticas das ligas de aço-silício interferem diretamente no valor das perdas no núcleo (STINGANT, S. A. and FRANKLIN, A. C., 1973), também conhecidas como perdas em vazio. Essas perdas são decorrentes da histerese no circuito magnético, da magneto-estricção e das correntes parasitas (correntes de Foucault) que circulam no núcleo, contribuindo também as perdas ôhmicas decorrentes da corrente de excitação (BLUME, L. F., BOYAJIAN, A., 1951).

$$P_0 = P_H + P_F \quad (2.2)$$

onde:

- P_0 = corresponde às perdas totais no núcleo, em W/kg;
- P_H = corresponde às perdas por Histerese, em W/kg;
- P_F = corresponde às perdas por correntes parasitas de Foucault, em W/kg.

2.8.3.2 Perdas por Histerese

São perdas provocadas pela propriedade das substâncias ferromagnéticas de apresentarem um atraso entre a indução magnética e o campo magnético. As perdas por histerese são diretamente proporcionais à frequência e aproximadamente ao quadrado da densidade de fluxo magnético.

Assim, as perdas por histerese pode ser expressas na sua forma reduzida conforme apresenta a equação 2.3.

$$P_H = K_s \cdot B_m^{1,6} \cdot f \cdot [W/Kg] \quad (2.3)$$

onde:

- K_s = é o coeficiente de Steimmetz que depende do tipo de material usado no núcleo;
- B_m = é a indução máxima no núcleo, em Wb/m² ;
- f = é a frequência em Hz.

A densidade e fluxo B em função da força magnetismo H aplicada a um material são muito usados pelos engenheiros. Curva desse tipo são encontradas em manuais e folhetos distribuídos pelos fabricantes de materiais magnéticos (BOYLESTAD, ROBERT L., 2004).

Um gráfico $B-H$ típico para um material ferromagnético como o aço poder ser obtido usando o arranjo experimental ilustrado na figura 2.4 (Boylestad, 2004).

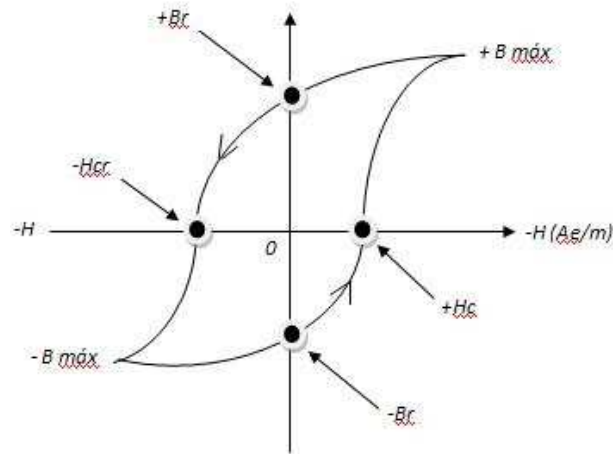


Figura 2.4: Curva de histerese.

onde:

- Br = Indução magnética residual após a força magnetizadora, em T (Tesla);
- Hc = Intensidade do Campo Magnético ou Força Magnetizadora, aplicada no sentido inverso, com o objetivo de reduzir a Indução Magnética Residual Br a 0 (zero). A dimensão de Hc é dada em Ae/m (Ampère-espira por Metro).

Quanto maior a área abrangida pela curva de *histerese*, maior é a perda.

2.8.3.3 Perdas por Corrente de Foucault

As perdas por corrente de Foucault nos enrolamentos do transformador tendem a ser proporcionais ao quadrado da corrente de carga, enquanto que as perdas por correntes de Foucault no núcleo variam com o quadrado da indução magnética, B .

As perdas por correntes parasitas no núcleo são perdas que resultam da corrente induzida no núcleo devido à variação do fluxo magnético. Essas perdas podem ser mostradas segundo Steinmetz pela equação 2.4 (DORF, RICHARD C., 2002).

$$P_f = k_f \cdot (B_m \cdot t_l \cdot f)^2 \quad (2.4)$$

onde:

- t_l é a espessura das lâminas, [mm];
- k_f é a constante que depende da dimensão do núcleo, da resistência específica das chapas de lâminas e da massa do núcleo;
- B_m é o valor máximo da densidade do fluxo magnético, [T].

Para atenuar as perdas por correntes parasitas e por correntes de Foucault, opera-se o núcleo a baixa densidade do fluxo e na sua fabricação utiliza-se material de alta permeabilidade com espessura das lâminas reduzidas.

Com a redução da espessura das lâminas aumenta-se a sua resistência e diminui a corrente que circula através do núcleo. Desse modo, esse material ferromagnético produz perdas por correntes de fauoult tão reduzidas quanto possível.

2.8.3.4 Perdas nos Enrolamentos

Os enrolamentos primários e secundários do transformador apresentam uma determinada resistência elétrica.

As perdas nos enrolamentos podem ser decompostas em duas categorias: as perdas ôhmicas $W\Omega$ e as perdas suplementares. A primeira corresponde às perdas decorrentes da corrente de carga (*efeito Joule*). Estas perdas são proporcionais à resistividade do material condutor e ao quadrado das correntes elétricas que circulam pelos enrolamentos (*perdas Joule*).

Portanto, diferentemente das perdas no ferro (*núcleo*), as perdas nos enrolamentos dependem da carga que está sendo alimentada pelo transformador.

O cálculo realizado sobre as perdas no cobre resulta muito sobre o peso do cobre e a perda específica, isto é, a perda em watt por cada quilo de material.

As perdas por efeito Joule, num condutor com comprimento de 1 metro a seção de S mm².

A perda é expressas por:

$$W_{cu} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2.5)$$

O peso de um condutor de cobre, cujo comprimento é 1 metro e cuja seção é S mm².

Resulta expresso em kg pela seguinte equação:

$$P_{cu} = 8,9.L.S.10^{-3} \quad (2.6)$$

- O fator 8,9 representa o peso específico do cobre;
- L = comprimento do condutor em metros.

Após o resultado do peso do cobre aplica-se a equação abaixo para simplificar o W_{cu} .

$$W_{cu} = 2,4.d^2.P_{cu} \quad (2.7)$$

onde:

- d = é densidade corrente em Amp/ mm².

2.8.3.5 Perdas por Efeito Joule

A perda por efeito Joule é causada pela passagem da corrente elétrica de carga nos enrolamentos. Esta perda é diretamente proporcional ao quadrado da corrente que atravessa o enrolamento e diretamente proporcional a sua resistência, de acordo com a equação 2.8.

$$P_{cu} = \sum R_{dc}.I^2 = \rho \sum_{i=1}^n \frac{N_{ei}.L_e.(J.A_{ei})^2}{A_{ei}} = \rho.V_e.k_u.J^2 \quad (2.8)$$

onde:

- P_{cu} é perda no enrolamento, (W);
- R_{dc} é a resistência dos enrolamentos, (Ω);
- I^2 é a corrente nos enrolamentos, (A);
- N_{ei} é o número de espiras do enrolamento i ;
- J é a densidade da corrente, (A/m²);

- A_{ei} é a seção do condutor dos enrolamentos referente à fase i , (m^2);
 - K_u é o fator de utilização;
 - ρ é a resistividade do condutor do enrolamento, ($\Omega \cdot m$);
- V_e é o volume do enrolamento, (m^3);
 - L_e é o comprimento de espiras do enrolamento, (m).

2.9 Tipos de Transformadores Comercializados

2.9.1 Transformadores de Distribuição

Como os monofásicos como visto na 2.5, e os transformadores trifásicos como mostra a 2.6, são transformadores que possuem aplicabilidade em redes de distribuição rurais e urbanas de concessionárias, instalações comerciais e pequenas indústrias (Romagnole, 2011).

Principais Características:

Potência: 15 até 300 kVA

Alta Tensão: 15 até 36,2 kV

Baixa Tensão: conforme especificações do cliente

Norma de referência: ABNT.



Figura 2.5: Transformador de Distribuição Monofásico.



Figura 2.6: Transformador de Distribuição Trifásico.

2.9.2 Transformadores Industriais

Como é mostrado na figura 2.7, são aplicáveis a subestações de empresas, para redução de tensão primária (máxima 36,2 Kv) e para as tensões secundárias usadas industrialmente. Sendo ainda providos de caixas de acoplamento para proteção das conexões do primário e/ou secundário, quando solicitado pelo cliente (Romagnole, 2011).

Principais Características:

Potência: 500 à 5000 kVA

Alta Tensão: 15 até 36,2 kV

Baixa Tensão: conforme especificações do cliente

Norma de referência: ABNT.



Figura 2.7: Transformador Industrial.

2.9.3 Transformadores Pedestais

Como mostra a figura 2.8, são os que possuem aplicação ideal em lugares onde não há espaço físico suficiente para instalação de cubículos ou haja trânsito de pessoas.

O fato de seus terminais de alta e baixa tensão estarem abrigados em compartimentos fechados permite que estes tipos de transformadores sejam mais seguros e possam ser instalados próximos dos centros de consumo, tomando como exemplo condomínios residenciais (Romagnole, 2011).

Principais Características:

Potência: 45 até 500 kVA

Alta Tensão: 15 até 36,2 kV

Baixa Tensão: conforme especificações do cliente

Norma de referência: ANSI.



Figura 2.8: Transformador Pedestal.

2.9.4 Transformadores Secos

Como visto na na figura 2.9, são projetados de acordo com a norma (NBR 10295) e atendem às normas das concessionárias de energia elétrica. São utilizados em locais com grande fluxo de pessoas tais como hospitais, shopping centers, estações de metrô, centros comerciais, aeroportos e supermercados (Romagnole, 2011).

Principais Características:

Potência: 150 até 3000 kVA

Alta Tensão: 15 ou 24,2 kV

Baixa Tensão: 220/127 V ou 380/220 V ou 440/254 V

Norma de referência: ABNT/IEC



Figura 2.9: Transformador Seco.

2.10 Conclusão

O estudo sobre perdas em núcleos de transformadores vem sendo para os pesquisadores um grande desafio, pois através dessa estudo que conseguiremos uma redução tão clara sobre a perdas na rede das concessionárias.

Transformadores são equipamentos essenciais que para muitos passam despercebidos, pois estes equipamentos tendem a ser discretos, ou instalados sempre de forma menos agressiva ao aspecto visual das cidades ou campos, sem eles a evolução nas indústria elétrica, ou a industria como um todo, seria deficitária e atrasada, nao chegaríamos aos patamares da atualidade.

Através dos transformadores é possível permitir que a energia elétrica seja distribuída, após sua geração, com melhor eficiência e segurança de forma adequada até o seu consumo final, quer seja nas industrias, hospitais, residencias, etc.

3 Materiais para Núcleo de Transformadores

3.1 Introdução

Materiais ferromagnéticos $\mu \gg \mu_0$ são utilizados na construção de núcleos de transformadores. Propriedades especiais, como reduzidas perdas magnéticas, reduzidas forças coercivas H_c e elevada saturação são requisitos fundamentais para esses materiais. Os materiais comercialmente empregados nos núcleos têm como base o ferro e suas ligas. O ferro puro F_e tem um ponto de saturação de 2,12T, um dos valores mais elevados entre todos os elementos encontrados e pode ser tratado para que haja uma redução da força coerciva e de suas perdas magnéticas. Através de processos especiais, pode-se obter propriedades necessárias para um bom desempenho em máquinas elétricas, especificamente em transformadores de potência, como descrito acima. O ferro, por ser encontrado com abundância na natureza, possui um custo de refinamento baixo e é o material mais empregado para máquinas elétricas de pequeno e grande porte (VAN VLACK, LAWRENE, H., 1970).

As perdas magnéticas podem ser separadas principalmente em dois grandes tipos, as perdas histeréticas e as perdas por correntes parasitas ou Foucault citados acima. Onde a perda por histerese é a potência necessária para magnetizar o material do núcleo e é afetada pela orientação de grãos, impurezas e tensões internas do material. Um fluxo magnético variável induzirá correntes parasitas no material do núcleo (SCHIMDT, W., 1979).

As perdas associadas a essas correntes são diretamente proporcionais à condutividade σ do material do núcleo e ao quadrado da espessura, indução magnética e frequência.

3.2 Metal Amorfo

Surge no momento um forte concorrente dos tradicionais transformadores com núcleo de aço ao silício, as ligas amorfas (NG, H. W., HASEGAWA, R., LEE, A. C. E LOWDERMILK, 1991).

As primeiras ligas amorfas foram obtidas pelo professor Pol Duwez e seus colaboradores, no Instituto de Tecnologia da Califórnia (USA), em 1959. Mas, a introdução destes materiais no mercado só veio a ocorrer em 1976, quando o primeiro transformador de distribuição com núcleo toroidal de material amorfo, projetado por Joseph Mas, foi construído no Laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA).

Naquela oportunidade, o desempenho de um protótipo de transformador de 30 kVA, confeccionado com núcleo de material amorfo, foi comparado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao transformador com núcleo de material amorfo, particularmente no tocante às perdas em vazio e corrente de excitação: redução de 87,5% nas perdas do núcleo e redução da corrente de excitação de 2,5 A para 0,12 A (BOYD, E. L. e BORST, J. D., 1984).

No Brasil, os primeiros estudos e ensaios experimentais sobre as aplicações de ligas amorfas em núcleos de transformadores tiveram origem no ambiente acadêmico. Em seguida, esse conhecimento foi repassado às fábricas de transformadores que montaram os primeiros protótipos a serem instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais. Geralmente, esses estudos ocorreram sob forma de projetos de pesquisa e desenvolvimento, envolvendo parcerias entre universidades e empresas.

Embora a adoção da tecnologia das ligas amorfas em núcleos de transformadores tenha se consolidado em diversos países, estudos sistemáticos sobre a redução das perdas continuam sendo realizados e publicados em periódicos e eventos técnicos e científicos. Adicionalmente, a opção por transformadores com núcleo de liga amorfa, por serem mais eficientes que os transformadores com núcleo de aço ao silício, pode contribuir de forma significativa para a redução de CO₂ no meio ambiente. Segundo estudos realizados e publicados em 2008, essa redução poderia ser de 170 milhões de toneladas, em torno de 2,5% do total de emissões em todo o Mundo.

Como a eficiência energética dos transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de liga amorfa é superior à dos transformadores com núcleo de aço-silício GO, a decisão das empresas pela aquisição desses transformadores depen-

derá de outros fatores tais como: visão estratégica no combate às perdas técnica, negociação comercial entre fornecedores e departamento de suprimento, capacidade de fornecimento do equipamento pelo fabricante e políticas energéticas governamentais, principalmente o custo elevado desse material.

Minimizar as perdas de energia em um Transformador é o caminho para aumentar a oferta de energia. Com este conceito, a Vijai uma das principais empresas fabricante desse material estabeleceu uma moderna e exclusiva unidade industrial para a fabricação de Transformadores de Distribuição de Metal Amorfo (TDMA). Para prevenir o aquecimento global existem muitas ações relacionadas à redução de CO₂ e outras emissões de gases de efeito estufa, sendo que o uso eficiente da energia e a diminuição do uso de eletricidade são algumas alternativas.

Além de diminuir o volume de energia usada, outro ponto importante é reduzir as perdas que acontecem em transformadores quando a energia, que vem de unidades geradoras através das subestações, é distribuída destas fontes geradoras pelas subestações para fábricas, edifícios e casas.

O Metal Amorfo é uma liga de Fe₇₈-B₁₃-Si₉, que possui uma estrutura não-cristalina, que é formada pelo resfriamento rápido do metal fundido a taxas de resfriamento de 10⁶ °C/sec. Cronologicamente, o desenvolvimento das ligas amorfas potencialmente aplicáveis em núcleo de transformadores teve início em 1975, porém a introdução no mercado destes materiais só veio a ocorrer em 1976.(GRAHAN Jr., C. D. e EGAMI, T., 1980)

Essa liga os átomos não ficam organizados em uma estrutura orientada de grãos (GO), mas sim, distribuídos aleatoriamente. Depois do recozimento sob um campo magnético, esta liga exibe baixas perdas e ganha excelentes propriedades Magnéticas e Químicas, quando comparada ao material convencional.

Comprovadamente, os Transformadores de Distribuição de Metal Amorfo (TDMA) economizam energia e isto se deve ao uso do Metal Amorfo na fabricação do núcleo, pois este consegue reduzir as perdas em vazio em aproximadamente 75% quando comparado ao grau de perdas do GO convencional.

Os metais amorfos admitem uma espessura nominal das lâminas do núcleo da ordem de magnitude de aproximadamente 10 vezes menor que os materiais comerciais, como o ferro-silício. Esta é uma das razões pelas quais eles apresentam baixos valores de perdas no núcleo.

Entretanto, um maior número de laminações implica em aumento dos custos de produção. Cortar estes materiais requer técnica avançada e perícia.

3.2.1 Núcleo Amorfo x Núcleo de Aço Silício - Fator de Elevação de Temperatura

As figuras 3.1 e 3.2 demonstram a distribuição da temperatura das perdas do núcleo quando observado através de uma câmera de raios infra-vermelhos. O Núcleo Amorfo indica uma elevação menor de temperatura devido à baixa perda inerente do núcleo quando comparado ao GO.

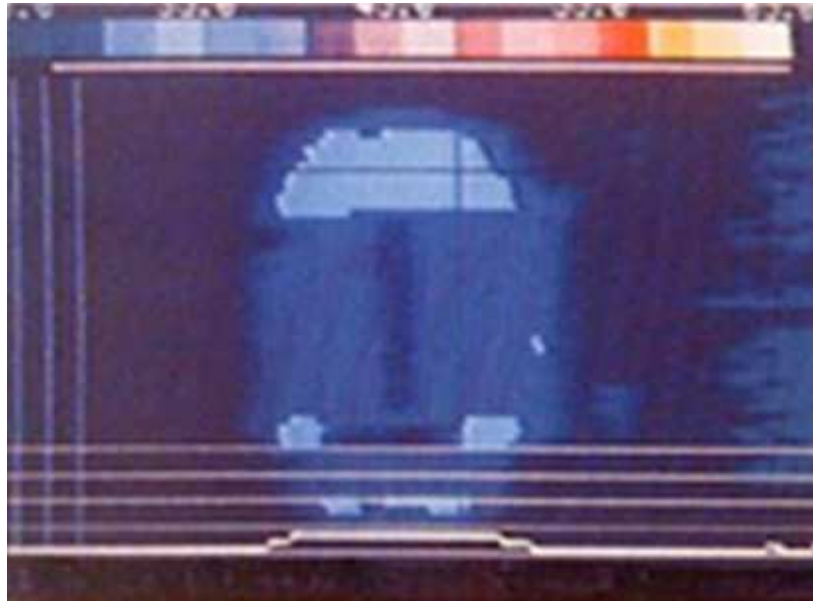


Figura 3.1: Elevação de Temperatura Núcleo Amorfo.

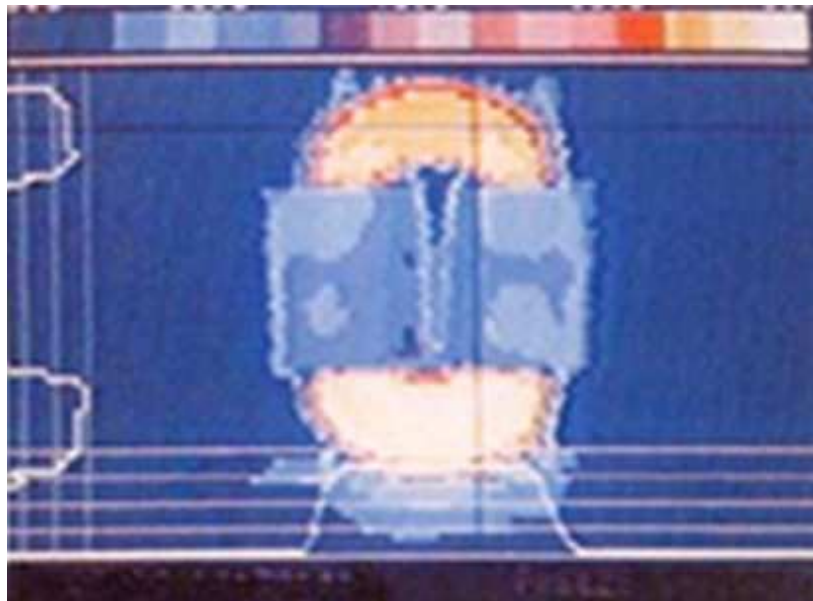


Figura 3.2: Elevação de Temperatura Núcleo de Grão Orientado.

3.2.2 Núcleo Amorfo x Núcleo de Aço Silício - Vantagens

- Redução das Perdas em vazio em até 75% quando comparado aos Transformadores de GO;
- Menor Corrente de Excitação;
- Economia cumulativa no custo da energia;
- Menor Elevação de Temperatura no núcleo.

3.2.3 Comparação das Perdas em vazio do Núcleo de Metal Amorfo x Núcleo de Aço Silício

Os transformadores com núcleo de material amorfo apresentam sensíveis vantagens em relação aos de aço-silício, principalmente em relação as suas perdas.

A tabela 3.1 e 3.2 abaixo exhibe um comparativo entre os transformadores amorfos com os convencionais (aço silício).

Cabe ao engenheiro eletricitista após verificar a tabela de comparação entre o metal amorfo e o aço silício, analisar o local, a energia a ser entregue e o custo benefício, a fim de se decidir qual o melhor material a ser utilizado em determinada ocasião. Entretanto ele é mais pesado, mais volumoso e mais caro. (BOYD, E. L. e BORST, J. D., 1984).

Tabela 3.1: Perdas com Núcleo Amorfo

AMORFO			
Tipo	kVA	Perdas Vazio (W)	Perdas c/ Carga (W)
1Ø	10	12	102
	15	16	141
	25	18	330
	50	29	455
	75	37	715
	100	49	944
3Ø	75	51	925
	150	90	1397
	300	165	1847
	500	230	3282
	750	327	4468

Tabela 3.2: Perdas com Núcleo em Aço Silício

AÇO - SILÍCIO			
Tipo	kVA	Perdas Vazio (W)	Perdas c/ Carga (W)
1Ø	15	41	143
	25	57	314
	50	87	462
	75	122	715
	100	162	933
3Ø	75	142	956
	150	216	1429
	300	412	2428
	500	610	3589
	750	713	5206

3.3 Aço Silício

Os materiais magnéticos mais utilizados na confecção de núcleos de transformadores são provenientes das ligas de aço-silício. O seu nome metalúrgico mais correto seria liga de ferro-silício completamente processada, pois elas possuem um baixíssimo teor de carbono, em torno de 0,003%. Essas ligas de aço-silício possuem boas características elétricas e magnéticas, sob condições em que o fluxo reverte o sentido ou pulsa muitas vezes a cada segundo (VAN VLACK, LAWRENE, H., 1970).

A composição dessas ligas visa a obtenção de boas propriedades magnéticas. Um de seus principais elementos é o silício. Ele tem a finalidade aumentar a resistividade e, conseqüentemente, reduzir a circulação de correntes parasitas. Deve-se, porém, restringir o teor de silício a aproximadamente 3%, pois um alto teor de silício requer correntes de excitação mais intensas, em altas densidades de fluxo magnético, e, além disso, endurece a liga, potencializando os efeitos das tensões mecânicas aplicadas à mesma. Outro importante elemento da composição das ligas de aço-silício é o sulfeto de manganês, o qual tem a finalidade de inibir o crescimento dos grãos (SCHIMDT, W., 1979).

Na fabricação de núcleos de transformadores, os aços utilizados são de grãos orientados (GO) (CATALOGO DE CHAPA ACESITA), que foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norma Goss. O aço silicioso GO foi desenvolvido para alcançar baixas perdas e elevada permeabilidade magnética, requeridas para maior eficiência dos equipamentos e economia de energia elétrica (GOSS, NORMAN, 1935).

Normas Goss descobriu que, com uma laminação a frio e um recozimento inter-

mediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, em relação às chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária, durante o recozimento a alta temperatura. Chapas com grãos orientados começaram a ser produzidas comercialmente por volta de 1945, e desde então, suas propriedades tem sido melhoradas continuamente.

A direção mais favorável para a circulação do fluxo magnético é na direção do processo de laminação da chapa. Estima-se um aumento no valor da componente de magnetização da corrente de excitação em até 20 vezes, na aplicação de fluxos em outras direções.

A conservação das propriedades magnéticas das ligas de aço-silício empregadas depende do controle e otimização dos métodos e processos de fabricação do núcleo. Tensões mecânicas são introduzidas nas operações de estampagem, corte, empilhamento, tracionamento, dobramento e armazenamento das chapas. Tais tensões, quando elevadas, dificultam a orientação dos domínios, devido à deformação dos cristais de metal, reduzindo a relação entre a indução e a força magnetizante. Resulta uma forte deterioração das propriedades magnéticas, acarretando um aumento substancial nas perdas relacionadas com os efeitos da histerese no núcleo.

Conseqüentemente, cuidados especiais devem ser tomados no manuseio das chapas para assegurar a preservação das características do material visto na figura 3.3 (Catálogo Acesita). A preservação do isolamento superficial das chapas é também de fundamental importância para a minimização das correntes parasitas e, conseqüentemente, para a limitação das perdas relacionadas com os efeitos das correntes de Foucault (DORF, RICHARD C., 2002).

CARACTERÍSTICAS GARANTIDAS

Referência	Grade ArcelorMittal Inox Brasil	Espessura	Perda magnética máxima (W/Kg)				Magnética mínima (T)			Envelhecimento máximo (%)	Densidade assumida (g/cm ³)	Fator de empilhamento mínimo (%)	Índice de dobramento mínimo
			1,5T		1,7T		B800	B2500	B10000				
			50Hz	60Hz	50Hz	60Hz							
M108-23	E003	0,23	0,73	0,95	1,08	1,40							
M117-23	E003	0,23	0,75	0,99	1,17	1,54					94,5		
M112-27	E004	0,27	0,80	1,05	1,12	1,46	1,78	1,87	1,97	5	7,65	2	
M125-27	E004	0,27	0,85	1,12	1,24	1,63							
M140-30	E005	0,30	0,97	1,28	1,40	1,83					95,0		
M150-35	E006	0,35	1,08	1,44	1,50	2,00							

Figura 3.3: Características Garantidas do aço silício GO.

3.3.1 Aço Silício de Grão Orientado (GO)

Na década de 30, Goss desenvolveu um método de produção de chapas de aço ao silício com orientação dos grãos, encontram-se paralelos à superfície da chapa

e a direção paralela à direção de laminação. No aço ao silício de grão orientado (GO), os grãos possuem uma direção cristalina definida, o que facilita a passagem do fluxo magnético por uma direção preferencial. Esse material é adequado para transformadores de potência e de distribuição (FONSECA, 1988).

O aço ao silício GO foi desenvolvido para alcançar baixas perdas por correntes parasitas e histerese e elevada permeabilidade magnética, requeridas para maior eficiência dos equipamentos e economia de energia elétrica. Aplicado basicamente na fabricação dos núcleos de transformadores, também é utilizado em reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores. A principal característica deste aço é apresentar excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação (CATALOGO DE CHAPA ACESITA) mais notável característica dos aços ao silício de grão orientado é a sua forte direcionalidade magnética. Tanto as perdas no núcleo quanto a permeabilidade variam sensivelmente, dependendo da direção do fluxo magnético em relação à direção na qual o material foi laminado. Sob certas condições, a diferença na corrente de excitação para uma direção favorável em relação a outra não favorável no aço de grão orientado, pode ser vinte vezes superior à encontrada para os aços convencionais de grão não orientado.

Usualmente os aços ao silício de grão orientado contêm aproximadamente 3,1% de silício. Se o silício é muito mais baixo, a perda por correntes parasitas (e por consequência, a perda no núcleo) na espessura desejada, é muito elevada. Alto teor de silício diminui a ductilidade e também reduz a saturação, exigindo maiores correntes de excitação a altas densidades de fluxo e limitando a indução de operação. O aço ao silício, apresentando-se com mais de 1,9% em peso, é um material com estrutura ccc (fase ferrítica) em toda a faixa de temperatura, o que possibilita tratamentos térmicos a altas temperaturas, necessários para desenvolvimento de textura, impedindo que esta orientação preferencial adquirida seja destruída por transformação durante o estágio posterior a frio (RODRIGUES, 1996).

A razão da intensa demanda por aço ao silício de grão orientado é a notável capacidade que eles oferecem para reduzir o tamanho dos núcleos magnéticos dos equipamentos elétricos, reduzindo conseqüentemente a quantidade dos outros materiais necessários. Outros fatores que ampliaram a aplicação destas classes de aços elétricos são:

- Melhoria da permeabilidade e redução nas perdas no núcleo para altas densidades de fluxo;
- Necessidade de melhorias da produção e da transmissão;

- Diminuição do custo de manuseio dos equipamentos e aumento da potência do transformador, que pode ser instalado em um poste, pela utilização de núcleos de aço ao silício de grão orientado, que são menores que os de mesma potência feitos com aços ao silício convencionais;
- Redução considerável nos ampère-espiras necessários na seção do caminho magnético nos grandes geradores bipolares de núcleos segmentados, devido ao fluxo no jugo fluir paralelamente à melhor direção magnética. Os aços de grão orientado são algumas vezes especificados em estampos formando uma seção do jugo a partir da qual os dentes estendem-se.

Isto, muitas vezes é vantajoso, mesmo que o fluxo magnético flua em uma direção desfavorável nos dentes. Como os dentes são relativamente pequenos, os ampère-espiras requeridos por eles podem ser mantidos razoavelmente menores. A perda no núcleo magnético depende não só da qualidade relativa do material do qual ele é feito, mas também da indução e da frequência utilizadas. As perdas por histerese devem dar-se pela eliminação do encruamento, pelo aumento do tamanho de grão e pela redução do teor de carbono, isso ocorrendo em qualquer tipo de aço. O melhor desempenho desses aços depende de um melhor condicionamento de sua microestrutura, via processamento termomecânico (LANDGRAF, F. J. G. and SCOZ, L. C., 1994).

3.3.2 Orientação dos Grãos

A introdução da orientação de grãos foi uma inovação fundamental nos processos de fabricação de aços para núcleos.

O aço para núcleo é formado por cristais cúbicos. A orientação magnética preferencial é ao longo dos lados desses cristais. Com uma direção do fluxo ao longo da lâmina, passa a ser vantajoso orientar os cristais também ao longo da lâmina. Esse processo é denominado de orientação de grãos.

Atualmente, para as chapas de maior espessura em produção, um desvio médio de até 3°, a partir da direção preferencial, pode ser encontrado. Desde 1900, as perdas específicas de materiais para núcleos foram reduzidas em até mais de quatro vezes. A figura 3.4 (Determinação de fator de correção para cálculo de perdas magnéticas em núcleos de transformadores de potência - USP, 2009) mostra uma lâmina de aço para núcleos. O aço é composto de cristais cúbicos e as suas orientações apresentam um ângulo α , de desvio a partir da direção de laminação ou preferencial. O aço possui uma cobertura externa de um fino filme de vidro que é

aplicado durante o processo de resfriamento. Além desse filme de vidro, a lâmina de aço possui um verniz de fosfato (carlite) aplicado como proteção externa.

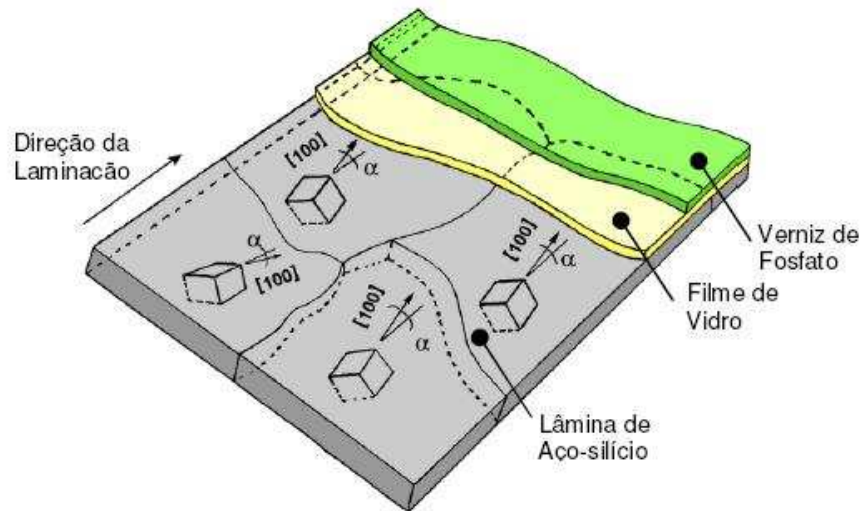


Figura 3.4: Construção de lâmina de aço para núcleos magnéticos com no plano da laminação.

3.3.3 Laminação

A espessura das lâminas do núcleo do transformador deve ser reduzida ao máximo para que sejam diminuídas as perdas, já que são inversamente proporcionais à espessura. Todavia, numa determinada camada de isolamento, o fator de empilhamento decresce com a redução da espessura das lâminas.

A tendência dos fabricantes é utilizar chapas com baixas espessuras e com a melhora das tecnologias de produção de aço-silício, as chapas vão sendo mais planas, ou seja, sem ondulações, em conjunto com a redução da camada de verniz da isolamento (REED-HILL, R. E., 1982).

Atualmente, são empregadas chapas com espessuras a partir de 0,18mm até 0,50mm, laminadas a frio ou a quente, com ou sem tratamento por irradiação a laser. O tratamento por irradiação a laser diminui o tamanho dos cristais com significativa redução de perdas em aproximadamente 20%. Em geral, o aço é obtido em lingotes que, então, são laminados e recozido à 800°C.

Durante o processo da laminação, verifica-se que:

- os grãos se estiram na sua direção;
- as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas tornam-se heterogêneas;
- devido ao estiramento dos grãos, a área do ciclo de histerese aumenta e elevam-se as perdas por histerese;

- a condutividade é reduzida pelo endurecimento associado à laminação, diminuindo as perdas por correntes induzidas. Essa manifestação pode também ocorrer durante o corte, a montagem e/ou a prensagem do núcleo do transformador.

A laminação pode ser a frio ou a quente. A laminação a frio melhora as propriedades magnéticas para a indução, na direção de laminação e piora em outras direções, particularmente na direção transversal de laminação. Assim, o aço laminado a frio apresenta elevada anisotropia, em relação ao aço laminado a quente.

3.3.4 Tratamento Térmico

Após a laminação dos lingotes, as lâminas são tratadas termicamente através de recozimento à temperatura de aproximadamente, 800°C (GUNDLACH, R., 1988).

Os benefícios do recozimento são:

- aumento das dimensões dos grãos com redução das perdas por histerese;
- melhora do desempenho das lâminas de aço quando essas são submetidas a operações de corte, manuseio, prensagem e esforços mecânicos.

O processo de recozimento é realizado em atmosfera de hidrogênio, eliminando a oxidação do aço.

3.3.5 Isolamento Superficial das Chapas

O Isolamento superficial é muito importante para a minimização das correntes parasitas e para a limitação das perdas relacionadas com os efeitos dessas correntes.

Nas chapas de aço-silício é necessário eliminar o máximo possível as rebarbas nos processos de corte e estampagem, pois estas oferecem caminho à circulação das correntes de Foucault e danificam a superfície de isolamento das chapas vizinhas. Para uma análise mais criteriosa, pode-se obter a resistência de isolamento em um lado da chapa através do teste de Franklin, normalizado na A717-75 da ASTM (Sociedade Americana para Testes de Materiais). Aceita-se que o valor satisfatório não deve ser inferior a 100 Ω/cm^2 (25°C).

Esse valor é considerado na superfície da chapa, em regiões distantes da ocorrência de cisalhamento dos processos de corte e estampagem (NBR 9119).

3.3.6 Perdas - Normas e Valores para Referência

A característica mais importante nas ligas de aço-silício é sua perda por unidade de massa. Por esta razão, as ligas são classificadas pelas normas existentes conforme o valor dessa perda.

A perda no núcleo é a potência elétrica dissipada em forma de calor, quando o equipamento está submetido a forças magnetizantes alternadas.

Os tipos de ligas de aço-silício de grãos orientados têm sua designação diferenciada em algumas normas, como segue exemplificado na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Chapas de aço-silício - Características garantidas por normas.

<i>Designação da chapa</i>		<i>Perdas Magnéticas 60 Hz</i>		<i>Perdas Magnética 50 Hz</i>	
<i>NBR 9119</i>	<i>ANSI</i>	<i>15 kGauss</i>	<i>17 kGauss</i>	<i>15 kGauss</i>	<i>17 kGauss</i>
GO117-27	M-4	1,17 W/KG	1,68 W/KG	0,89 W/KG	1,27 W/KG
GO128-30	M-5	1,28 W/KG	1,83 W/KG	0,97 W/KG	1,39 W/KG
GO146-35	M-6	1,46 W/KG	1,17 W/KG	1,11 W/KG	1,57 W/KG

Os valores das perdas magnéticas, apresentados nessa tabela, são os máximos permitidos para sua respectiva designação na AISI e ABNT. Mesmo no Brasil, geralmente a designação mais usada é a proposta pelo AISI. Nessa norma, a letra (M) significa material magnético e o número que se segue a letra está relacionado ao valor máximo da perda.

Na ABNT, as letras GO significam aço-silício de grão orientado. Os três primeiros números representam o cêntuplo do valor máximo de perdas em Watts por Kg, em 15 Gauss e 60 Hz, e os último dois dígitos representam o cêntuplo da espessura em milímetro do material (NBR 5356).

Os principais fabricantes de aço-silício fornecem algumas curvas com características de comportamento desses materiais (CATALOGO DE CHAPA ACESITA), analisando alguma dessas curvas fornecidas fica evidente que tais perdas devem ser corrigidas para compensar o aumento das perdas relacionadas com as anomalias decorrente do processo de fabricação do núcleo.

Algumas dessas curvas são mostradas nas figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 (Avaliação de processos e materiais magnéticos - UNICAMP, 1998).

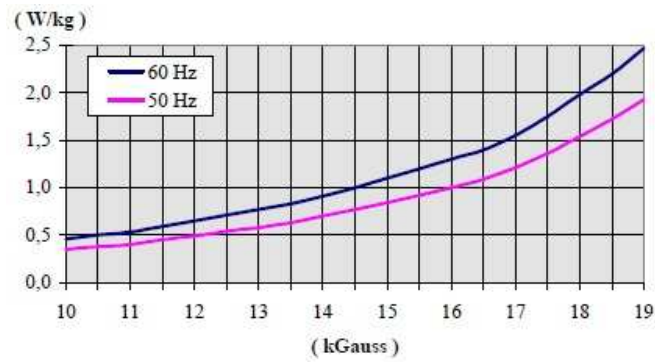


Figura 3.5: Perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo(GO-M4).

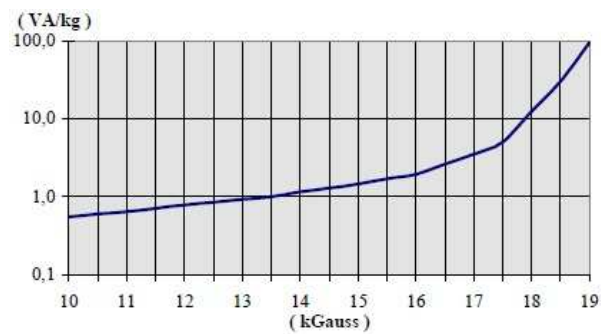


Figura 3.6: Potência de excitação em função da densidade máxima de fluxo, em 60 Hz (GO-M4).

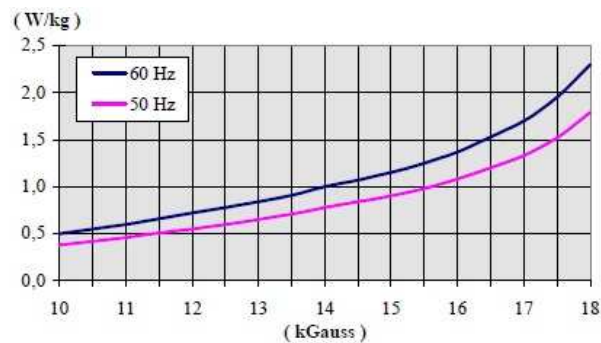


Figura 3.7: Perdas magnéticas em função da densidade máxima de fluxo(GO-M5).

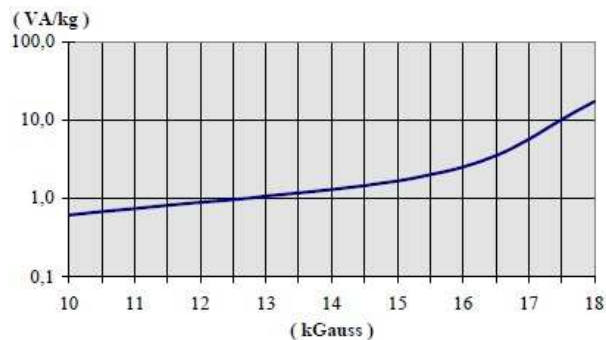


Figura 3.8: Potência de excitação em função da densidade máxima de fluxo, em 60 Hz (GO-M5).

Considerando que os valores apresentados na tabela 3.4, para as perdas magnéticas, são os máximos permitidos para cada categoria, estes são, portanto, superiores aos encontrados nas curvas características mostradas nas figuras 3.5 e 3.7

Os valores das perdas magnéticas por unidade de massa, são geralmente utilizados nos procedimentos de cálculo das perdas no núcleo do transformador. Quando da sua utilização, tais perdas devem ser corrigidas para compensar o aumento das mesmas em razão de imperfeições decorrentes do processamento da chapa, durante a fabricação do núcleo.

Da mesma forma como o ocorrido com as perdas magnéticas, também os valores da potência de excitação como visto na figuras 3.6 e 3.8, devem sofrer um acréscimo durante o procedimento de cálculo da corrente de excitação. Nesse caso, a maior parcela deste acréscimo é decorrente do aumento no valor de sua componente de magnetização, devido à existência de entreferros nos núcleos dos transformadores.

Tabela 3.4: Fator de utilização

ku	n	$\delta(1)$	$\delta(2)$	$\delta(3)$	$\delta(4)$	$\delta(5)$	$\delta(6)$	$\delta(7)$	$\delta(8)$	$\delta(9)$	$\delta(10)$
0,851	3	25,09	45,00	64,91							
0,886	4	21,05	37,34	52,66	68,92						
0,9079	5	18,29	32,25	45,00	57,75	71,71					
0,9228	6	16,28	28,59	39,64	50,36	61,41	73,72				
0,9337	7	14,76	25,85	35,70	45,00	54,30	64,15	75,24			
0,9419	8	13,54	23,61	32,51	40,89	49,11	57,49	66,39	76,50		
0,9483	9	12,50	21,83	29,99	37,61	45,00	52,39	60,01	68,17	77,50	
0,9534	10	11,66	20,43	27,91	34,92	41,67	48,33	55,08	62,09	69,66	78,34

3.3.7 Processos de Fabricação de Ligas de Aço Silício

Durante a sua fabricação, as ligas de aço-silício são submetidas a diversos processos, onde se destaca um processo de laminação que se dá em duas fases, uma a quente, onde as placas são transformadas em bobina de espessura intermediária e outra a frio, até obter-se a espessura final.

Outra etapa importante no processamento para obtenção das ligas de aço-silício, mostrado no apêndice A, é o processo de recozimento da chapa, destinado à configuração das características magnéticas da mesma. Este processo também se dá em duas fases distintas, uma antes e outra após o processo de laminação a frio.

3.4 Conclusão

Verifica-se neste capítulo, a importância sobre o manuseio das chapas para preservar suas características magnéticas. A conservação das propriedades magnéticas dessa chapas como o metal amorfo e o aço silício empregadas depende do controle e otimização dos métodos e processos de fabricação do núcleo.

A limitação de tensões mecânicas e a manutenção da integridade do seu isolamento superficial tem um papel fundamental na preservação desses materiais, as tensões mecânicas são introduzidas nas operações de estampagem, corte, empilhamento, tracionamento, dobramento e armazenamento das chapas. Essas tensões quando elevadas resulta em uma forte deterioração das propriedades magnéticas, acarretando um aumento nas perdas relacionadas com os efeitos de histerese no núcleo.

4 Comparação experimental entre os Núcleos Single Step-lap e Multi Step-lap.

4.1 Introdução

Em núcleo de transformadores de potência, as juntas têm um papel muito importante na rigidez mecânica do equipamento. Neste capítulo será possível observar a comparação entre os dois tipos de núcleo em estudo.

4.2 Núcleo em processo de montagem

Na figura 4.1 (CNS - Central de Núcleos Siliciosos), é possível observar um núcleo em processo de montagem sem o julgo superior, o local assinalado indica as juntas propriamente ditas.

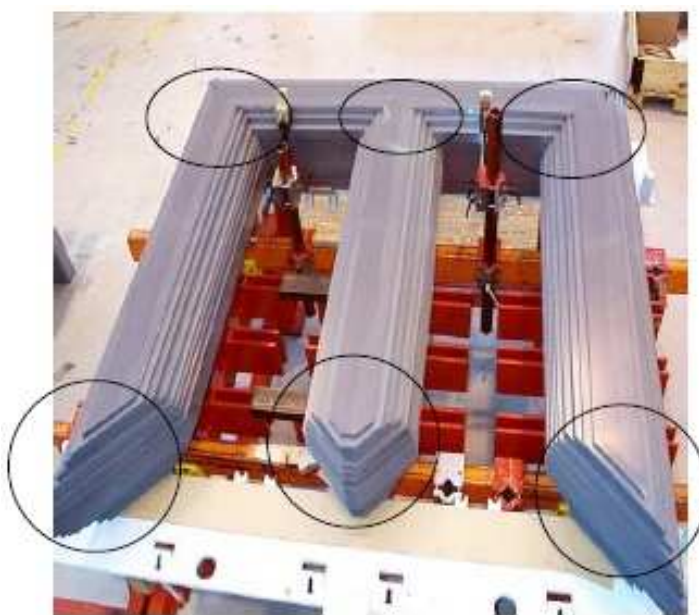


Figura 4.1: Núcleo magnético de transformador com destaque para as regiões das juntas.

Cada núcleo tem um tipo de junta definida pelo projetista eletromecânico do transformador. São conhecidos dois tipos de juntas:

- Junta Single Step-lap;
- Junta Multi Step-lap.

O núcleo Multi Step-lap mostra melhorias distintas em relação as perdas em comparação ao núcleo Single Step-lap, conhecido como tipo Flecha em chão de fábrica nas indústrias de transformadores, em teoria especial mostra-se que um aumento do número de step reduz a sensibilidade do núcleo em relação a variações de g (entreferro), isto é devido ao aumento crítico da densidade de fluxo magnético. Nas figuras 4.2 e 4.3 são mostrados os detalhes da montagem dos núcleo com as motagens Single Step-lap e Multi Step-lap (LOFFLER and GRAMM, 1995).

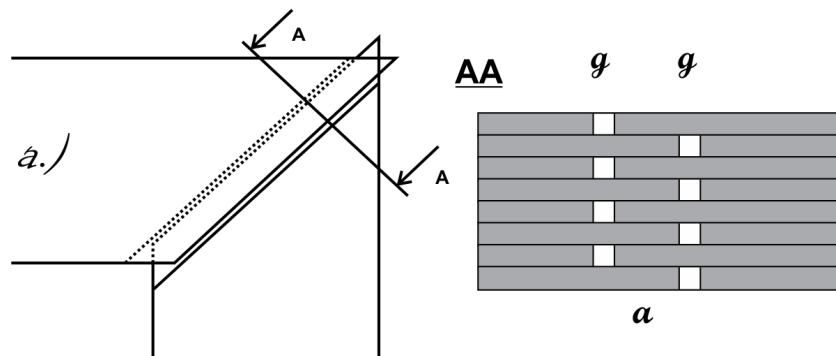


Figura 4.2: Detalhe da montagem do núcleo Single Step-lap.

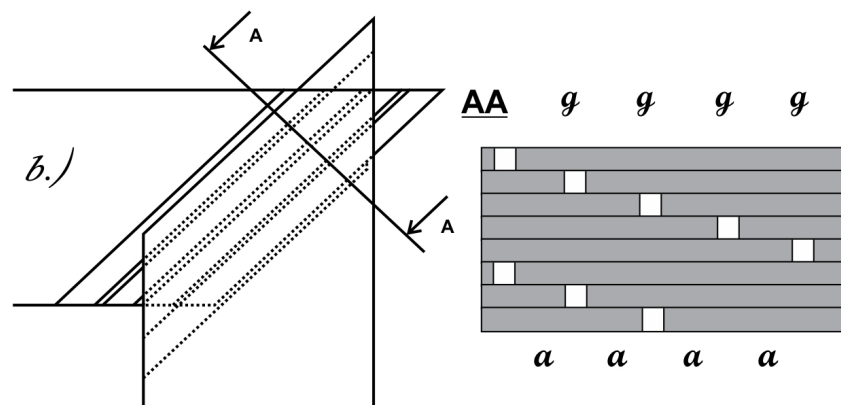


Figura 4.3: Detalhe da montagem do núcleo Multi Step-lap.

Quando comparado com núcleo de montagem Single Step-lap, o núcleo Multi Step-lap tem a desvantagem do aumento dos custos para a montagem. Contudo,

existem relatos de que as perdas dos núcleos de montagem Multi Step-lap são reduzidas em até 5% ou até 10%, dependendo da densidade de fluxo aplicada, e de cinco a sete decibéis no nível de ruído para indução típica de operação de 1.7 T, em comparação a configuração Single Step-lap (VALKOVIC, Z., 1991).

Investigando o núcleo Multi Step-lap, o mesmo tem mostrado que o fluxo tende a não ser homogêneo, devido às características específicas da sobreposição da região do canto do núcleo, por exemplo, devido às distribuições de comprimentos de ar o fluxo tende a concentrar-se nas regiões de baixo g (entreferro) o que significa que existem um equilíbrio do fluxo (LOFFLER and GRAMM, 1995).

Com o aumento de números de chapas por camadas, a saturação no entreferro e a corrente e excitação são reduzidas e as que as perdas no núcleo diminuem ligeiramente, já quando se diminui o número de chapas por camada, verifica-se uma maior saturação e influência do entreferro. Nas figura 4.4 e 4.5 (Romagnole, 2010), mostra o detalhe da junta Single Step-lap e Multi Step-lap.

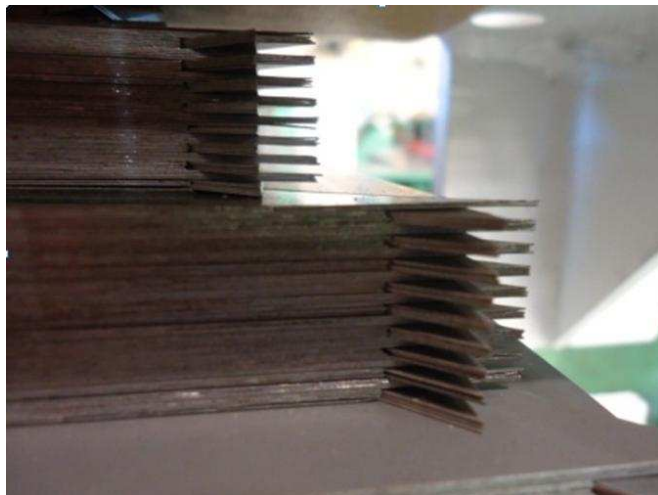


Figura 4.4: Junta Single Step-lap do núcleo de um transformador de potência.



Figura 4.5: Junta Multi Step-lap do núcleo de um transformador de potência.

As juntas dos núcleos nesse trabalho corresponde a dois tipos de configuração com diferentes espaçamentos entre as chapas (entreferro). Esses diferentes espaçamentos estão na direção horizontal em que as chapas serão encostadas ou ficarão o mais próximo possível das outras, onde denominamos as juntas dos tipos S1 e S2.

O tipo S1 é a forma mais simples de junta de núcleo até hoje utilizada em transformadores de potência conhecida como Single Step-lap, como mostrado na figura 4.6, e a junta S2 é conhecida como Multi Step-lap onde é representada na figura 4.7. Podendo assim verificar que a juntas do tipo Single Step-lap devido o seu espaçamento do entreferro estar mais próximo do que o Multi Step-lap, ou seja, no mesmo instante, proporcionará mais perda no ferro.

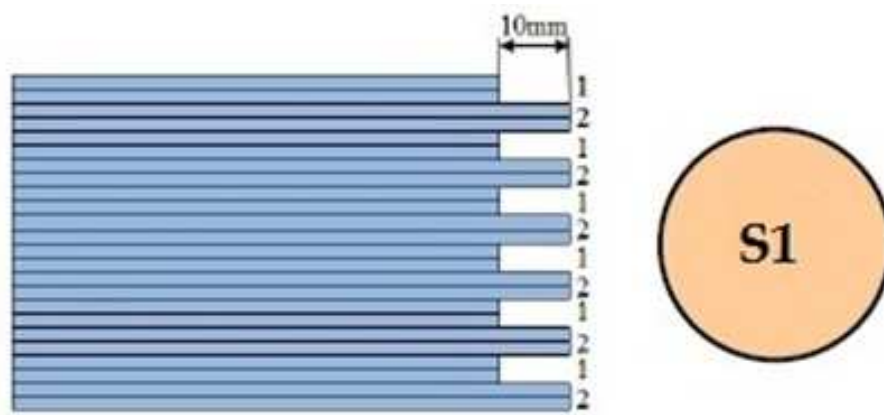


Figura 4.6: Perfis das juntas Single Step-lap.

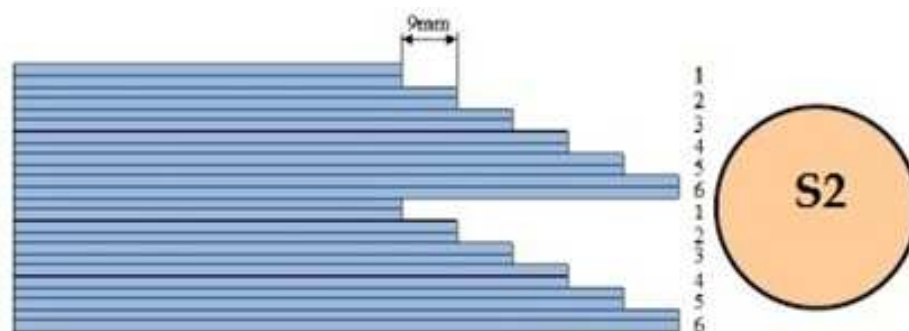


Figura 4.7: Perfis das juntas Multi Step-lap.

Construtivamente o núcleo Multi Step-Lap possui uma furação nas chapas onde é introduzido um tirante que, após aperto ajuda no alinhamento e a rigidez do *pacote* de chapas do núcleo.

A principal função desse tirante com o torque de aperto correto, é a eliminação de ruídos, pois as chapas estarão mais alinhadas e apertadas em relação à montagem do tipo Single Step-lap onde, em sua fabricação, os cortes das chapas não utilizam esse método de furação.

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 (Romagnole, 2010), mostra o tipo de montagem com e sem a furação e fixação dos tirantes.



Figura 4.8: Montagem do núcleo Single Step-Lap sem a furação nas chapas.



Figura 4.9: Detalhe da furação nas chapas do núcleo Multi Step-lap e montagem dos tirantes.



Figura 4.10: Núcleo Multi Step-lap e tirantes após aperto.

4.3 Aspectos Construtivos para a Diminuição das Perdas no Núcleo

Alguns fatores construtivos contribuem para diminuição das perdas nos núcleo dos transformadores. Esses fatores permitem que este núcleo não deixe de atingir as suas características de desempenho requeridas. Normalmente a seção transversal do núcleo é projetada aproveitando a área de um círculo, assim as lâminas de aço passam a possuir uma disposição mais econômica com seção retangular e espessura reduzida. São utilizados degraus com seção retangular, como pode ser visto na figura 4.11.

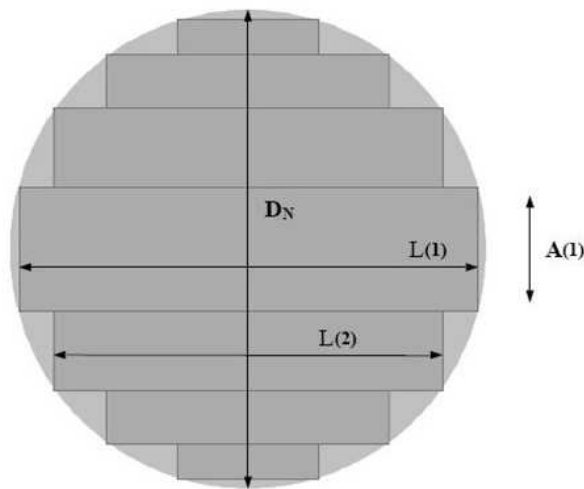


Figura 4.11: Seção transversal do núcleo.

Outro fator importante é o tipo de corte das laminas de aço-silício. Existem dois tipos de corte, com juntas recortadas a 90° e 45° . Na Figura 4.12 é possível visualizar o corte de 90° . Nesse caso, as juntas são utilizadas para aplicações de baixo índice de desempenho.

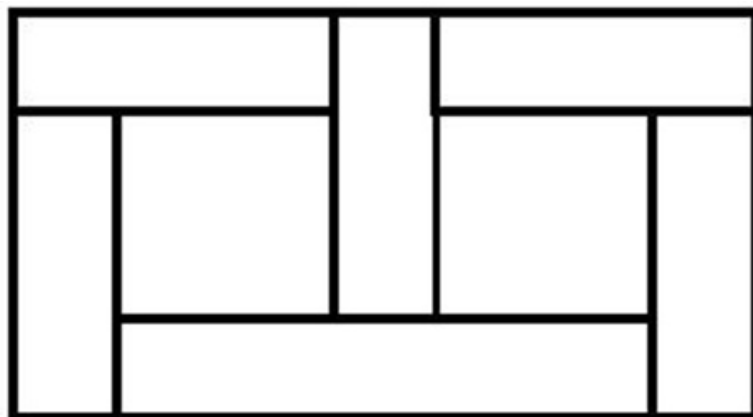


Figura 4.12: - Núcleo com chapas em corte de 90° .

Em transformadores de maior índice de rendimento é recomendada a utilização de laminas recortadas à 45° e com um recorte em V na coluna central, como pode ser visto na figura 4.13.

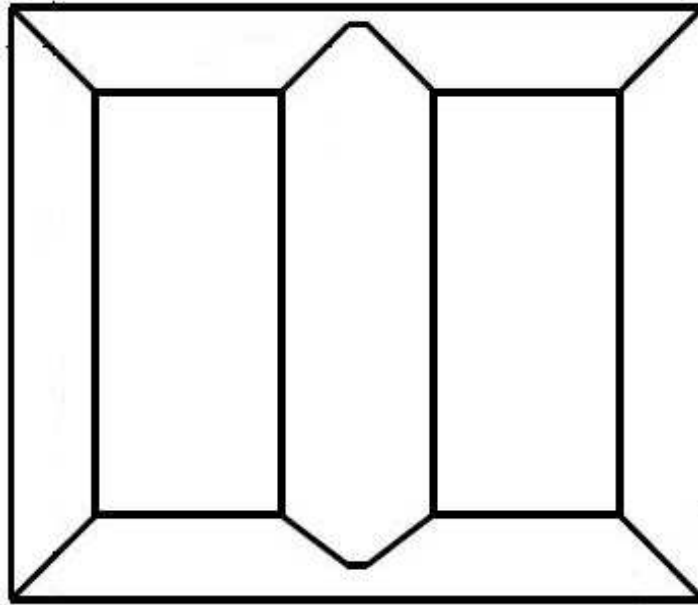


Figura 4.13: Núcleo com chapas em corte de 45° .

Entretanto, mesmo com o corte em 45° existem diferentes tipos de juntas que podem ser utilizados, pois o alto valor da relutância no entreferro e a não uniformidade na distribuição do fluxo magnético entre as lâminas ocasionam a concentração de perdas magnéticas no entreferro, o que pode acarretar altas temperaturas. Como a relutância do entreferro é influenciada pelo comprimento do circuito magnético e o comprimento total dos entreferros, pode-se dizer que reduzindo o entreferro, é possível reduzir o valor da corrente magnetizante, diminuindo as perdas. O número de laminas por camada influencia a dimensão do entreferro e a diminuição do ruído gerado pelo transformador, quando os núcleos são montados com 2 (duas) ou 3 (três) lâminas por camada os resultados são bastante satisfatório VALKOVIC, Z., 1982).

4.4 Anisotropia Cristalina

As lâminas de aço para núcleos, constituídas da liga Fe-Si *ferro-silício*, laminadas a frio e com grãos orientados, apresentam um eixo preferencial de magnetização, segundo o eixo de orientação de seus cristais. Quando o fluxo magnético flui segundo a direção desse eixo, as perdas magnéticas são baixas.

A anisotropia (*propriedade física com variação de direção*) cristalina ferromagnético laminado a frio estabelece os fundamentos do projeto da junção coluna-jugo. Adi-

cionalmente, a necessidade de transferir elevados esforços mecânicos, devido a montagem, curto-circuito e transporte, pode influenciar o projeto da junta quanto à sua capacidade de reação por atrito mecânico entre as lâminas. A anisotropia impõe a inclinação das juntas em relação ao eixo de laminação. Em geral, as juntas são construídas pela justaposição de lâminas recortadas a 45° , tipo *V*.

Para a aplicações de baixo índice de desempenho, a composição de lâminas retangulares pode ser executada. A figura 4.14 mostra um exemplo de núcleo em que há composição de lâminas retangulares com corte a 45° tipo *V* na coluna central, e é possível observar o caminho do fluxo por direção transversal à laminação através das setas.

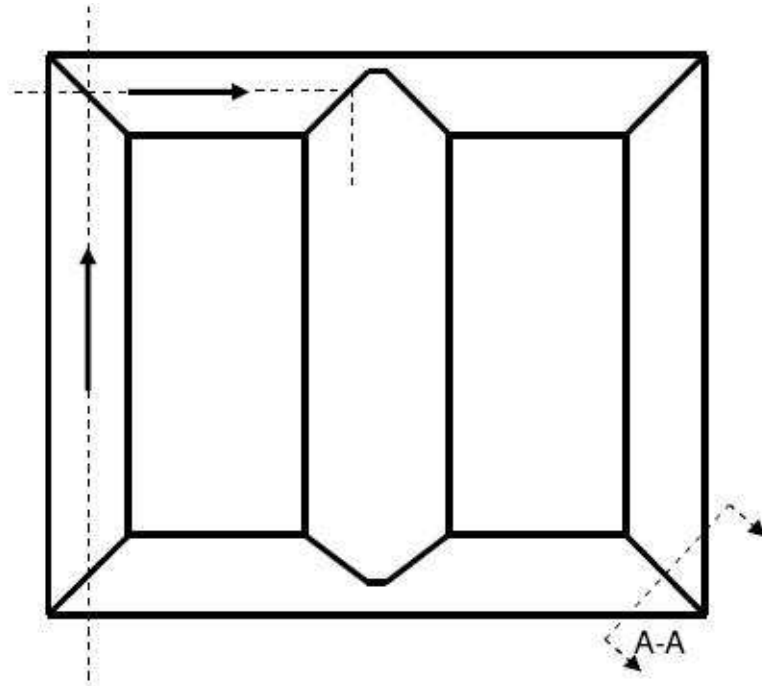


Figura 4.14: Composição de núcleo com chapas em corte de 45° nas juntas.

Adicionalmente, nas juntas, devido ao valor elevado da relutância do entreferro e à distribuição não uniforme do fluxo na passagem entre lâminas adjacentes e frontais, há a concentração de perdas magnéticas e a possibilidade de ocorrência de temperaturas elevadas.

O entreferro influencia também o valor da corrente magnetizante, e sendo $\mu_0 \ll \mu_{Fe-Si}$.

Tem-se que:

$$R_0 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{L_0}{S} \gg R_{Fe-Si} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{L_m - L_0}{S} \quad (4.1)$$

Sendo:

- R_0 a relutância do entreferro;
- R_{Fe-Si} a relutância do núcleo de aço-silício;
- L_m o comprimento do circuito magnético;
- L_0 o comprimento total dos entreferros do circuito magnético.

Dessa forma, reduzindo o entreferro, ocorre redução do valor da corrente magnetizante (CALIL, WILERSON. V., 2009).

As figuras 4.15 e 4.16 nos mostra o corte A-A em destaque na figura 4.14 para a composição alternada da junta, Single Step-lap, e para a composição periódica de junta Multi Step-lap.

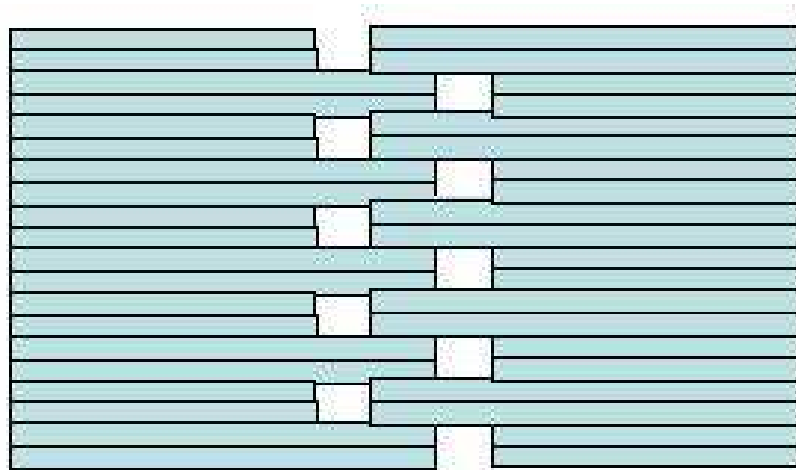


Figura 4.15: Detalhe do corte representando a junta de núcleo Single Step-lap.

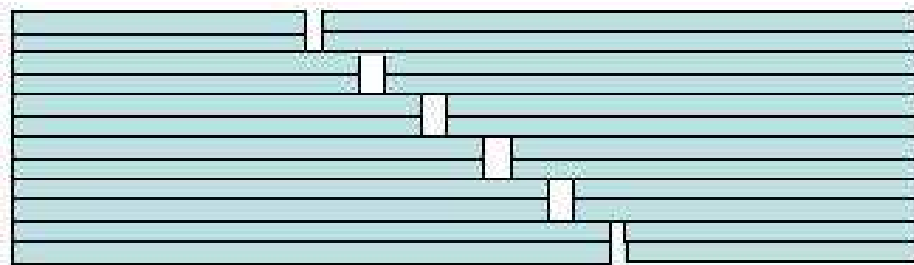


Figura 4.16: Detalhe do corte representando a junta de núcleo Multi Step-lap .

4.5 Conclusão

Foram avaliados os impactos causados por diferentes juntas dos núcleos em estudo e qual a influência no desempenho geral do mesmo. No resultado dessa análise

foi possível observar que as juntas no modelo construtivo Multi Step-lap tem um rendimento melhor devido seu entreferro ter um espaçamento onde ocasionando uma melhor distribuição do fluxo magnético.

O modelo Multi Step-lap, possui um tipo de montagem mais detalhado como foi possível verificar nesse capítulo, onde o processo possui uma fixação diferenciada com tirantes proporcionando um melhor aperto na sua montagem final, onde diminuiu o ruído e dando uma melhor vida útil ao transformador.

Os cálculos dos transformadores protótipos de 300kVA e 500kVA foram realizados de forma detalhada com objetivo de calcular as perdas com muita confiabilidade diretamente com as curvas de saturação obtidas junto a empresa Romagnole Produtos Elétricos S.A, podendo assim dar mais confiabilidade nos resultados mostrados.

5 Resultados Obtidos e Sugestões para Melhorias.

5.1 Introdução

Este capítulo mostra o procedimento para a realização do ensaio de curva de saturação e a construção dos dois protótipos em estudo, o transformador de 300kVA padrão ABNT e o transformador de 500kVA padrão COPEL, projetados construtivamente com os núcleos Single Step-lap e o Multi Ste-lap, onde foi possível observar a redução das perdas e a redução do custo capitalizado.

5.2 Procedimento para a realização do ensaio de curva de saturação

O ensaio, descrito nessa seção, é responsável pela determinação dos valores reais utilizados na formação do banco de dados dos projetos. A idéia é apresentar uma noção básica da execução do ensaio de curva de saturação em núcleo de transformadores.

Importante lembrar que o ensaio de levantamento da curva de magnetização (saturação) é considerado um ensaio especial segundo a norma NBR 5356-1.

Procedimentos para ensaio de curva de saturação em transformadores são:

1. Verificar dados de projeto:

- Classe de tensão (kV);
- Grupo de ligação;
- Potencia (kVA);
- Alta tensão (V);

- Baixa tensão (V);
- Peso do Núcleo (Kg);
- Número de espiras BT;
- Seção do núcleo (cm²);
- Frequência (Hz).

2. Definir a fases de valores de tensão a serem aplicadas no ensaio.

3. Preparação do transformador para o ensaio.

Energizar o transformador pela BT pelos terminais de fase (X1 X2 X3) e aterrar o terminal de neutro X0, e o transformador.

4. Realização do ensaio:

O ensaio pode ser realizado manualmente ou pode ser automático.

4.1. Ensaio manual:

- Ajustar os valores de tensão de acordo como definido no item 2;
- Anotar os valores lidos no medidor de perdas (Medidor de Grandezas Elétricas).

4.2. Ensaio automático:

- Ensaio realizado automaticamente pelo medidor de grandezas elétricas;
- Preparação conforme item 2;
- Ajuste das leituras, através do programa de medidor de grandezas elétricas as leituras de tensão, corrente e perdas são arquivadas automaticamente e após o término dos ensaios o programa emite um relatório com as Informações das grandezas lidas com tensão, perdas, corrente em vazio (%), indução B (em Tesla), valor de W/Kg e VA/Kg, onde é gerado um gráfico para a análise da saturação do núcleo.

5. Equipamentos para ensaio:

- Fonte de tensão alternada (gerador 300kVA) 60 ou 50 Hz;
- Transformador de Corrente TC;
- Transformador de Potência TP;
- Medidor de grandezas elétricas (J-MAN, Yokogawa, etc).

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

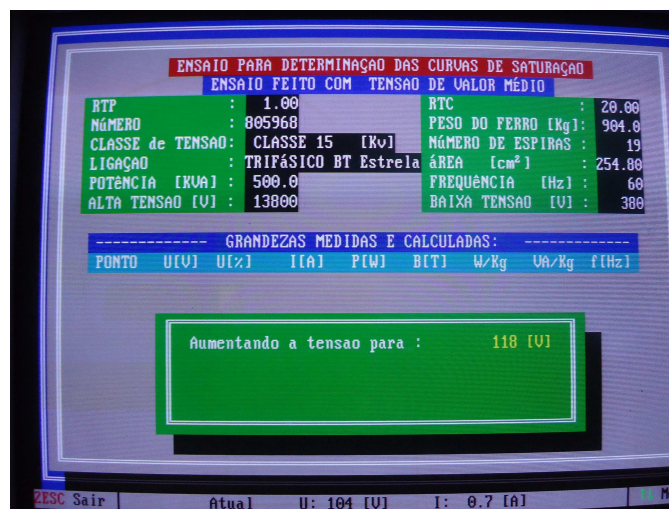


Figura 5.1: Tela inicial do analisador de perdas do ensaio de saturação.

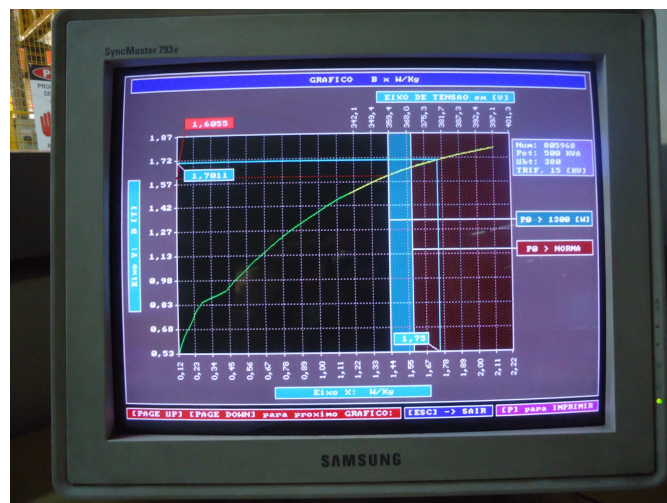


Figura 5.2: Curva do núcleo no analisador de perdas do ensaio de saturação.



Figura 5.3: Gerador 300kVA.

Esse ensaio define os valores de W/Kg e VA/Kg principalmente em função do valor da indução do núcleo do transformador que foi informado pelo projetista. Os valores de W/Kg são os valores que representam as perdas do núcleo, ou seja, são os valores responsáveis pelo desempenho e rendimento do núcleo do transformador.

Basicamente o ensaio de saturação é realizado sobre o ensaio em vazio e corrente de excitação, onde a diferença é que, o ensaio de saturação trabalha sobre os pontos de saturação na curva do núcleo.

As perdas em vazio e a corrente de excitação devem ser referidas à tensão senoidal pura. As perdas em vazio devem ser medidas com tensão nominal na derivação principal ou quando medidas numa outra derivação, com a respectiva tensão de derivação, lembrando sempre que, as medições devem ser realizadas na frequência nominal (Norma ABNT 5356).

5.3 Dados obtidos sobre os ensaios de curva de saturação

A proposta geral deste trabalho é a comparação dos núcleos Multi Step-lap e Single Step-lap utilizados em transformadores de potência onde será proposta uma nova metodologia para avaliação de técnicas de montagem dos núcleos citados. A Metodologia indica o melhor tipo de montagem para uma determinada densidade de fluxo magnético (WEISER, H.P. and ANGER, 2000) e (MAE, A. and TODAKA, 2002).

O projeto proposto neste trabalho, os ensaios e demais testes relacionados com à montagem dos núcleos de transformadores realizados em uma empresa fabricante

nacional de transformadores - Romagnole Produtos Elétricos S.A, está dividida em duas etapas, a metodologia trata os ensaios de curva de saturação em primeiro momento e depois o desenvolvimento de dois protótipo, um transformador de 300kVA e outro de 500kVA para a possível análise de redução de perdas. A primeira etapa tem o foco de adquirir o maior número possível de dados relacionados aos ensaios de curva de saturação, onde nada mais é que, a aplicação da tensão nominal no núcleo variando de acordo com cada projeto elaborado podendo assim medir a saturação do núcleo, uma noção básica sobre o ensaio de saturação encontra-se acima (NBR 5356).

O ensaio foi realizado em transformadores com produção no mês considerando os diferentes tipos de montagens dos núcleos, abaixo mostra ensaios realizados onde através dos mesmo será possível a integração e estudo para a realização do protótipo, e em uma etapa posterior, será analisado através dos protótipos qual o melhor rendimento e custo voltado a perda do transformador.

A tabela 5.1 e 5.2, mostra resultados obtidos através de ensaios de curva de saturação dos transformadores com característica de montagem do núcleo Multi Step-lap. Após a coleta dos ensaios de curva de saturação, os dados foram atribuídos a uma planilha do excel onde foi estabelecido o parâmetro relacionado aos principais dados a curva W/Kg x Indução (*densidade de fluxo magnético*) para os dois tipos de montagem de núcleos o Single step lap e o Multi Step-lap.

Nas figuras 5.4 e 5.5 podemos observar os gráficos das curvas e seus valores em relação à densidade de fluxo magnético.

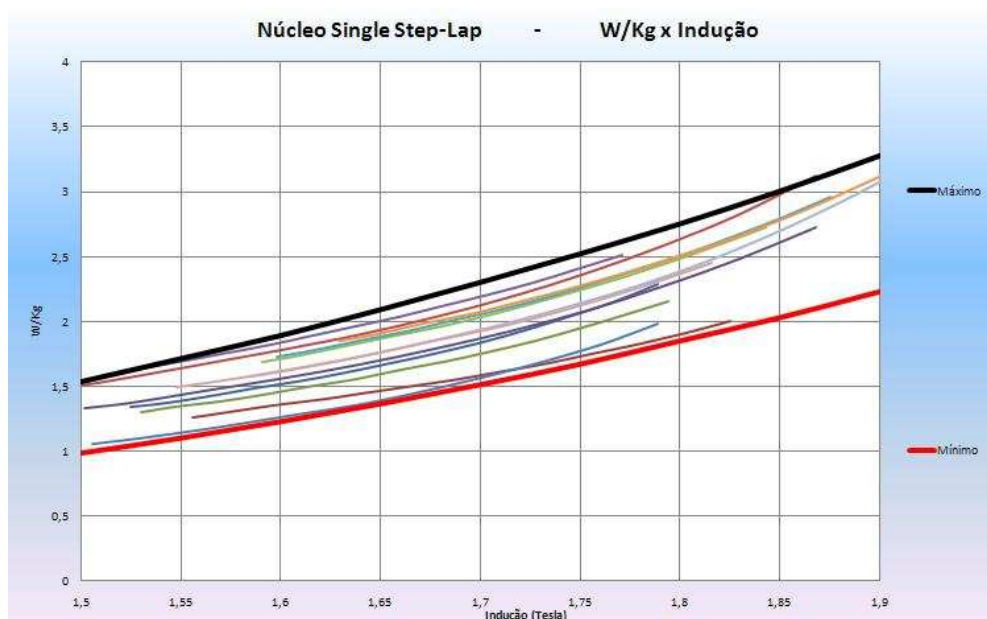


Figura 5.4: Curva do núcleo Single Step-lap W/Kg x Indução.

Tabela 5.1: Dados obtidos de um transformador de 300kVA com montagem do núcleo em Multi Step-lap.

ROMAGNOLE Produtos Elétricos S/A						
762682 06/08/2010 TRIF.-15 [KV] 300 [KVA]						
Tensão em [V]	Corrente em vazio [%]	Perdas em vazio [W]	Indução B em [T]	W/Kg	VA/Kg	
197	0.49	856	1.525	1.26	2.21	
198	0.56	876	1.533	1.29	2.46	
199	0.61	894	1.541	1.32	2.68	
200	0.65	911	1.549	1.34	2.88	
201	0.69	927	1.556	1.37	3.07	
202	0.72	942	1.564	1.40	3.22	
203	0.77	957	1.572	1.42	3.37	
204	0.79	970	1.580	1.44	3.51	
205	0.82	984	1.587	1.45	3.64	
206	0.85	996	1.595	1.47	3.76	
207	0.87	1009	1.603	1.49	3.87	
208	0.90	1022	1.611	1.51	3.99	
209	0.92	1034	1.618	1.52	4.12	
210	0.96	1047	1.626	1.54	4.23	
211	0.99	1059	1.634	1.56	4.37	
212	1.02	1072	1.642	1.59	4.50	
213	1.05	1086	1.649	1.61	4.66	
214	1.09	1099	1.657	1.63	4.84	
215	1.13	1114	1.665	1.65	5.03	
216	1.19	1130	1.672	1.67	5.24	
217	1.24	1146	1.680	1.69	5.48	
218	1.30	1162	1.688	1.72	5.74	
219	1.37	1181	1.696	1.74	6.05	

220	1.44	1200	1.703	1.77	6.37	

221	1.52	1221	1.711	1.81	6.74	
222	1.62	1244	1.719	1.84	7.15	
223	1.71	1267	1.727	1.87	7.60	
224	1.83	1294	1.734	1.91	8.10	
225	1.95	1321	1.742	1.95	8.63	
226	2.08	1350	1.750	2.00	9.23	
227	2.23	1382	1.758	2.04	9.87	
228	2.38	1415	1.765	2.09	10.57	
229	2.56	1451	1.773	2.14	11.33	
230	2.74	1490	1.781	2.21	12.16	
231	2.94	1531	1.789	2.26	13.05	
232	3.16	1574	1.796	2.32	14.01	
233	3.39	1620	1.804	2.39	15.03	
234	3.64	1670	1.812	2.47	16.13	
235	3.91	1722	1.820	2.54	17.30	
236	4.19	1778	1.827	2.63	18.56	
237	4.49	1835	1.835	2.71	19.91	
238	4.81	1897	1.843	2.80	21.33	
239	5.16	1962	1.851	2.90	22.84	
240	5.51	2032	1.858	3.00	24.44	
241	5.90	2104	1.866	3.11	26.13	
242	6.30	2181	1.874	3.22	27.93	
243	6.73	2262	1.882	3.34	29.82	
244	7.18	2346	1.889	3.47	31.82	
245	7.65	2434	1.897	3.59	33.92	
246	8.15	2527	1.905	3.74	36.12	
247	8.67	2625	1.912	3.87	38.43	
248	9.22	2726	1.920	4.03	40.87	

Tabela 5.2: Dados obtidos de um transformador de 500kVA com montagem do núcleo em Multi Step-lap.

ROMAGNOLE Produtos Elétricos S/A

728743 04/01/2010 TRIF.-15 [KV] 500 [KVA]

Tensão em [V]	Corrente em vazio [%]	Perdas em vazio [W]	Indução B em [T]	W/Kg	VA/Kg
197	0.32	1108	1.511	1.16	1.66
198	0.34	1125	1.518	1.17	1.73
199	0.35	1140	1.526	1.19	1.81
200	0.36	1155	1.534	1.20	1.87
201	0.37	1171	1.541	1.22	1.92
202	0.38	1185	1.549	1.23	1.97
203	0.39	1200	1.557	1.25	2.02
204	0.39	1215	1.564	1.26	2.05
205	0.40	1230	1.572	1.28	2.08
206	0.41	1244	1.580	1.29	2.11
207	0.41	1259	1.587	1.31	2.13
208	0.41	1274	1.595	1.32	2.15
209	0.42	1288	1.603	1.34	2.17
210	0.42	1303	1.610	1.35	2.19
211	0.43	1318	1.618	1.38	2.22
212	0.43	1332	1.626	1.39	2.25
213	0.44	1348	1.633	1.41	2.27
214	0.44	1363	1.641	1.42	2.30
215	0.45	1379	1.649	1.44	2.33
216	0.45	1394	1.656	1.45	2.36
217	0.46	1411	1.664	1.47	2.40
218	0.47	1428	1.672	1.48	2.46
219	0.48	1445	1.680	1.50	2.51

220	0.49	1462	1.687	1.52	2.57

221	0.50	1479	1.695	1.54	2.65
222	0.53	1498	1.703	1.55	2.72
223	0.55	1517	1.710	1.58	2.81
224	0.56	1537	1.718	1.60	2.92
225	0.58	1557	1.726	1.62	3.02
226	0.61	1577	1.733	1.64	3.15
227	0.63	1599	1.741	1.66	3.30
228	0.66	1621	1.749	1.69	3.44
229	0.69	1644	1.756	1.71	3.61
230	0.74	1667	1.764	1.73	3.80
231	0.77	1693	1.772	1.76	4.00
232	0.81	1718	1.779	1.79	4.22
233	0.86	1744	1.787	1.82	4.45
234	0.90	1770	1.795	1.84	4.71
235	0.96	1799	1.802	1.87	4.99
236	1.02	1828	1.810	1.90	5.28
237	1.07	1857	1.818	1.93	5.60
238	1.14	1889	1.825	1.96	5.94
239	1.21	1922	1.833	2.00	6.30
240	1.28	1955	1.841	2.04	6.69
241	1.37	1989	1.848	2.07	7.10
242	1.45	2024	1.856	2.11	7.54
243	1.53	2062	1.864	2.14	8.00
244	1.63	2100	1.871	2.18	8.48
245	1.73	2140	1.879	2.23	9.01
246	1.84	2180	1.887	2.27	9.56
247	1.94	2223	1.894	2.31	10.13
248	2.06	2266	1.902	2.36	10.73
249	2.18	2311	1.910	2.40	11.37
250	2.31	2357	1.917	2.46	12.04

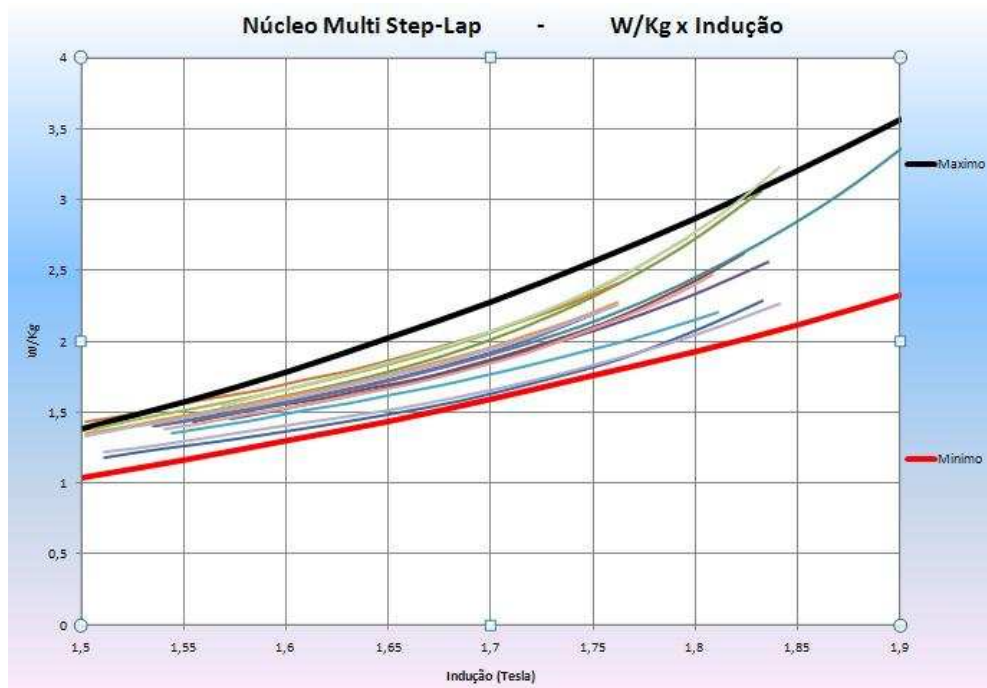


Figura 5.5: Curva do núcleo Multi Step-lap W/Kg x Indução.

5.4 Perda em um Transformador

Como toda máquina, o transformador apresenta perdas, que são pequenas em relação a sua potência nominal. Essas perdas podem ser classificadas em dois tipos: perdas no núcleo magnético, ou perdas no ferro, e perdas nos enrolamentos, ou perdas no cobre como citado no capítulo 2.

5.5 Estudo Prático de Redução das Perdas no Núcleo

Minimizar as perdas de energia em um transformador é o caminho para aumentar a oferta de energia. Com este conceito foi proposto com base em dois projetos de transformadores trifásicos industriais com potência de 300 kVA e 500 kVA, a realização de dois protótipos para um estudo prático com o objetivo de reduzir as perdas no núcleo do transformador, lembrando que todos os projetos padrões iniciais estavam com a montagem do núcleo tipo Single Step-lap, consequentemente sendo modificado para o tipo Multi Step-lap.

Após a coleta das curvas de saturação junto a empresa Romagnole e com as devidas modificações nos projetos para o núcleo tipo Multi Step-lap, foi aplicado às perdas capitalizadas referente à concessionária local (*Companhia Paranaense de Energia - COPEL*), a perda capitalizada para transformadores trifásicos pode

ser expressada por:

$$VP = (6,976.PN + 3,825.PE) \quad (5.1)$$

onde:

- VP = Valor presente em real (R\$) do custo das perdas;
- PN = Perdas garantidas pelo fabricante, constante no núcleo (ferro), em kW;
- PE = Perdas garantidas pelo fabricante, nos enrolamentos (cobre) em kW para a carga nominal.

Podendo assim observar tanto a redução das perdas (W/Kg) e o custo das perdas elétricas (perdas capitalizadas), ou seja, perdas referentes ao custo do transformador. As tabelas 5.3 e 5.4 mostram as comparações e a redução na perda no núcleo e custo do transformador com base nos projetos de 300 kVA com perdas padrão ABNT (NBR 5440/99) e 500kVA com perdas padrão COPEL. Os protótipos submetidos possuem as seguintes características e comparações:

Tabela 5.3: Comparação das perdas e custo capitalizado de um transformador 300kVA - Padrão ABNT

Transformador 300kVA				
Características	Single Step-lap	Unid.	Multi Step-lap	Unid.
Modelo	Trifásico	-	Trifásico	-
Frequência	60	Hz	60	Hz
Peso Núcleo	356,1	Kg	356,1	Kg
Alta Tensão	13800	V	13800	V
Baixa Tensão	220/127	V	220/127	V
IN de Alta Tensão	7,25	A	7,25	A
IN de Baixa Tensão	787,3	A	787,3	A
Indução	1,7	Tesla	1,7	Tesla
W/Kg	2,1	W	1,7	W
Perda no Núcleo	842	W	696	W
Perdas Capitalizadas	19.050,42	R\$	18.032,42	R\$
Padrão	ABNT	-	ABNT	-
Redução Perdas	-5,60%			

Tabela 5.4: Comparação das perdas e custo capitalizado de um transformador 500kVA - Padrão COPEL

Transformador 500kVA				
Características Modelo	Single Step-lap Trifásico	Unid. -	Multi Step-lap Trifásico	Unid. -
Frequência	60	<i>Hz</i>	60	<i>Hz</i>
Peso Núcleo	466	<i>Kg</i>	466	<i>Kg</i>
Alta Tensão	13800	<i>V</i>	13800	<i>V</i>
Baixa Tensão	380/220	<i>V</i>	380/220	<i>V</i>
IN de Alta Tensão	12,07	<i>A</i>	12,07	<i>A</i>
IN de Baixa Tensão	759,7	<i>A</i>	759,7	<i>A</i>
Indução	1,7	<i>Tesla</i>	1,7	<i>Tesla</i>
W/Kg	2,1	<i>W</i>	1,6	<i>W</i>
Perda no Núcleo	1031	<i>W</i>	798	<i>W</i>
Perdas Capitalizadas	27.468,58	<i>R\$</i>	25.843,17	<i>R\$</i>
Padrão	COPEL	-	COPEL	-
Redução Perdas	-6,20%			

Com a redução das perdas após a construção dos protótipos fica evidenciado conforme as tabelas 5.3 e 5.4 que os valores de W/Kg na montagem do núcleo Multi Step-lap são mais baixo em relação a montagem do tipo Single Step-lap, podendo comprovar que realmente a perda no núcleo do transformador pode ser reduzida de 5% até 10% (VALKOVIC, Z., 1991).

As figuras 5.6 e 5.7 mostra mais detalhadamente a redução de valores capitalizados baseado nos padrões ABNT e COPEL.

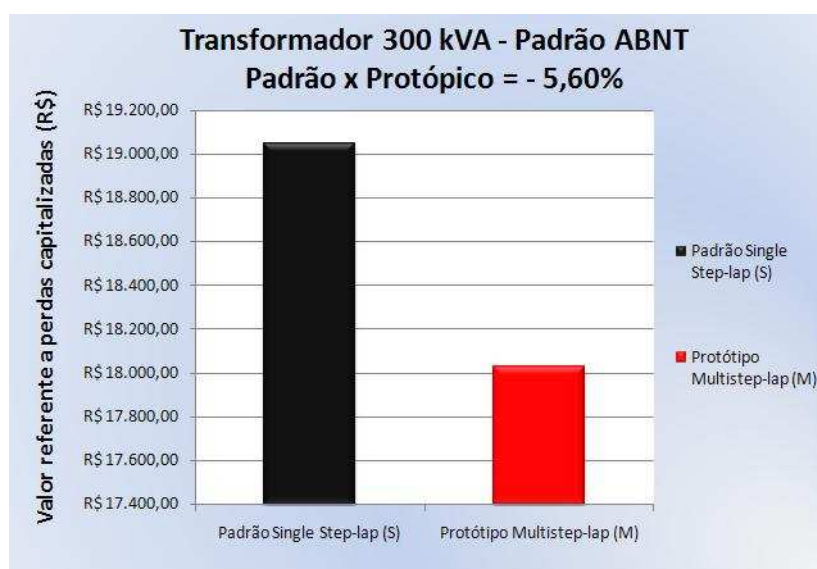


Figura 5.6: Transformador 300 kVA, Padrão x Protótipo = - 5,60% (Padrão ABNT)

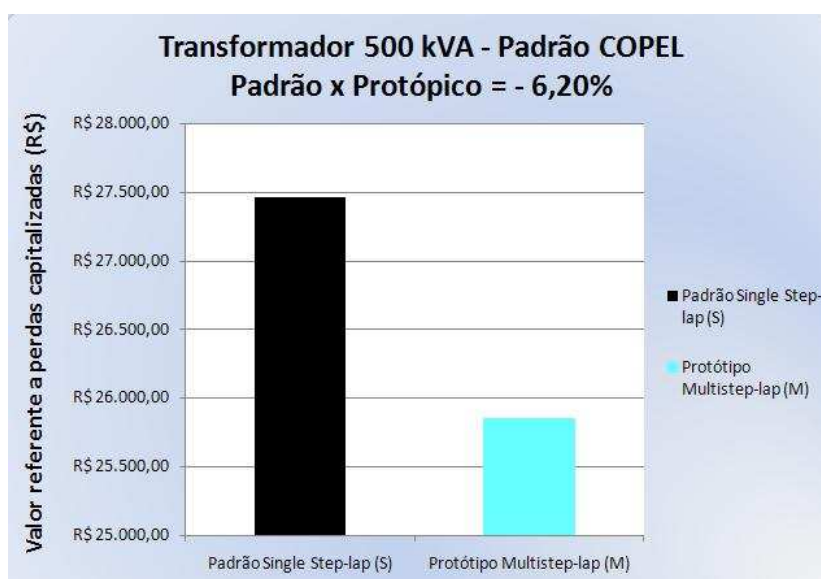


Figura 5.7: Transformador 500 kVA, Padrão x Protótipo = - 6,20% (Padrão COPEL)

As figuras 5.8 e 5.9 mostra a comparação das perdas após a realização dos protótipos.

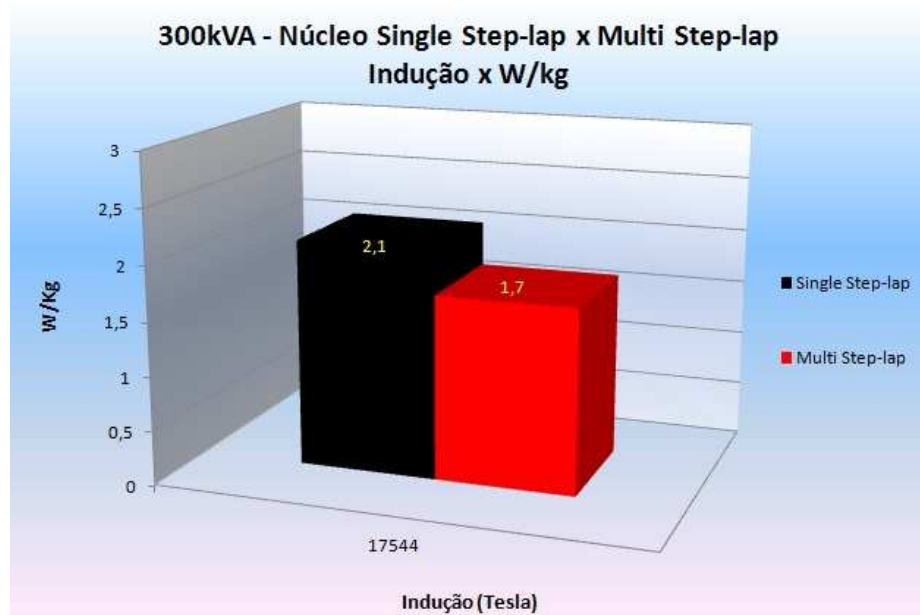


Figura 5.8: Comparação das perdas do núcleo W/Kg transformador 300 kVA - Padrão ABNT.

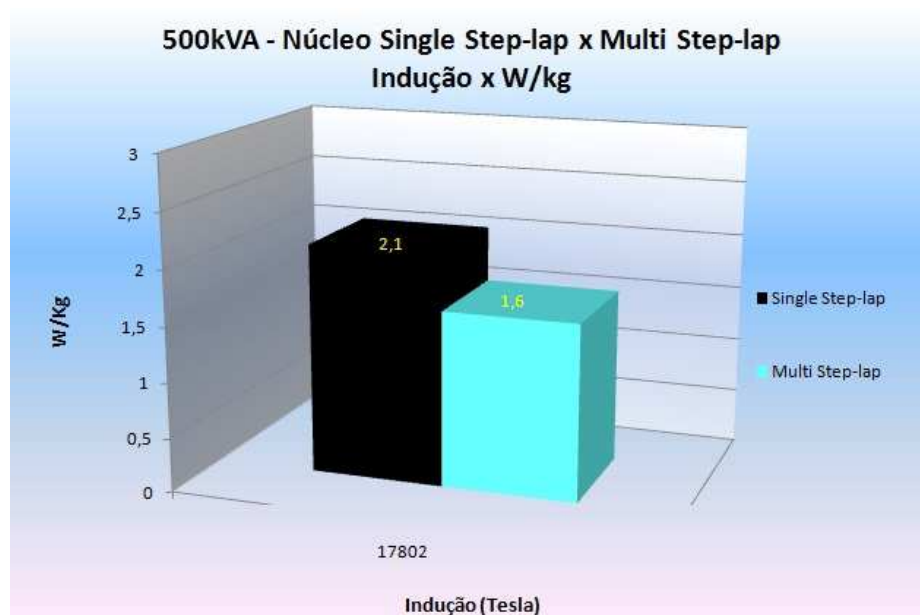


Figura 5.9: Comparação das perdas do núcleo W/Kg transformador 500 kVA - Padrão ABNT.

Recentemente a Copel (Companhia Paranaense de Energia - COPEL) divulgou seu desempenho no mercado de energia elétrica onde teve um acréscimo de 4% no primeiro semestre de 2011.

No trabalho proposto o mesmo se enquadra na classe industrial ou comercial, onde para a classe industrial cresceu 1,7% consumindo um total de 3558 GWh, e no setor comercial consumiu 2408 GWh, o que representa um crescimento de 6,8%, influenciado pelo mercado de trabalho, com o estudo realizados nos protótipos de transformadores trifásicos de 300kVA e 500kVA poderíamos oferecer a redução

de 5% a 6%, voltado ao estudo com base na demanda das perdas de energia relacionadas aos transformadores para essas duas categorias.

A tabela 5.5 a seguir apresenta o comportamento do mercado cativo aberto (Copol) por classe de consumo:

Tabela 5.5: Comportamento do mercado cativo aberto por classe de consumo - COPEL

	<i>Nº de consumidores</i>			<i>Energia vendida</i>		
	<i>jun/11</i>	<i>jun/10</i>	<i>%</i>	<i>1S/11</i>	<i>1S/10</i>	<i>%</i>
<i>Residencial</i>	3.008.656	2.893.098	4,0	3.103	2.964	4,7
<i>Industrial</i>	73.573	67.777	8,6	3.558	3.497	1,7
<i>Comercial</i>	320.773	301.009	6,6	2.408	2.255	6,8
<i>Rural</i>	359.548	360.482	0,3	965	921	4,7
<i>Outros</i>	50.389	48.896	3,1	1.052	1.023	2,8
<i>Mercado cativo</i>	3.812.939	3.671.262	3,9	11.086	10.661	4,0

5.6 Estudo da viabilidade econômica

O estudo de viabilidade econômica é realizado, utilizando a equação 5.1 de custo total capitalizado, a curva de carga e os dados referentes às perdas dos transformadores, preços de energia entre outros. Os custos unitários das perdas normalmente são conhecidos nas concessionárias através dos preços de compra e de venda de energia. Portanto, a diferença entre a compra e venda de energia corresponde ao valor da tarifa a ser utilizada na capitalização das perdas (OLIVEIRA, L. C. O., ROSSI, J. C., M. A., PEREIRA, D. R., GONZÁLES, GARCIA, D., 2003).

A substituição de um transformador por outro de maior capacidade ou mais eficiente pode ser realizada mediante a análise do tempo de retorno do investimento e do benefício a obter com essa substituição.

A determinação do tempo de retorno de investimento tem como base a equação 6.2 abaixo.

$$V_R = C_{ue} - C_{up} - [(C_{wop} + C_{wlp}) - (C_{woe} + C_{wle})] \quad (5.2)$$

onde:

- V_R é o valor relativo;

- C_{ue} é o preço do transformador adquirido para substituir o transformador em operação, [R\$];
- C_{up} é o preço do transformador a ser substituído, [R\$];
- C_{wop} é o custo capitalizado das perdas em vazio no núcleo do transformador a ser substituído, [R\$];
- C_{wlp} é o custo capitalizado das perdas em carga nos enrolamentos do transformador adquirido para substituir o transformador instalado, [R\$];
- C_{woe} é o custo capitalizado das perdas vazio no núcleo do transformador adquirido para substituir o transformador de menor capacidade ou menos eficiente [R\$].

C_{wle} é o custo capitalizado das perdas em carga nos enrolamentos do transformador adquirido para substituir o transformador instalado, [R\$]. Portanto, se VR for negativo, ou seja, se a diferença entre os custos das perdas do transformador a ser substituído e do transformador adquirido para proceder esta substituição é maior que a diferença entre os preços de compra desses transformadores, isto significa que se consegue obter lucro adicional. Mas isso só se consegue se a característica física do transformador a ser substituído permitisse.

O momento do retorno do investimento é calculado fazendo V_R igual a zero. Se tecnicamente for possível explorar o transformador para além do V_R igual a zero, está se a obter um benefício adicional. O tempo de retorno do investimento é determinado atribuindo valores a N na equação 5.3 até que essa igualdade se verifique. Quando isto acontecer, N corresponde a este tempo de retorno de investimento, e através deste tempo de retorno do investimento se pode analisar a perda de vida útil econômico do equipamento, pois este tempo corresponde ao tempo em que o investimento é pago pela disponibilidade relativa à relação entre a diferença dos preços de compra desses transformadores e diferença dos seus respectivos custos anuais de energia.

$$CP_{ENR} = 365 \cdot 10^{-6} \cdot W_L \cdot C_E \cdot \sum_{i=1}^{nd} [\Delta_{ti} \cdot (\frac{S}{S_N})^2] \cdot [\frac{S_0(1+t_k)^N}{S_N}]^2 \quad (5.3)$$

onde:

- CP_{ENR} é o custo das perdas nos enrolamentos referente ao ano N (N= 1, 2, ...,N), [R\$];

- S é o patamar i da curva de carga característica diária;
- Δ_{ti} é o intervalo de tempo de patamar i ;
- C_E é o valor de custo unitário das perdas de energia em carga, [R\$/MWh];
- S_N é a potência nominal do transformador, [kVA];
- S_0 é o carregamento inicial do transformador, [kVA];
- nd é o número de patamares de carga diário;
- tk é a taxa anual de crescimento de carga.

O benefício com a substituição do transformador, até aqui, é analisado somente em relação aos custos com cada um dos transformadores. Mas, para uma análise mais complexa no estudo do benefício total com a substituição dos transformadores deve ser considerado o preço de aquisição do transformador a ser substituído no momento inicial do investimento, o preço na fábrica do novo transformador neste momento, o preço deste novo transformador no momento de substituição e o valor residual do transformador a ser substituído.

5.7 Conclusão

Este capítulo apresentou os conceitos de perdas magnéticas em núcleos de transformadores, seus aspectos construtivos, a importância da redução de perda em vazio para efeito de capitalização e a importância para o estudo da viabilidade econômica.

6 Conclusão

O trabalho proposto estabelece um estudo sobre a avaliação e seletividade das técnicas de montagem de núcleo de transformadores, onde proporcionará oportunidades de melhorias e maior competitividade entre as concessionárias.

Portanto com o estudo dessa avaliação será possível apresentar projetos mais confiáveis e com custo menor, devido a redução das perdas dos transformadores. Quando o objetivo é fornecer a máxima quantidade de energia possível sem comprometer a rentabilidade econômica do investimento, com a viabilidade da redução das perdas e custo, as concessionárias poderão reavaliar como também modificar suas perdas por normas podendo assim conseguir uma redução economicamente satisfatória como por exemplo, uma redução na perda de 5% a 10% como mostrou os protótipos realizados.

A contribuição desse trabalho é a redução das perdas onde se possível para o futuro todos os transformadores fossem substituído pelo modelo construtivo Multi Step-lap as concessionárias seriam umas das grandes privilegiadas.

Verifica-se também que é muito importante preservar as características magnéticas das chapas e os cuidados necessários com o seu processamento para a confecção do núcleo, podendo assim projetar um núcleo com bom rendimento.

Portanto, para trabalhos futuros tem-se como sugestão o emprego desta avaliação para o para os fabricantes de transformadores juntamente com as concessionárias, permitindo ainda outros cálculos não realizados neste trabalho, como transformadores com outras características como potência, tensões, correntes, etc.

Como sugestão pode-se realizar um estudo sobre uma nova metodologia com aplicações de redes neurais artificiais em núcleos de transformadores com o objetivo de aprimorar a redução das perdas no núcleo e maior eficiência energética em comparação ao dois tipos de montagens, o tipo Single Step-lap e o Multi Step-lap, onde esse sistema inteligente poderia ajudar a estimar resultados entre potências intermediárias devido a capacidade de interpolação dos R.N.A (HAYKIN, S. 2001).

Referências

BLUME, L. F., BOYAJIAN, A., CAMILI, G., LENNOX, T. C., and MINNECI, S., Transformer Engineering, 2º edição, 1951.

BOYD, E. L. e BORST, J. D., Design concepts for an amorphous metal distribution transformer, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 11, p. 3365-3372, 1984.

BOYLESTAD, ROBERT L., Introdução a Análise de Circuitos Elétricos, 10º edição, 2004.

CALIL, WILERSON VENCESLAU, Determinação de fator de correção para cálculo de perdas magnéticas em núcleo de transformadores de potência pelo método de elementos finitos, Dissertação Mestrado - USP, 2009.

CARLOS, J., YILU L., CAÑEDO, J., ESCARELA, R., DRIESEN, J. and MORENO, P., IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, july 2003.

Catálogo de chapas Acesita; GO-E004, GO-E005

CHENG, Z., HU, Q., JIAO, C., ZHANG, J., WANG, J., ZHANG, X., DU, Y., FAN, Y. and LIU, L., Dual Laminated Core Models for Determining Exciting Power and Saturation Characteristics, ARWtr-2007, Spain.

DORF, RICHARD C., The Electrical Engineering Handbook, Published in Cooperation with IEEE Press, Second Edition, University of California, 2002.

FITZGERALDO A. E., KINGSLEY JR., STEPHEN D., Máquinas Elétricas com introdução a Eletrônica de Potência, 6º edição, 2006.

FONSECA, A.J.F., Influência da pré-laminação nas microestruturas e propriedades magnéticas do aço silício de grão orientado via laminação steckel, Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, 1988.

GRAHAN Jr., C. D. e EGAMI, T., Magnetic properties of amorphous materials. Metals Technology, p. 244-247, jun. 1980.

GOSS, NORMAN P., New Development in Electrical Strip Steels Characterized by Fine Grain Structure Approaching the Properties of a Single Crystal, Transactions of the American Society for Metals, vol.23, 1935.

GUNDLACH, R., High-alloy white irons, Metals Handbook, vol.15, 1988.

GÜNTHER F. MECHLER and RAMSIS S. GIRGIS, F., IEEE, Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, january 2000.

HALLIDAY, DAVID., RESNICK, ROBERT., WALKER, JEARL, Fundamentos de Física 3, Eletromagnetismo, 4º edição.

- Haykin, S., *Redes Neurais Artificiais Princípio e Prática*, 2º edição, Editora Bookman, Porto Alegre, 2001.
- HURLEY, W.G., WÖLFLE, W.H. and BRESLIN, J.G., Optimized Transform Design, Inclusive of High Frequency effects, *IEEE Transaction on Power Electronics*, July, vol.2, 1998.
- LANDGRAF, F.J.G., SCOZ, L.C., A separação de perdas elétricas como critério de avaliação de processamento de aços elétricos, *IV Seminário sobre materiais magnéticos e elétricos - Rio de Janeiro*, 1994.
- LEONARDO E., Global Energy Savings Potencial from High Efficiency Distribution Transformers, *European Copper Institute*, October, 2004.
- LOFFLER, F., BOOTH, T., BENGTSSON, C., and GRAMM, K., Influence of air gaps instacked transformer cores consisting of several packages, *IEEETrans*, pp.913-915, 1995.
- MAE, A., HARADA, K., ISHIHARA, Y., TODAKA, T., A Study of Characteristic Analysis of the Three-Phase Transformer With Step-Lap Wound-Core, *IEEE Transactions on magnetic*, March, vol.2, 2002.
- NEMA, Standards Publication TP 1-2002, Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers, *National Electrical Manufacturers Association*, 2002.
- NBR 5356, Transformador de potência.
- NBR 5440, Transformadores para rede aéreas de distribuição.
- NBR 9119, Produtos laminados planos de aço para fins elétricos de grânulos orientados.
- NBR 10295, Transformador de potência seco.
- NG, H. W., HASEGAWA, R., LEE, A. C. E LOWDERMILK, L. A., Amorphous alloy core distribution transformer. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No.11, p. 1608-1623, 1991.
- OLIVA, E. RAS., Transformadores de potencia, de medida, y de proteccion, vol.3; 1975.
- OLIVEIRA, L. C. O. de., ROSSI, J. C., PEREIRA, M. A., GARCIA, D. R., GONZÁLES, D., Otimização Técnica e Econômica da Aplicação de transformadores em Redes de Distribuição, *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - Anais do II CITENEL*, 2003.
- Plano de crescimento da Copel até 2015. Disponível em: <http://www.copel.com>. Acesso em: 23 ago. 2011.
- REED-HILL, R. E., *Principio da Metalurgica Física*, 2º edição, 1982.
- RODRIGUES, V. A., MONTEIRO, W. A., SILVA, ADONIS M. S., FERREIRA, N. A. M., SILVA, LUÍS C. E.; CUNHA, MARCO A., Estudo da Precipitação da Partícula de MnS após Ensaio de Compressão a Quente com Dois Passes de Deformação. In: *51º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia*

e Materiais, 1996, Porto Alegre. Anais do 51º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.

SCHIMDT, W., Materiais Elétricos, Novembro, 2º edição, 1979.

STIGANT, S. A., and FRANKLIN, A. C., The JP Transformer Book, A practical technology of the power transformer, vol.3, 1973.

VALKOVIC, Z., Influence of the Transformer Core Design on Power Losses, IEEE Transaction on Magnetic, pp.801-804, 1982.

VALKOVIC, Z., Some aspects of additional losses in step-lap joints of transformer cores, Znt. J. Comp. Mathem. Electr. Electron Eng., pp.137-140, 1991.

VAN VLACK, LAWRENE, H., Princípio de Ciências dos Materiais, 1970.

WEISER, H. P. and ANGER. J., Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores, IEEE Transactions on magnetic, July, vol.5, 2000.

Apêndice A - Fluxo de Produção das Ligas de Aço-silício de Grão Orientado

Durante a sua fabricação, as ligas de aço silício são submetidas a diversos processos, o apêndice A mostra um exemplo do fluxo de produção das ligas de aço-silício de grão orientado.

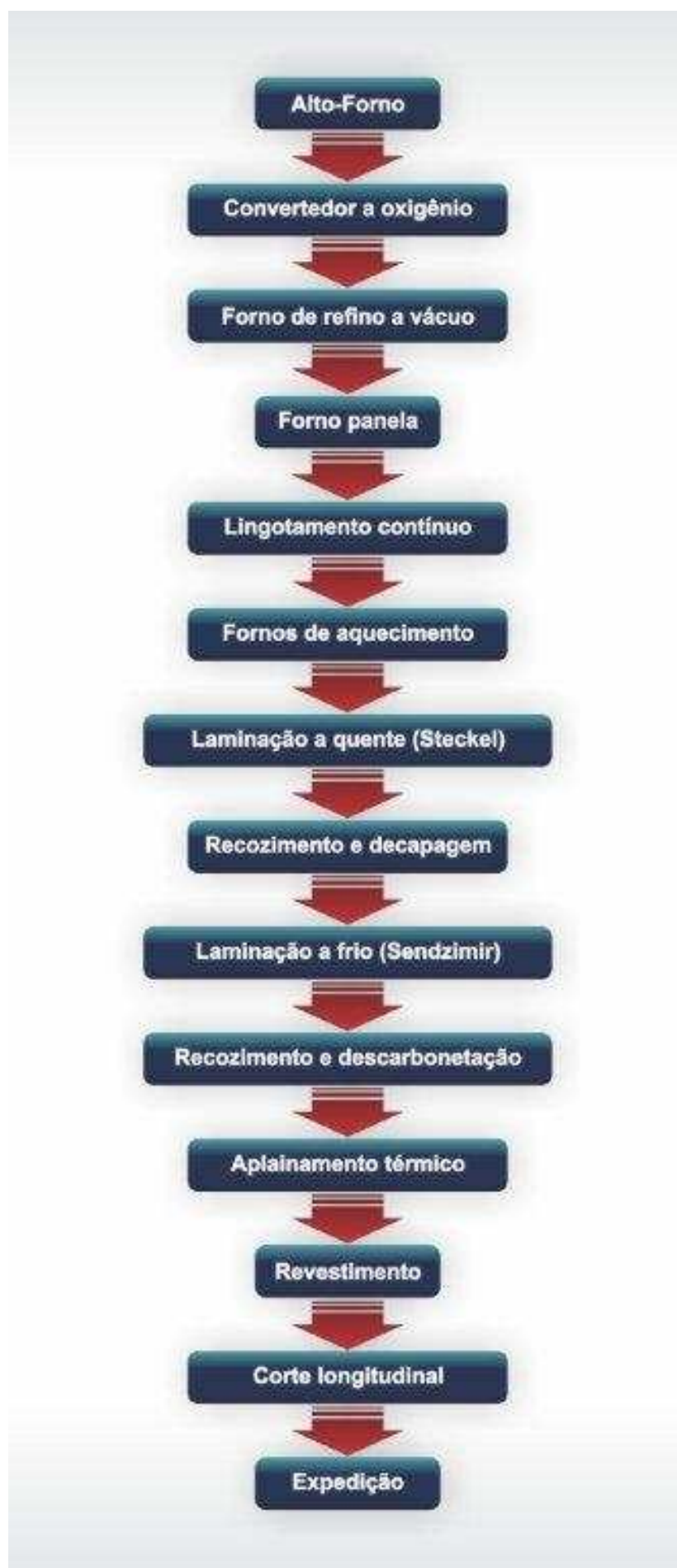


Figura A.1: Fluxo de produção das ligas de aço-silício de grão orientado.

Apêndice B - Ensaios de Curva de Saturação do Núcleo Convencional (Single Step-Lap)

Apêndice C – Ensaios de Curva de Saturação do Núcleo Step-lap (Multi Step-Lap)