

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

***ARIMATÉA ARAÚJO NUNES***

***UMA CONTRIBUIÇÃO PARA PROJETOS DE***  
***TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE MÉDIA TENSÃO***

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

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

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

**Março de 2011**

**Itajubá - MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB\_6/1702

N972u

Nunes, Arimatéa Araújo

Uma contribuição para projetos de transformadores monofásicos de  
média tensão. / por Arimatéa Araújo Nunes. -- Itajubá (MG): [s.n.], 2011.  
100 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luis Barreira Martinez.

Coorientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Carregamento. 2. Eficiência energética. 3. Impedância percentual.  
4. Projetos de transformadores. 5. Perdas. I. Martinez, Manuel Luis Bar-  
reira, orient. II. Wanderley Neto, Estácio Tavares, coorient. III. Univer-  
sidade Federal de Itajubá. IV. Título.

## *Agradecimentos*

Apesar de ter um só nome na capa, este trabalho é fruto resultante de um esforço conjunto e distribuído ao longo de minha vida, havendo inúmeros participantes:

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade e formação em Engenharia Elétrica.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade e formação no Mestrado em Engenharia Elétrica.

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão – LAT-EFEI, pelo apoio, companheirismo e colaboração inestimáveis.

Aos amigos de infância, que sempre estiveram ajudando em todos os momentos.

Aos amigos que colecionei na UFCG, que mostraram inestimável amizade, sempre ajudando quando precisei.

Aos amigos que fiz em Itajubá, pelo apoio.

A todos os familiares, que sempre me apoiaram e me ajudaram enormemente.

Aos meus cunhados, Roberto e Sérgio, pela amizade e pelos momentos de alegria que já passamos em família.

Às minhas irmãs, Patrícia, Angela e Raquel, pela compreensão que tiveram comigo desde o princípio, pela amizade que me proporcionaram, pela confiança que depositaram em mim, pelas alegrias que me proporcionaram, por sempre estarem ao meu lado me dando apoio nas minhas decisões e pelo amor que me passaram. Obrigado por tudo! Vocês são a minha vida, junto com a minha mãe!

À Maria Luiza, que é a minha mais nova alegria, obrigado pelo carinho e pelos seus sorrisos!

À Lina, que acabou de chegar a este mundo, me trazendo alegrias, apesar de ainda não conhecê-la pessoalmente!

Ao meu pai, que me proporcionou a educação necessária para que eu alcançasse meus objetivos profissionais.

À minha mãe, pela ajuda inestimável durante toda a minha vida, pela compreensão que teve comigo nos momentos difíceis, pela confiança na minha capacidade, pelos momentos felizes, pelo apoio nas minhas escolhas e pelo amor incondicional que sempre teve por mim! Obrigado minha mãe por tudo mais que não sou capaz de comentar aqui!

À Nathália, minha esposa, que conheci neste final de jornada, pela compreensão nos momentos difíceis, pela paciência quando precisei, pela ajuda em todos os momentos, pelo apoio em minhas decisões, pelo companheirismo, pela confiança depositada em mim, pelas alegrias que me proporcionou e vem me proporcionando, pelo carinho e pelo amor que vem demonstrando a cada dia que passa e pela imensa felicidade que vem me proporcionando! Obrigado pelo seu amor, e por tudo que não mencionei aqui!

Ao amigo e Professor Estácio Tavares Wanderley Neto, tenho muito que agradecer pela orientação na execução do meu trabalho, onde se mostrou atencioso e sempre disposto a ajudar em todas as horas que precisei, agradeço também por tornar possível essa formação.

Ao amigo e Professor Manuel Luiz Barreira Martinez, meu respeito e agradecimento pela orientação nesta difícil jornada, pela compreensão, pela ajuda, pelas oportunidades oferecidas e pelos seus ensinamentos passados durante todo o tempo que o conheci.

Ao apoio financeiro da AES-Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A.

Agradeço principalmente à Deus, pela força, saúde, disposição e tudo mais que não sou capaz de mensurar.

Muito obrigado a todos.

## Resumo

O transformador é responsável por cerca de 33,3% das perdas elétricas totais no sistema em que opera, perdas que implicam em custos para as distribuidoras de energia e para os consumidores. Diante deste fato, este trabalho propõe algumas soluções para a efficientização do sistema elétrico de distribuição, com foco nos transformadores monofásicos. As soluções apresentadas se baseiam na análise do investimento, redução de perdas e retorno financeiro para transformadores que operam com baixo carregamento. Transformadores com carregamento reduzido devem ter a atenção do projetista voltada as perdas em vazio, visto que, nesta condição, as perdas em carga são reduzidas. Para isto é considerada uma técnica já difundida, como o uso de núcleo amorfo, assim como uma nova proposta, considerando o incremento da impedância percentual. Ao contrário do senso comum, o aumento da impedância percentual pode resultar em um transformador com menor custo e menores perdas em vazio que, se utilizado sob condições de baixo carregamento, pode apresentar menores perdas totais. Ainda foram desenvolvidos projetos com alumínio como material condutor. Esta pesquisa teve como objetivo uma análise técnica/financeira sobre a utilização deste material ao invés do cobre. Todo o estudo foi conduzido analisando-se projetos desenvolvidos através de uma rotina computacional específica para geração de projetos e busca dos resultados mais eficientes. Para isto são utilizados dados obtidos por meio de fabricantes e medições de carga do sistema de distribuição da AES Sul – Distribuidora Gaúcha de Energia. Os resultados apresentados possibilitam às concessionárias de energia diminuir suas perdas em áreas rurais, utilizando tecnologias de baixo custo.

## *Abstract*

The transformer is responsible for about 33.3% of total losses in the system in which it operates. These losses imply costs for power distribution utilities and final consumers. Thus, this work presents some solutions to improve of power distribution system, considering single phase transformers. These solutions are base on the initial cost, losses reduction and return of investment for the efficient transformers project. Transformers with reduced loading should have their designs focused no-load losses, since, for this condition, the load losses are very small. To achieve this proposal, well known technique, like utilization of amorphous core is analyzed, as though as a new proposal, based on the increase of percent impedance, is presented. Against the common sense, the percent impedance increase can result in a transformer with lower cost and lower no-load losses that, when used under conditions of low loading, can present lower total losses. To complete the research, designs with aluminum as conductor material were also developed. This study was developed by means of a computational routine used to generate different transformers projects, which are selected through an optimization. These projects are generated using data obtained from manufactures and from measurements in the AES Sul distribution network. The results indicate that it is possible for power distribution utilities to decrease their losses level in rural networks making use of low cost technologies.

# Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>I</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>V</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 – Princípio de Funcionamento</b> .....	<b>3</b>
2.1 – <i>Princípio de Funcionamento</i> .....	3
2.2 – <i>Perdas em Transformadores</i> .....	7
2.2.1 – Perdas em vazio.....	8
2.2.1.1 – Perdas por histerese.....	8
2.2.1.2 – Perdas por corrente de Foucault .....	9
2.2.2 – Perdas em carga .....	10
2.2.2.1 – Perdas por efeito joule.....	10
2.2.2.2 – Perdas por efeito de correntes parasitas nos enrolamentos... 10	
2.2.3 – Contribuição dos harmônicos nas perdas .....	11
2.3 – <i>Normatização Brasileira</i> .....	12
2.3.1 – Ensaio em vazio .....	13

2.3.2 – Ensaio em curto-circuito .....	14
<b>Capítulo 3 – Manufatura de Transformadores Monofásicos .....</b>	<b>15</b>
3.1 – Bobinas.....	15
3.1.1 – Enrolamento de Baixa Tensão .....	16
3.1.2 – Enrolamento de Alta Tensão .....	20
3.2 – Núcleo.....	22
3.3 – Tanque.....	26
3.4 – Ensaios.....	27
<b>Capítulo 4 – Cálculo dos Projetos: Criação, Simplificação e Melhoria das Rotinas .....</b>	<b>28</b>
4.1 – Rotinas de Cálculo.....	28
4.1.1 – Transformadores de Referência.....	29
4.1.2 – Variação dos Parâmetros.....	29
4.1.3 – Análise Financeira.....	32
4.1.4 – Otimização e Obtenção dos Transformadores Projetados.....	32
4.2 – Alterações nas Rotinas.....	33
4.3 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos de Transformadores Através da Metodologia da Impedância percentual .....	34
4.3.1 – Projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante.....	35
4.3.2 – Projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo.....	35
4.4 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos de Transformadores com Núcleo Amorfo.....	35
4.5 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos com Transformadores com Enrolamento de Cobre ou Alumínio.....	36
4.6 – Projetos Desenvolvidos para Exemplificar Utilização da Rotina .....	36

<b>Capítulo 5 – Novas Metodologias e Tecnologias para Projetos de Transformadores</b> .....	<b>50</b>
5.1 – <i>Impacto da Manipulação da Impedância Percentual nos Projetos</i> .....	50
5.1.1 – Banco de Dados Utilizado nesta Pesquisa.....	51
5.1.2 – Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais .....	53
5.1.3 – Aumento do Número de Camadas.....	54
5.2 – <i>Transformadores com Núcleo Amorfo</i> .....	54
5.2.1 – Metal Amorfo.....	56
5.2.2 – Comparação entre FeSi GO e ligas amorfas .....	56
5.2.3 – Ligas amorfas e suas aplicações em núcleos de Transformadores .....	61
5.3 – <i>Utilização do Cobre ou do Alumínio no Projeto</i> .....	62
<b>Capítulo 6 – Projetos de Transformadores: Resultados</b> .....	<b>64</b>
6.1 – <i>Projeto de Transformadores Monofásicos Manipulando-se a Impedância Percentual</i> .....	64
6.1.1 – Projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante.....	65
6.1.2 – Projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo.....	70
6.1.3 – Análise Financeira dos Transformadores Projetados.....	74
6.1.3.1 – Custos dos projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante.....	75
6.1.3.2 – Custos dos projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo .....	76
6.2 – <i>Projetos de Transformadores com Núcleo Amorfo</i> .....	77
6.2.1 – Comparação entre Projetos com a Tecnologia da Liga Amorfa e com a Metodologia da Impedância Percentual .....	79
6.2.2 – Análise Financeira dos Projetos Desenvolvidos.....	81

6.3 – Projetos com Cobre ou Alumínio .....	82
6.3.1 – Projeto de Transformador com Condutor de Alumínio .....	82
6.3.2 – Comparação Entre Projetos de Transformadores com Condutor de Alumínio e de Cobre .....	84
<b>Capítulo 7 – Considerações Finais .....</b>	<b>87</b>
<b>Contribuição Técnica.....</b>	<b>90</b>
<b>Trabalhos Futuros.....</b>	<b>94</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>95</b>
<b>Apêndice A.....</b>	<b>99</b>

## Lista de Símbolos

$AT$	Alta tensão.
$AWG$	<i>American Wire Gauge</i> .
$B$	Densidade de fluxo magnético.
$B_r$	Densidade de fluxo magnético remanescente.
$BT$	Baixa tensão.
$CCC$	Cúbica de corpo centrado
$e_1$	Tensão induzida no enrolamento primário [V].
$e_2$	Tensão induzida no enrolamento secundário [V].
$f.m.m.$	Força magnetomotriz.
$FE$	Fator de Energia Consumida.
$GO$	Grãos orientados.
$H$	Campo magnético.
$H_c$	Força coercitiva.
$i_1$	Valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento primário do transformador [A].
$i_2$	Valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento secundário do transformador [A].
$N_1$	Número de espiras do enrolamento primário.
$N_2$	Número de espiras do enrolamento secundário.
$TDMA$	Transformador de distribuição com núcleo de material amorfo.

$TRI$	Tempo de Retorno de Investimento.
$TSMP$	Tempo Suprindo Máxima Potência.
$U_1$	Tensão Eficaz aplicada nos terminais de enrolamento primário [V].
$U_2$	Tensão Eficaz aplicada nos terminais de enrolamento secundário [V].
$\phi_1$	Fluxo magnético devido à circulação de corrente no primário.
$\phi_2$	Fluxo magnético devido à circulação de corrente no secundário.

## *Lista de Figuras*

Figura 2.1 – Esquema de um circuito eletromagnético de um transformador monofásico [Moniz, 2007]. .....	4
Figura 2.2 – Parte ativa de um transformador monofásico.....	4
Figura 2.3 – Curva de histerese magnética [Rodrigues, 2011].....	9
Figura 3.1 – Vista superior da bobina de um transformador de distribuição. ...	16
Figura 3.2 – Condutor BT.....	17
Figura 3.3 – Bobina BT. ....	18
Figura 3.4 – Cabeceira BT. ....	19
Figura 3.5 – Canal de Óleo. ....	19
Figura 3.6 – Condutor AT.....	20
Figura 3.7 – Isolamento dos condutores AT.....	21
Figura 3.8 – Cabeceira AT. ....	21
Figura 3.9 – Isolamento entre camadas AT.....	22
Figura 3.10 – Núcleo amorfo.....	23
Figura 3.11 – Núcleo de aço-silício formado por lâminas.....	23
Figura 3.12 – Montagem do núcleo de aço-silício.....	24
Figura 3.13 – Parte ativa sendo finalizada. ....	24
Figura 3.14 – Culatra superior sendo montada. ....	25
Figura 3.15 – Placas de ferro sendo montadas.....	25

Figura 3.16 – Chapa de aço usada para confeccionar o tanque do transformador.....	26
Figura 3.17 – Tanque do transformador pronto para ser soldada a parte inferior. ....	27
Figura 5.1 – Gráfico da demanda em função do tempo para os transformadores da rede de concessão da empresa. ....	53
Figura 5.2 – Fita de metal amorfo [ALIBABA, 2011].....	56
Figura 5.3 – Lâminas de aço-silício.....	57
Figura 5.4 – Núcleo composto com lâminas de aço-silício.....	58
Figura 5.5 – Núcleo amorfo.....	59
Figura 5.6 – Estrutura cristalina do aço-silício [KENNEDY, 1998].....	59
Figura 5.7 – Estrutura não cristalina do metal amorfo [KENNEDY, 1998].....	59
Figura 5.8 – Curva de magnetização do metal amorfo e do aço-silício [KENNEDY, 1998].....	60
Figura 6.1– Modelo mostrando a criação dos projetos.....	71
Figura 6.2– Gráfico com preço diário do alumínio [KITCOMETALS, 2011].....	84
Figura 6.3– Gráfico com preço diário do cobre [KITCOMETALS, 2011]. ....	84

## *Lista de Tabelas*

Tabela 2.1 – Valores garantidos de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores monofásicos com tensões máximas de 15 kV. ....	12
Tabela 2.2 – Valores garantidos de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores monofásicos com tensões máximas de 24,2 kV. ....	13
Tabela 4.1 – Rotinas e parâmetros alterados.....	30
Tabela 4.2 – Quadro resumo comparativo entre os valores de referência e os valores da NBR. ....	37
Tabela 4.3 – Tolerâncias segundo a NBR [ABNT, 1993]. ....	38
Tabela 4.4 – Quantidade de projetos desenvolvidos por cada grupo/rotina.....	39
Tabela 4.5 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 5 kVA/ 15 kV. ....	40
Tabela 4.6 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 5 kVA/ 25 kV. ....	40
Tabela 4.7 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 10 kVA/ 15 kV. ....	41
Tabela 4.8 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 10 kVA/ 25 kV. ....	41
Tabela 4.9 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 15 kVA/ 15 kV. ....	42
Tabela 4.10 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 15 kVA/ 25 kV. ....	42

Tabela 4.11 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 5 kVA/ 15 kV. ....	43
Tabela 4.12 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 5 kVA/ 25 kV. ....	44
Tabela 4.13 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 10 kVA/ 15 kV. ....	44
Tabela 4.14 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 10 kVA/ 25 kV. ....	45
Tabela 4.15 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 15 kVA/ 15 kV. ....	45
Tabela 4.16 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 15 kVA/ 25 kV. ....	46
Tabela 4.17 – Projeto selecionado para transformador de 5 kVA/ 15 kV. ....	47
Tabela 4.18 – Projeto selecionado para transformador de 5 kVA/ 25 kV. ....	47
Tabela 4.19 – Projeto selecionado para transformador de 10 kVA/ 15 kV. ....	47
Tabela 4.20 – Projeto selecionado para transformador de 10 kVA/ 25 kV. ....	48
Tabela 4.21 – Projeto selecionado para transformador de 15 kVA/ 15 kV. ....	48
Tabela 4.22 – Projeto selecionado para transformador de 15 kVA/ 25 kV. ....	49
Tabela 6.1 – Projetos desenvolvidos com duas camadas na BT. ....	66
Tabela 6.2 – Projetos desenvolvidos com três camadas na BT. ....	67
Tabela 6.3 – Comparação entre os projetos desenvolvidos considerando a quantidade de camadas na BT. ....	68
Tabela 6.4 – Projetos com a seção do núcleo constante (Espiras, perdas no núcleo, indução, resistência e impedância percentual). ....	69
Tabela 6.5 – Projetos com a seção do núcleo constante (Massa de cobre, massa de aço-silício e impedância percentual). ....	70

Tabela 6.6 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Perdas no cobre e no núcleo, impedância percentual, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).....	72
Tabela 6.7 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Espiras, perdas no núcleo, indução, resistência e seção do núcleo).....	73
Tabela 6.8 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Massa de cobre, massa de aço-silício, impedância, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).....	74
Tabela 6.9 – Custos de manufatura e total dos projetos desenvolvidos com a seção do núcleo constante.....	75
Tabela 6.10 – Custos de manufatura e total dos projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo. ....	76
Tabela 6.11 – Projetos de transformadores para a potência de 10 kVA e classe de isolamento de 15 kV.....	78
Tabela 6.12 – Influência da impedância percentual no peso do cobre e do núcleo.....	78
Tabela 6.13 – Transformadores desenvolvidos para a potência de 10 kVA e classe de isolamento de 15 kV.....	79
Tabela 6.14 – Detalhes dos projetos.....	80
Tabela 6.15 – Custo de manufatura e custo total dos projetos: Núcleo de aço-silício e núcleo amorfo.....	81
Tabela 6.16 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Perdas no condutor e no núcleo, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).....	83
Tabela 6.17 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Espiras, resistência, impedância e indução).....	83
Tabela 6.18 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Massa do condutor, massa de aço-silício, preço de manufatura e custo total).....	83

Tabela 6.19 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Perdas no condutor, perdas no núcleo, seção do núcleo e quantidades de camadas).....	85
Tabela 6.20 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Espiras, resistência, impedância e indução).....	85
Tabela 6.21 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Massa do condutor, massa de aço-silício, preço de manufatura e custo total).....	86

# Capítulo 1 – Introdução

O transformador é o principal equipamento em um sistema elétrico de potência, pois tem a função de elevar ou reduzir o nível de tensão, viabilizando a transmissão e o fornecimento de energia elétrica. A operação do transformador é acompanhada por diversas perdas que acarretam custos na operação das redes de distribuição e, conseqüentemente, aos consumidores. Visando a efficientização do sistema elétrico, os projetistas procuram melhorar o desempenho do transformador tendo em vista a redução de suas perdas. Alternativas para aumento da eficiência destes equipamentos normalmente resultam em elevação do custo de manufatura dos mesmos, em contrapartida, reduz-se o custo operacional do sistema. O custo de manufatura é elevado, devido a utilização de materiais com maior nível de qualidade, ou em maior quantidade. Assim, o projetista tem a missão de apresentar projetos que apresentem uma boa relação custo/benefício, ou seja, sejam economicamente viáveis para as empresas interessadas.

Dentro do contexto de custos e eficiência, este estudo contempla o desenvolvimento de projetos de transformadores de distribuição monofásicos, visando a efficientização das perdas em vazio, verificando também os custos e o retorno financeiro destes projetos.

O estudo foi realizado baseado em um banco de dados da AES Sul Distribuidora de Energia S.A., considerando transformadores localizados na zona rural. Nesta região os transformadores operam com baixa demanda, trabalhando a maior parte do ciclo diário em baixa carga e, conseqüentemente, apresentando perdas predominantemente em vazio. Assim, o foco deste

trabalho é o projeto de transformadores visando a redução das perdas em vazio.

Os capítulos a seguir descrevem o trabalho desenvolvido.

O Capítulo 2 aborda os conceitos básicos do funcionamento dos transformadores.

O Capítulo 3 descreve os aspectos construtivos, referentes à manufatura destes equipamentos.

O Capítulo 4 descreve a rotina utilizada para o desenvolvimento dos projetos, como também as alterações, melhorias e simplificações na versão inicial desta rotina.

O Capítulo 5 mostra as soluções empregadas. Inicialmente tem-se a metodologia da impedância percentual, onde com seu incremento, pode-se conseguir a redução das perdas em vazio. Também serão analisados projetos com a tecnologia de metal amorfo, onde transformadores com este metal em seu núcleo, apresentam perdas em vazio reduzidas. Analisou-se também a utilização de cobre e alumínio em projetos de transformadores, verificando as perdas em carga, como também o custo dos projetos.

O Capítulo 6 mostra os projetos desenvolvidos segundo os métodos descritos no Capítulo 5.

O Capítulo 7 aborda as considerações finais deste trabalho realizado.

# Capítulo 2 – Princípio de Funcionamento

## 2.1 – Princípio de Funcionamento

O funcionamento do transformador baseia-se no acoplamento eletromagnético entre duas ou mais bobinas, através de um circuito magnético que pode ser o ar ou um material ferro-magnético para aumentar o acoplamento [RIES, 2007]. No desenvolvido nesta dissertação, utilizou-se apenas de transformadores com material ferro-magnético para realizar o acoplamento.

O transformador é constituído basicamente por um núcleo ferro-magnético e por um conjunto de bobinas compostas de material condutor, sendo utilizado atualmente cobre e/ou alumínio. O princípio de funcionamento é fundamentado nas leis que regem os circuitos magnéticos mutuamente acoplados, onde a principal função é estabelecer um acoplamento de circuitos com tensões diferentes [PICANÇO, 2006]. Na Figura 2.1 pode-se ver o diagrama de um transformador monofásico e na Figura 2.2 têm-se a parte ativa (circuito eletromagnético) de um transformador monofásico.

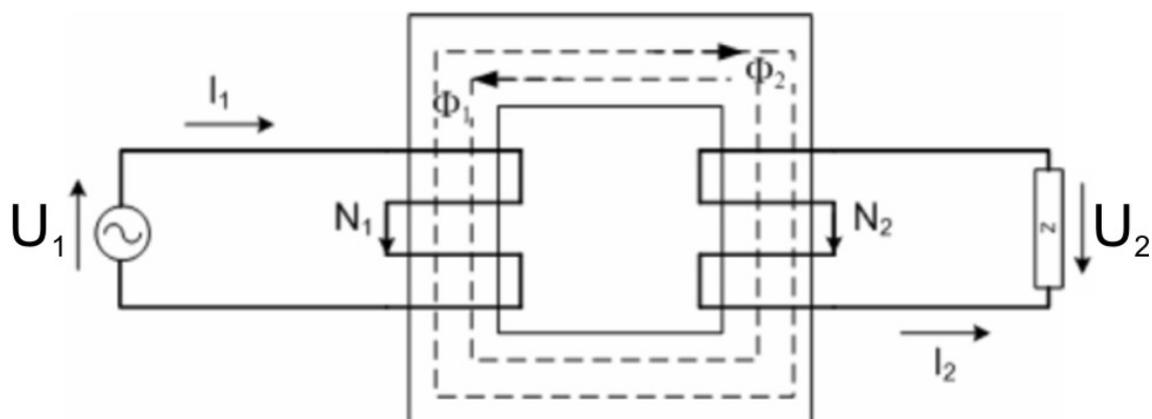


Figura 2.1 – Esquema de um circuito eletromagnético de um transformador monofásico [Moniz, 2007].



Figura 2.2 – Parte ativa de um transformador monofásico.

As correntes que percorrem as bobinas primária e secundária são denominadas  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente. Estas correntes desenvolvem uma força magnetomotriz,  $f.m.m$ , denominada  $i_1 \cdot N_1$  e  $i_2 \cdot N_2$ , onde  $N_1$  e  $N_2$  correspondem ao número de espiras do primário e do secundário, respectivamente. A força magnetomotriz é responsável por estabelecer a intensidade do campo

magnético, denominado  $H$ , como também pelo aparecimento da densidade de fluxo magnético,  $B$ . Assim, a densidade de fluxo magnético na área da coluna e da culatra, implica no aparecimento do fluxo magnético [PICANÇO, 2006].

Aplicando-se uma tensão alternada  $U_1$  nos terminais do enrolamento primário do transformador, têm-se a circulação de uma corrente alternada  $i_1$ . Isto acarreta na magnetização alternada do núcleo, formando uma fonte de fluxo alternado,  $\phi_1$ . Por meio da variação deste fluxo através do enrolamento primário, têm-se o surgimento de uma força eletromotriz também alternada,  $e_1$ , no enrolamento em questão. Ao se considerar um transformador ideal, ou seja, transformador sem perdas, têm-se que a tensão aplicada nos terminais do enrolamento primário é igual à força eletromotriz induzida neste enrolamento. O aparecimento da força eletromotriz alternada,  $e_2$ , se dá através da variação do fluxo magnético,  $\phi_1$ , no enrolamento secundário. Para o caso do transformador ideal, a tensão aplicada ao enrolamento primário relaciona-se com a tensão nos terminais do secundário pela relação do número de espiras dos respectivos enrolamentos, através da Equação (2.1) [MONIZ, 2007].

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Onde:

$U_1$ , Tensão eficaz aplicada nos terminais do enrolamento primário, [V];

$U_2$ , Tensão eficaz aplicada nos terminais do enrolamento secundário, [V];

$N_1$ , Número de espiras do enrolamento primário;

$N_2$ , Número de espiras do enrolamento secundário.

A força eletromotriz induzida no primário, provocada pela variação do fluxo magnético neste enrolamento, também se relaciona com a força eletromotriz induzida no enrolamento secundário pela relação do número de espiras dos respectivos enrolamentos, segundo Equação (2.2).

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

Onde:

$e_1$ , Tensão induzida no enrolamento primário, [V];

$e_2$ , Tensão induzida no enrolamento secundário, [V].

A relação de transformação pode ser definida pelas Equações (2.1) e (2.2). Através destas equações, têm-se as relações utilizadas para determinar a tensão nos terminais do enrolamento secundário e sua força eletromotriz ao aplicar uma tensão no enrolamento primário, conforme Equações (2.3) e (2.4) [MONIZ, 2007].

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \times U_1 \quad (2.3)$$

$$e_2 = \frac{N_2}{N_1} \times e_1 \quad (2.4)$$

A tensão eficaz aplicada nos terminais do enrolamento primário faz com que surja a corrente  $i_1$  neste enrolamento, produzindo o fluxo magnético,  $\phi_1$ , alternado, que induz no enrolamento secundário uma força eletromotriz,  $e_2$ . A força eletromotriz,  $e_2$ , faz com que circule, no caso de uma carga conectada ao

secundário do transformador, uma corrente  $i_2$ , a qual implica no aparecimento do fluxo magnético,  $\phi_2$ , no secundário, se opondo ao fluxo,  $\phi_1$ , reduzindo-o. Esta redução é compensada por um fluxo de compensação originado pela passagem de  $\phi_2$  através do enrolamento primário [MONIZ, 2007].

As correntes nos dois enrolamentos se relacionam com o número de espiras do enrolamento segundo a Equação (2.5).

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Onde:

$i_1$ , é o valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento primário do transformador, [A];

$i_2$ , é o valor eficaz da intensidade de corrente no enrolamento secundário do transformador, [A].

## 2.2 – Perdas em Transformadores

Os transformadores são equipamentos que apresentam perdas, isto quer dizer, que parte da potência de entrada é absorvida pelo circuito eletromagnético, ou seja, pelos enrolamentos primários e secundários e pelo núcleo. Nos próximos itens, serão abordadas as perdas em carga e as perdas em vazio que surgem nos transformadores em operação.

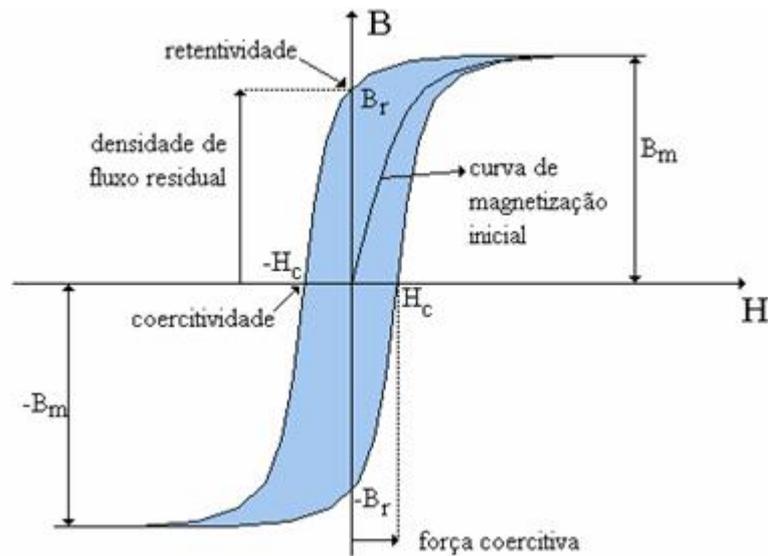
## 2.2.1 – Perdas em vazio

As perdas em vazio, como o próprio nome sugere, podem ser analisadas quando o transformador está operando sem carga, ou seja, dito em vazio. Estas perdas são ocasionadas pela corrente de magnetização responsável pelo estabelecimento do fluxo magnético. As perdas que surgem no núcleo são devido à histerese e correntes de *Foucault* (conhecida também como perdas por corrente parasitas nas lâminas do núcleo) [PICANÇO, 2006].

### 2.2.1.1 – Perdas por histerese

Ao aplicar-se um campo magnético em um material ferromagnético, elevando-o até a saturação do material, reduzindo-o em seguida, têm-se que a densidade de fluxo magnético não se reduz tão rápido quanto o campo magnético. Ao eliminar-se o campo magnético, uma densidade de fluxo, persiste. Esta densidade é chamada de densidade de fluxo magnético remanescente,  $B_r$ . Para que a densidade de fluxo seja eliminada, faz-se necessário aplicar um campo magnético negativo. Este campo chama-se de força coercitiva,  $H_c$ . Caso o material ferromagnético seja continuamente magnetizado com este campo magnético negativo, o material será magnetizado com polaridade oposta. Enquanto não houver a saturação do material ferromagnético, a sua magnetização será alcançada facilmente. Partindo-se da magnetização negativa, ao reduzi-la, haverá novamente uma densidade de fluxo magnético remanescente,  $-B_r$ , e para eliminar a densidade, é necessário aplicar uma força coercitiva positiva. Ao aumentar-se novamente o campo magnético, o material ficará novamente saturado, com a polaridade inicial.

Esse fenômeno que causa o atraso entre densidade de fluxo e campo magnético é chamado de histerese magnética, enquanto que o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de ciclo de histerese, ver Figura 2.3. A área observada no interior do ciclo de histerese corresponde à energia necessária ao processo de magnetização e desmagnetização do núcleo, resultando em perdas.



**Figura 2.3 – Curva de histerese magnética [Rodrigues, 2011].**

### 2.2.1.2 – Perdas por corrente de Foucault

Corrente de Foucault, também chamada de corrente parasita, é o nome dado à corrente induzida em um condutor quando o fluxo magnético alterna através de uma amostra de material condutor. As correntes de Foucault podem produzir consequências indesejáveis, como perdas por efeito Joule, devido a temperatura do material ter aumentado. Desta maneira, os materiais sujeitos a campos magnéticos alternados são construídos com placas muito pequenas e isoladas uma a uma para reduzir a resistência ôhmica, para assim, evitar a dissipação por efeito Joule.

## 2.2.2 – Perdas em carga

Uma corrente alternada circulando nos enrolamentos causa aquecimento, gerando perdas pelo chamado efeito Joule. As perdas adicionais por correntes parasitas no transformador são devidas aos fluxos magnéticos dispersos nos enrolamentos, paredes do tanque, núcleo, e outras partes estruturais. Desta maneira, estas perdas são divididas em: perda adicional por correntes parasitas nos enrolamentos e perda adicional por correntes parasitas em outras partes estruturais do transformador que não sejam enrolamentos [MONIZ, 2007].

### 2.2.2.1 – Perdas por efeito joule

As perdas por efeito Joule são atribuídas à corrente eficaz, sendo determinadas com a aplicação de corrente contínua, tendendo a aumentar com a elevação da temperatura [PICANÇO, 2006]. Esta perda é diretamente proporcional ao quadrado da corrente que atravessa o enrolamento e diretamente proporcional a sua resistência [MONIZ, 2007].

### 2.2.2.2 – Perdas por efeito de correntes parasitas nos enrolamentos

Uma corrente alternada, ao percorrer os enrolamentos, primário e secundário, provoca um campo eletromagnético alternado, atravessando cada condutor destes enrolamentos, e cuja intensidade é diretamente proporcional à magnitude dessa corrente. Desta maneira, cada condutor imerso no fluxo magnético é submetido a uma tensão induzida responsável pelo fluxo de

corrente parasita e, logo, pela perda por efeito desta corrente no enrolamento do transformador ocasionando uma elevação de temperatura adicional aos enrolamentos [MONIZ, 2007].

### 2.2.3 – Contribuição dos harmônicos nas perdas

“O efeito harmônico nas perdas em vazio de um transformador é pequeno e tem pouca influência na sua operação, não sendo, portanto considerado na determinação do fator-k e do fator de perdas harmônicas, da norma IEEE Standard C57.110-1998 (IEEE, 1998)” [PICANÇO, 2006].

Este fator, amplamente utilizado por projetistas de transformadores, é utilizado para se calcular a elevação de aquecimento em um transformador devido à circulação de correntes harmônicas e, com isso, calcular a diminuição do carregamento nominal necessário para evitar a diminuição de sua vida útil [Nunes, 2007].

O fator de perdas harmônicas é um outro fator também utilizado para se quantificar a diminuição do carregamento de um transformador na presença de harmônicos, que representa o aquecimento efetivo gerado no transformador como resultado de uma determinada corrente harmônica. A principal diferença entre o fator-k e o fator de perdas harmônicas está ligada ao fato de que o fator-k depende tanto da magnitude quanto da distribuição dos harmônicos da corrente, enquanto o fator de perdas harmônicas é apenas dependente da distribuição dos harmônicos [Nunes, 2007].

Sob carga, o carregamento do transformador define a influência dos harmônicos nas perdas, pois o efeito do aumento da corrente de carga devido às componentes harmônicas faz com que a parcela  $I^2R$  de perdas, sofra um acréscimo [PICANÇO, 2006].

Em se tratando do local da instalação do transformador, vale ressaltar, que no meio rural o efeito dos harmônicos deva ser menor que no meio urbano,

devido a menor presença de indústrias operando com inversores, fontes chaveadas (computadores), fornos a arco, etc.

## 2.3 – Normatização Brasileira

A normatização das perdas no Brasil é realizada através da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT [ABNT, 1999]. A norma NBR 5440 estabelece a padronização das características elétricas e mecânicas dos transformadores utilizados em redes de distribuição aéreas. As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram os limites pela NBR 5440 para transformadores monofásicos para as classes de isolamento, 15 e 24,2 kV.

**Tabela 2.1 – Valores garantidos de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores monofásicos com tensões máximas de 15 kV.**

Potência do transformador (kVA)	Corrente de excitação (%)	Perdas em vazio (W)	Perda Total (W)	Impedância Percentual (%)
3	4,9	40	115	2,5
5	4,0	50	160	
10	3,3	60	260	
15	3	85	355	
25	2,7	120	520	
37,5	2,4	160	700	
50	2,2	190	830	
75	2,0	230	1160	
100	1,9	280	1500	

Este trabalho incentivou a mudança do valor da impedância percentual na norma NBR 5440, alterando de 2,5% para 3,0% para os transformadores de 5, 10 e 15 kVA, para 15 e 24,2 kV. Esta mudança foi aprovada através de

reunião no dia 30/11/2009 onde foi divulgada uma tabela com as perdas consolidadas. Na semana seguinte foi publicada uma ATA com as mudanças propostas. Estas mudanças da impedância percentual foram desprezadas por motivos não expostos, resultando na continuidade dos valores propostos pela NBR 5440, do ano de 1999. Porém, atualmente uma proposta de errata está sendo elaborada pela comissão técnica, responsável pela revisão da norma, de modo a retomar a mudança proposta para 3% no valor da impedância percentual.

**Tabela 2.2 – Valores garantidos de perdas, correntes de excitação e tensões de curto-circuito para transformadores monofásicos com tensões máximas de 24,2 kV.**

Potência do transformador (kVA)	Corrente de excitação (%)	Perdas em vazio (W)	Perda Total (W)	Impedância Percentual (%)
3	5,7	40	115	2,5
5	4,8	50	170	
10	4,0	70	285	
15	3,6	90	395	
25	3,1	130	580	
37,5	2,9	170	775	
50	2,7	220	975	
75	2,1	250	1260	
100	1,5	300	1550	

### 2.3.1 – Ensaio em vazio

O ensaio em vazio tem como objetivo definir as perdas em vazio, ou seja, as perdas no núcleo de um transformador. Estas perdas devem ser referidas à tensão senoidal pura, e devem ser medidas com tensão nominal na derivação principal, ou quando medida numa outra derivação, com respectiva tensão de derivação. As medições devem ser realizadas na frequência nominal, vide [ABNT, 1993].

O ensaio em vazio determina a magnitude da corrente de excitação e as perdas no ramo magnetizante do circuito equivalente do transformador. Tais perdas consistem nas perdas por histerese e nas perdas por corrente parasita.

### **2.3.2 – Ensaio em curto-circuito**

O ensaio em curto-circuito determina os parâmetros das perdas sob carga dos transformadores. Desta maneira, o ensaio de curto-circuito apresenta as perdas por efeito Joule nos enrolamentos e as perdas adicionais que estão relacionadas com a transformação da corrente.

# Capítulo 3 – Manufatura de Transformadores Monofásicos

Este capítulo apresenta os fundamentos básicos adotados para a manufatura dos projetos de transformadores de distribuição, no caso estudado, monofásicos. Para este estudo, foi projetada apenas a parte ativa, bobinas e núcleo, portanto, serão mostrados apenas as características da parte ativa.

## 3.1 – Bobinas

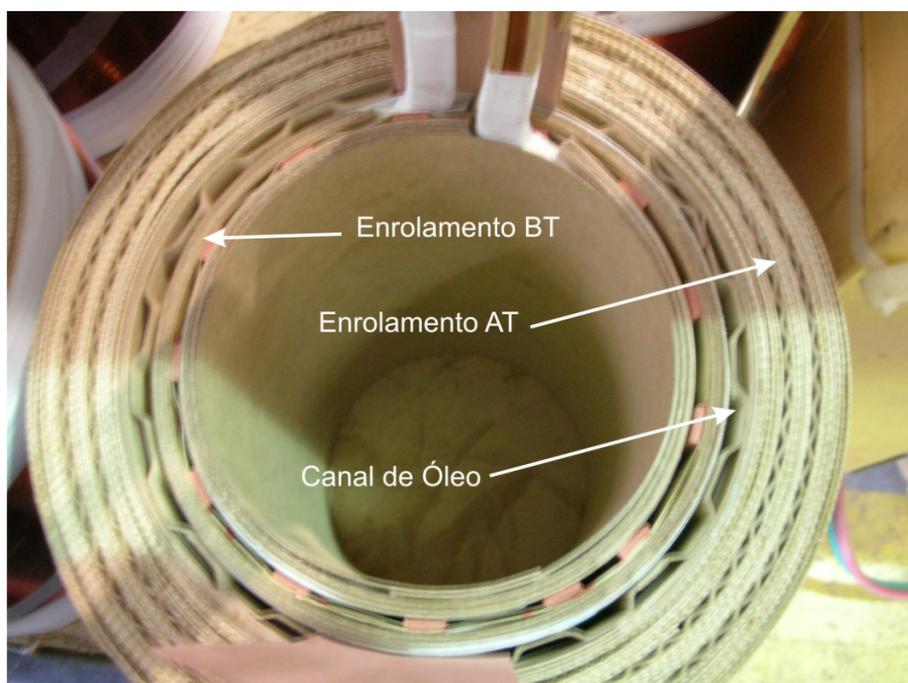
Os transformadores podem possuir até três enrolamentos: primário, secundário e terciário. Porém, para o estudo desenvolvido, foram considerados apenas transformadores com primário e secundário, que são os transformadores de distribuição monofásicos.

Ao circular uma corrente alternada nos enrolamentos de uma bobina, no caso a bobina de alta tensão (AT), um campo magnético alternado é criado, por causa do movimento das cargas, devido à diferença de potencial aplicada aos terminais desta bobina. O condutor fica situado dentro desse campo magnético produzido pela sua própria corrente. Com campo magnético alternado, têm-se um fluxo magnético, surgindo a densidade de fluxo magnética. Assim, em meio a este campo magnético, uma corrente é induzida na bobina de baixa tensão

(BT), resultando em um fluxo de potência nos terminais desta bobina caso uma carga seja conectada.

A bobina é constituída por um tubo de papelão, onde são enrolados os condutores BT e AT. A bobina é presa na coluna do núcleo, para assim criar o circuito eletromagnético.

As bobinas de baixa tensão (BT) e de alta tensão (AT) são concêntricas, ver Figura 3.1, separadas por um canal de óleo, feito de papel kraft.



**Figura 3.1 – Vista superior da bobina de um transformador de distribuição.**

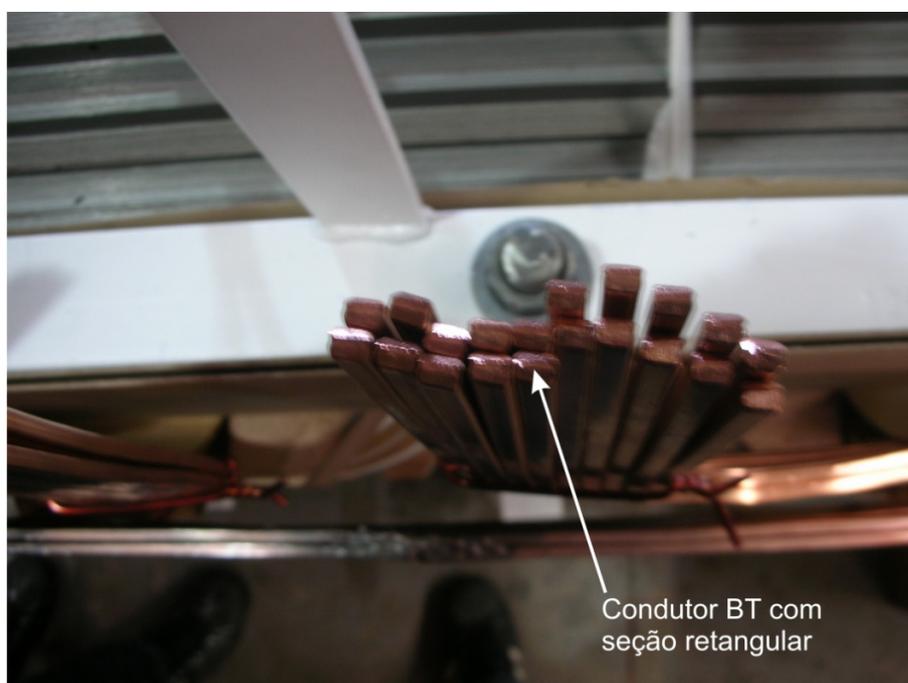
### **3.1.1 – Enrolamento de Baixa Tensão**

Os enrolamentos, tanto BT quanto AT, têm a função de propiciar o caminho para as correntes injetadas e induzidas, ou seja, através do enrolamento AT, circulará a corrente injetada, surgindo assim, um campo

magnético que induz uma corrente no enrolamento BT. Como resultado, surge um fluxo de potência, passando do enrolamento AT, para o enrolamento BT, considerando as perdas nos condutores e no núcleo.

Os enrolamentos são constituídos por espiras, onde estas espiras estão em torno do tubo de papelão. Os enrolamentos possuem diversas espiras, onde o enrolamento BT possui uma quantidade menor de espiras que o enrolamento AT. Esta relação de espiras entre os enrolamentos BT e AT é o que vai definir a relação de transformação de tensão do transformador. O enrolamento AT possui maior quantidade de espiras, porque possui maior tensão, assim o mesmo raciocínio se aplica para o enrolamento BT.

O enrolamento BT pode ser constituído por condutor de cobre ou alumínio, dependendo apenas da necessidade da empresa interessada ou da relação custo/benefício dos projetos com estes dois tipos de materiais. O condutor BT possui geralmente seção retangular ver Figura 3.2, as espiras são isoladas por papel kraft, ver Figura 3.3. Algumas espiras não possuem isolamento com papel, por motivos econômicos.



**Figura 3.2 – Condutor BT.**



**Figura 3.3 – Bobina BT.**

Nas extremidades, inferior e superior da bobina, existem fitas de papel, chamadas de cabeceiras, para isolamento entre a bobina BT e núcleo, e bobina BT e bobina AT, ver Figura 3.4.

As camadas do enrolamento BT são separadas uma camada de papel para criar o isolamento necessário. Depois de concluída a confecção do enrolamento BT, o canal de óleo é inserido para se obter o isolamento entre os enrolamentos BT e AT, ver Figura 3.5.



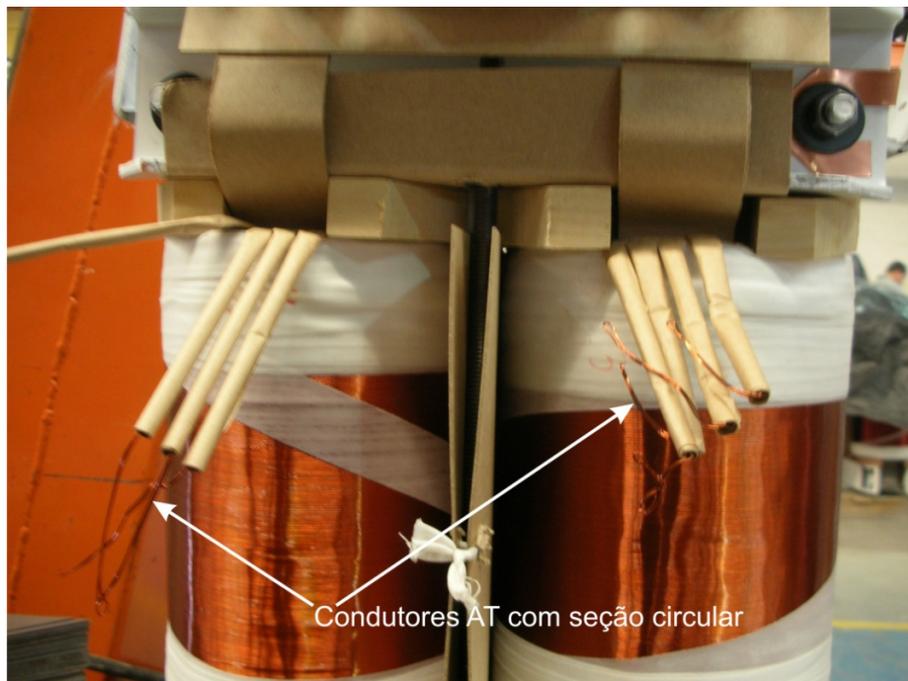
**Figura 3.4 – Cabeceira BT.**



**Figura 3.5 – Canal de Óleo.**

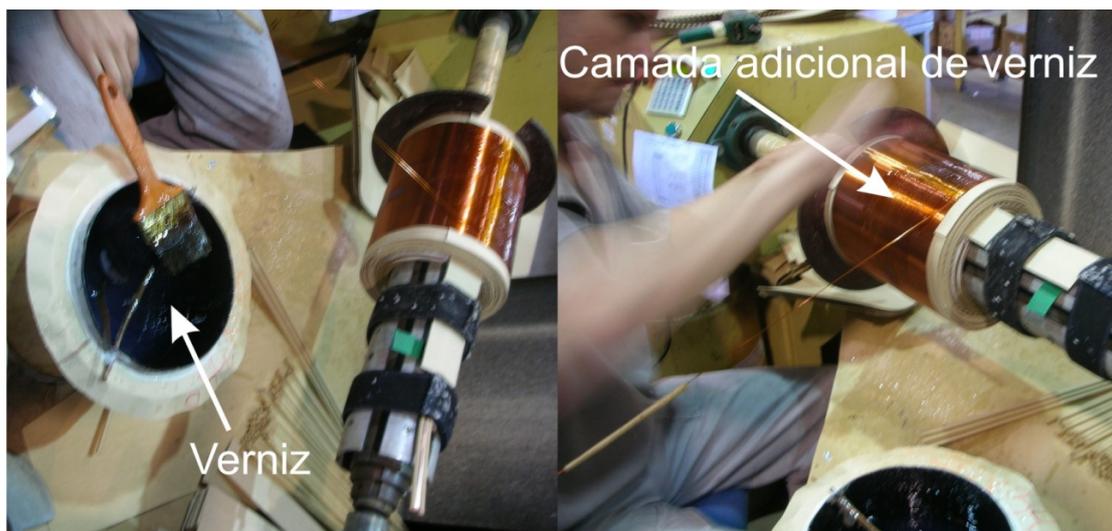
### 3.1.2 – Enrolamento de Alta Tensão

O enrolamento AT, assim como o enrolamento BT, também pode ser constituído por condutor de cobre ou alumínio, dependendo apenas da necessidade do comprador ou da relação custo/benefício dos projetos com estes dois tipos de materiais. O condutor AT possui geralmente seção circular, onde a bitola, ou seja, a área da seção circular é geralmente indicada pela *American Wire Gauge (AWG)*, ver Figura 3.6. Os condutores AT são isolados por verniz, o qual pode ser visto na Figura 3.7, como também uma camada protetora adicional de verniz para isolamento de camadas.



**Figura 3.6 – Condutor AT.**

Assim como na bobina BT, nas extremidades, inferior e superior da bobina, existem as cabeceiras, para isolamento entre a bobina AT e núcleo, e entre bobina BT e bobina AT, ver Figura 3.8.



**Figura 3.7 – Isolamento dos condutores AT.**

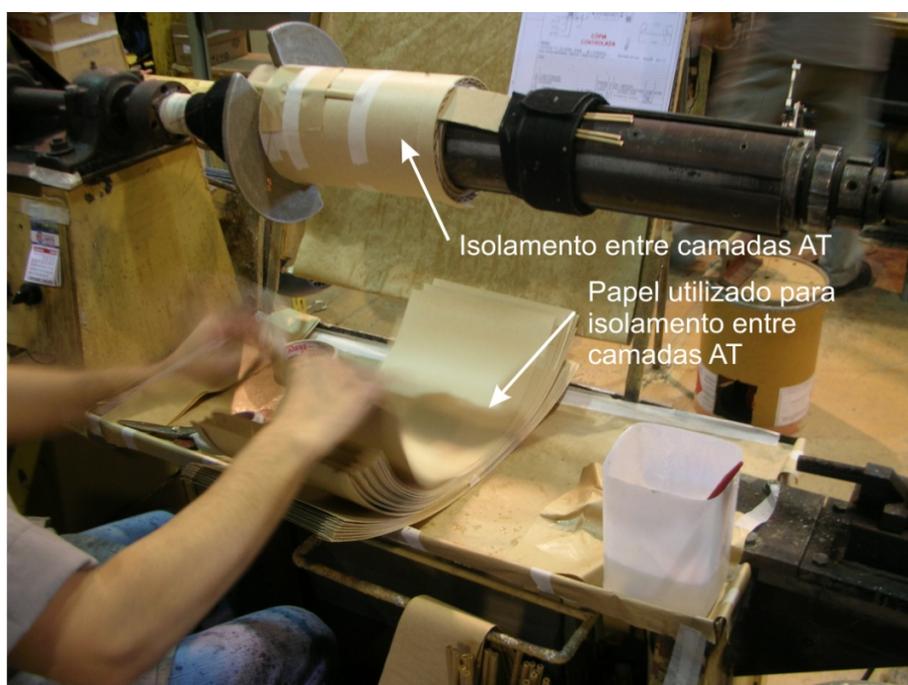


**Figura 3.8 – Cabeceira AT.**

As camadas do enrolamento AT são separadas por uma camada de papel para criar o isolamento necessário, como é feito para o enrolamento BT, ver Figura 3.9.

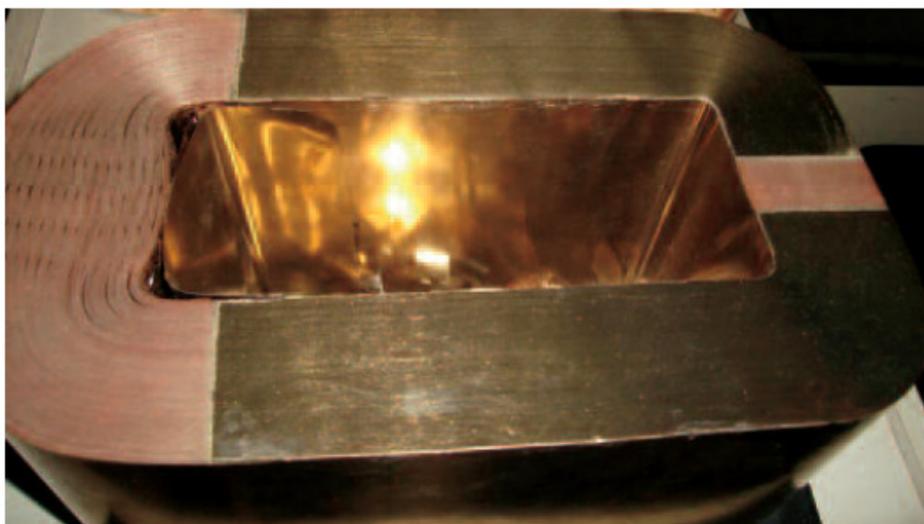
## 3.2 – Núcleo

O núcleo pode ser formado por liga amorfa ou por aço-silício. O núcleo formado por metal amorfo é constituído por uma fita longa e enrolada continuamente [LUCIANO, BATISTA, FREIRE, DE CASTRO e CAMACHO, 2009], ver Figura 3.10. Essa fita apresenta largura média de 30 mm, sendo muito maleável.



**Figura 3.9 – Isolamento entre camadas AT.**

O núcleo constituído por aço-silício é formado por lâminas, como mostrado na Figura 3.11. Estas lâminas são sobrepostas e montadas em um molde, como se pode ver na Figura 3.12.



**Figura 3.10 – Núcleo amorfo.**



**Figura 3.11 – Núcleo de aço-silício formado por lâminas.**

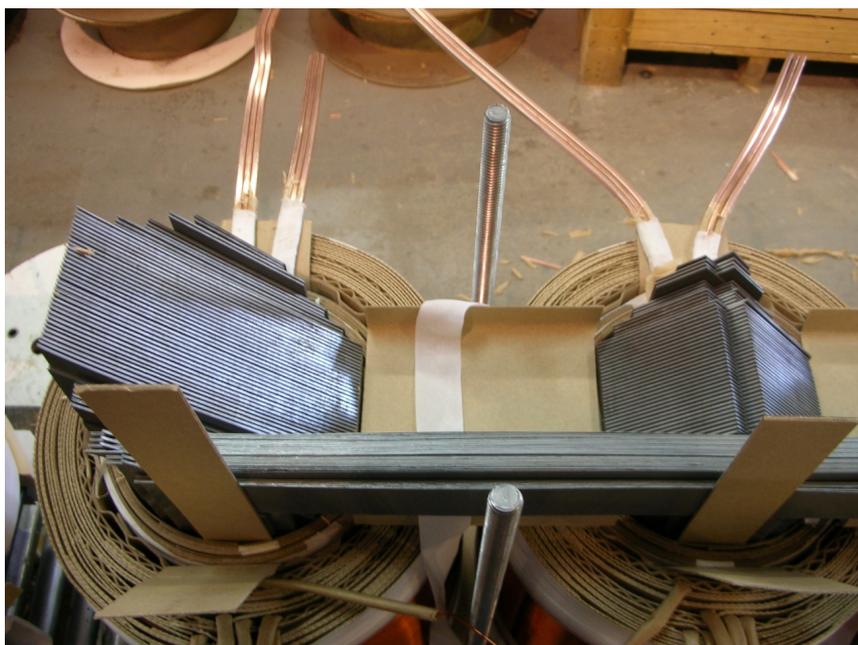


**Figura 3.12 – Montagem do núcleo de aço-silício.**

Após o núcleo de aço-silício ser montado, as bobinas BT e AT são inseridas nas colunas (Figura 3.13), a culatra superior é montada (Figura 3.14), e por fim, são inseridas as placas de aço para fixação do núcleo (Figura 3.15).



**Figura 3.13 – Parte ativa sendo finalizada.**



**Figura 3.14 – Culatra superior sendo montada.**



**Figura 3.15 – Placas de ferro sendo montadas.**

### 3.3 – Tanque

O tanque é constituído por uma chapa de aço (Figura 3.16). Esta chapa é moldada através de uma máquina e soldada, dando forma ao tanque (Figura 3.17). Após esta etapa, é soldada a parte inferior do tanque, para assim o mesmo ser pintado com tintas especiais. Logo em seguida, tendo finalizado o tanque, a parte ativa é montada no mesmo, onde depois é inserido óleo isolante e finalmente o tanque é lacrado.



**Figura 3.16 – Chapa de aço usada para confeccionar o tanque do transformador.**



**Figura 3.17 – Tanque do transformador pronto para ser soldada a parte inferior.**

### **3.4 – Ensaaios**

Após a montagem, cada unidade de transformador passa por ensaios de rotina, de modo a avaliar parâmetros como impedância percentual, perdas em vazio e em carga, resistência elétrica dos enrolamentos, relação de tensões, resistência do isolamento, polaridade, deslocamento angular e sequência de fases e corrente de excitação.

# Capítulo 4 – Cálculo dos Projetos: Criação, Simplificação e Melhoria das Rotinas

## 4.1 – Rotinas de Cálculo

Para o projeto de transformadores eficientes, foi utilizado um software de cálculo que, partindo de um projeto padrão conforme perdas propostas pela NBR 5440, promove alterações em seus parâmetros construtivos. Estas alterações visam modificar a estrutura de transformador dado como referência, buscando projetos que apresentem menores perdas e retorno financeiro viável.

O software desenvolvido utiliza cinco rotinas que se baseiam na alteração de parâmetros básicos do transformador. Em cada rotina existem dois grupos de projetos, onde cada grupo considera até onze projetos. Desta maneira, cada rotina pode produzir até vinte e dois projetos de transformadores eficientes baseados nos transformadores de referência [PICANÇO, 2009]. As rotinas foram desenvolvidas em ambiente MATLAB<sup>®</sup>. Cada grupo de cada rotina calcula um determinado tipo de projeto, seguindo a variação de três parâmetros.

Após a criação dos projetos, a rotina realiza uma análise financeira visando estimar o custo deste equipamento.

A seleção dos transformadores projetados é realizada através de uma otimização. Para esta otimização, utiliza-se alguns parâmetros do transformador de referência<sup>1</sup> e o Tempo de Retorno do Investimento (TRI) como restrições.

#### **4.1.1 – Transformadores de Referência**

Os transformadores eficientes foram projetados a partir de transformadores de referência. O objetivo da criação dos transformadores de referência foi o desenvolvimento de transformadores que pudessem ser utilizados como base para a variação de seus parâmetros para a obtenção dos projetos. Eles são obtidos de acordo com os limites de perdas, corrente de excitação e impedância percentual impostos pela norma NBR 5440 [ABNT, 1999]. Desta maneira, os mesmos possuem características padrão com limites próximos dos limites dos normalizados.

#### **4.1.2 – Variação dos Parâmetros**

Para a obtenção dos transformadores eficientes, utilizam-se cinco rotinas, cada uma apresentando dois grupos de projetos. Em cada grupo são variados três parâmetros do transformador de referência. Os parâmetros envolvidos neste processo são os seguintes:

1. Largura do condutor BT;

---

<sup>1</sup>Restrições físicas: perdas em vazio, perdas totais, corrente de excitação e impedância percentual. Restrição econômica: custo total.

2. Espessura do condutor BT;
3. Diâmetro do condutor AT,
4. Indução Magnética;
5. Distância Entre Enrolamentos AT e BT;
6. Espessura da Isolação do Condutor BT;
7. Altura da Cabeceira BT;
8. Altura do Calço.

A variação de cada parâmetros estava compreendida entre  $\pm 50\%$ , com passos de 10%, do valor de referência. Com estas variações são obtidos os transformadores eficientes. Na Tabela 4.1 têm-se os parâmetros escolhidos para o desenvolvimento dos projetos.

**Tabela 4.1 – Rotinas e parâmetros alterados.**

Rotina 1	Grupo 1	Largura do Condutor BT
		Espessura da Isolação do Condutor BT
		Indução Magnética
	Grupo 2	Espessura do Condutor BT
		Distância Entre Enrolamentos AT e BT
		Altura da Cabeceira BT
Rotina 2	Grupo 1	Espessura do Condutor BT
		Diâmetro do Condutor AT
		Indução Magnética
	Grupo 2	Diâmetro do Condutor AT
		Espessura da Isolação do Condutor BT
		Indução Magnética

**Tabela 4.1 – Rotinas e parâmetros alterados (Continuação).**

Rotina 3	Grupo 1	Espessura do Condutor BT
		Espessura da Isolação do Condutor BT
		Altura do Calço
	Grupo 2	Diâmetro do Condutor AT
		Distância Entre Enrolamentos AT e BT
		Indução Magnética
Rotina 4	Grupo 1	Diâmetro do Condutor AT
		Espessura da Isolação do Condutor BT
		Distância Entre Enrolamentos AT e BT
	Grupo 2	Largura do Condutor BT
		Altura do Calço
		Altura da Cabeceira BT
Rotina 5	Grupo 1	Espessura do Condutor BT
		Altura da Cabeceira BT
		Indução Magnética
	Grupo 2	Diâmetro do Condutor AT
		Distância Entre Enrolamentos AT e BT
		Altura do Calço

É importante destacar que as variações dos parâmetros nem sempre resultam em transformadores eficientes. Desse modo, cada projeto deve passar por um critério de aprovação, neste caso, as perdas apresentadas devem ser menores que as perdas exigidas por norma, para que os projetos sejam considerados eficientes.

### **4.1.3 – Análise Financeira**

Como comentando anteriormente, a rotina realiza uma análise financeira para estimar o custo dos transformadores projetados. Os custos obtidos são: o custo de manufatura e o custo total.

O custo de manufatura é o custo para a compra do transformador eficiente junto ao fornecedor. Neste custo estão inclusos os custos com: aço-silício, cobre, tanque, mão-de-obra, outros componentes do transformador, despesas diversas com a fabricação do equipamento, impostos e lucro.

O custo total é o custo de manufatura do transformador adicionado aos custos das perdas capitalizadas. Para este custo, considera-se o período de vida útil do equipamento, o tempo de análise do investimento, a taxa de juros do investimento e o Fator de Energia Consumida (FE), também chamado de Tempo Suprindo Máxima Potência (TSMP), Ver Anexo A.

Com base nos índices utilizados para cálculo do custo total, a rotina também calcula ainda o Tempo de Retorno do Investimento (TRI). Ao concluir a análise financeira, a rotina inicia a seleção dos projetos viáveis.

### **4.1.4 – Otimização e Obtenção dos Transformadores Projetados**

Após os cálculos dos parâmetros dos projetos, a rotina realiza uma otimização com o intuito de selecionar apenas os transformadores que atendam aos limites impostos pelo transformador de referência e por outras restrições.

Como dito anteriormente neste documento, os parâmetros que apresentam limites a serem atendidos pelo transformador de referência são:

perdas em vazio, perdas totais, corrente de excitação e impedância percentual. As outras restrições mencionadas são: custo total e TRI.

Caso todas as restrições sejam atendidas o projeto é selecionado e impresso em planilha Excel<sup>®2</sup>.

Inicialmente os projetos selecionados eram vistos um a um, consumindo tempo demasiado para a análise do projetista. Assim, durante o estudo, decidiu-se criar um sistema para exportação dos dados, onde todos os projetos selecionados na otimização são exportados para uma planilha do Excel. Desta maneira, o projetista pode verificar as informações resumidas dos projetos, como também as informações detalhadas, reduzindo consideravelmente o tempo de análise.

## 4.2 – Alterações nas Rotinas

Após as rotinas [PICANÇO, 2009] passarem por uma análise criteriosa, decidiu-se fazer a revisão destas rotinas, trazendo melhorias, através de simplificações, mudanças na sua estrutura, como também a inserção de novas funções.

As rotinas descritas nos itens anteriores foram simplificadas, para melhor manipulação das mesmas. Dentre essas simplificações, estava a exclusão de algumas linhas de códigos que foram consideradas desnecessárias, a eliminação de algumas variáveis, como também alguns parâmetros de entrada, para melhorar o desempenho/execução da rotina.

No que se refere à organização dos resultados, foi desenvolvida uma rotina para exportação dos dados para planilha em Excel. Outra rotina foi desenvolvida visando melhorias no cálculo dos custos dos projetos, como

---

<sup>2</sup> Excel é uma marca registrada da Microsoft Corporation.

também melhorias na otimização. Os parâmetros estavam inseridos no decorrer das linhas de código, dificultando sua procura, assim, todos estes parâmetros foram realocados em um único arquivo, facilitando a análise destes.

As rotinas foram “quebradas” em partes, vários arquivos, ficando cada trecho em um único arquivo. Assim, as linhas de código que calculam os parâmetros do núcleo ficaram em um arquivo separado, as linhas que calculam os parâmetros do enrolamento BT em outro arquivo, assim por diante.

Todas essas alterações visaram facilitar a sua utilização por parte do projetista.

### **4.3 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos de Transformadores Através da Metodologia da Impedância percentual**

Através da rotina para desenvolvimento de projetos, descrita nos itens anteriores, desenvolveu-se uma nova rotina que visa à redução das perdas em vazio através da otimização da impedância percentual, vide Capítulo 5. Assim, foram desenvolvidas duas rotinas: uma que considera a seção do núcleo constante e outra que considera a variação da seção. A análise financeira e a otimização para seleção dos projetos é realizada segundo a rotina inicial.

### **4.3.1 – Projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante**

Partindo do transformador padrão, a rotina cria 21 projetos manipulando-se alguns parâmetros: quantidade de espiras por enrolamento de BT e quantidade de camadas na BT.

### **4.3.2 – Projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo**

De maneira similar a adotada na rotina para seção do núcleo constante, esta rotina parte de um transformador de referência, variando-se a seção do núcleo em 10 incrementos de 2%, totalizando uma variação máxima de 20% do projeto de referência. Desta maneira, para cada projeto criado com a variação da seção em 2%, a rotina varia o número de espiras em 10 incrementos de 2%, totalizando uma variação máxima de 20%. Mais detalhes serão especificados no Capítulo 5.

Esta mesma rotina ainda adiciona uma camada à bobina de BT para analisar-se sua influência. Desta maneira a rotina cria 120 projetos segundo a variação da seção do núcleo e do número de espiras da BT, aumentando-se para 241 projetos com o incremento do número de camadas da bobina BT.

## **4.4 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos de Transformadores com Núcleo Amorfo**

A rotina para cálculo do projeto de transformadores com núcleo amorfo é similar a rotina para cálculo segundo a metodologia da impedância percentual

(rotina variando a seção do núcleo), diferenciando os cálculos referentes à curva de indução versus perda específica do núcleo. Mais detalhes poderão ser vistos no Capítulo 5.

## **4.5 – Criação de Rotina para Cálculo de Projetos com Transformadores com Enrolamento de Cobre ou Alumínio**

A rotina para cálculo de projetos com transformador com enrolamento de alumínio é similar a rotina para cálculos de projetos de transformador com enrolamento em cobre, diferenciando os cálculos referentes às características do material. Mais detalhes serão mostrados no Capítulo 5.

## **4.6 – Projetos Desenvolvidos para Exemplificar Utilização da Rotina**

Para exemplificar o processo de projeto e seleção dos transformadores, foram projetadas unidades de 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA, para as classes de 15 kV e 25 kV, todas monofásicas. Como ponto de partida destes projetos, foram utilizados transformadores de referência, como comentado anteriormente.

Na Tabela 4.2 têm-se um quadro resumo com as perdas em vazio e totais, impedância percentual e corrente de excitação, para os transformadores de referência obtidos no processo, como também os valores fixados pela NBR.

**Tabela 4.2 – Quadro resumo comparativo entre os valores de referência e os valores da NBR.**

		15 kV			25 kV		
		5 kVA	10 kVA	15 kVA	5 kVA	10 kVA	15 kVA
<b>Referência</b>	<b>Perdas em Vazio (W)</b>	49,74	59,94	85,67	50,00	70,04	90,44
	<b>Perdas Totais (W)</b>	159,52	262,66	354,85	169,54	288,76	394,38
	<b>Corrente de Excitação (%)</b>	5,37	3,25	3,11	5,72	3,74	3,48
	<b>Impedância Percentual</b>	2,29	2,35	2,37	2,55	2,34	2,64
<b>NBR</b>	<b>Perdas em Vazio (W)</b>	50	60	85	50	70	90
	<b>Perdas Totais (W)</b>	160	260	355	170	285	395
	<b>Corrente de Excitação (%)</b>	4,0	3,3	3,0	4,8	4,0	3,6
	<b>Impedância Percentual</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Na Tabela 4.2, percebe-se que alguns valores dos projetos de referência são mais elevados que aos valores impostos pela NBR. Alguns destes valores são superiores propositalmente, como a corrente de excitação do projeto de 5 kVA/ 15 kV. Isso aconteceu por limitações nas dimensões do projeto. Os valores restantes que são superiores aos da norma, obedecem a tolerância imposta pela NBR, [ABNT, 1993]. Esta tolerância pode ser vista na Tabela 4.3

**Tabela 4.3 – Tolerâncias segundo a NBR [ABNT, 1993].**

<b>Impedância percentual</b>	
Transformadores com dois enrolamentos	± 7,5 %
<b>Perdas em vazio</b>	
Em cada unidade da encomenda considerada individualmente	± 10 %
<b>Perdas totais</b>	
Em cada unidade da encomenda considerada individualmente	± 6 %
<b>Corrente de excitação</b>	
Em cada unidade da encomenda considerada individualmente	± 20 %

Os custos totais dos transformadores de referência foram desenvolvidos a partir de um Fator de Energia Consumida de 1 hora/dia, para as potências de 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA e para as classes de isolamento de 15 kV e 25 kV.

Os projetos foram para transformadores monofásicos com ligação no terminal de Alta Tensão (AT) como sendo fase-fase, e no terminal de Baixa Tensão, como sendo para apenas um nível de tensão, 220 V, em todos os casos. As tensões utilizadas nos projetos para o terminal AT foram de 23100 V para a classe de isolamento de 25 kV e de 13800 para a classe de isolamento de 15 kV.

Os núcleos destes transformadores são compostos por lâminas de aço-silício de grão-orientado, sendo formados por duas colunas com uma bobina em cada, conectadas em série. Cada bobina é composta de dois enrolamentos, um BT e um AT. Estes enrolamentos são concêntricos, sendo o enrolamento BT de menor raio. O isolamento entre estes enrolamentos foi constituído com óleo, e entre camadas, com papel, em todos os casos.

Os condutores utilizados tanto para AT como para BT foram de cobre. Quanto à seção destes, optaram-se pelas seções circular e retangular, para o condutor AT e para o condutor BT, respectivamente.

A Tabela 4.4 mostra a quantidade de projetos desenvolvidos pelos grupos de cada rotina. Para os grupos que não apresentaram projetos selecionados, suas respectivas células da tabela foram deixadas em branco.

**Tabela 4.4 – Quantidade de projetos desenvolvidos por cada grupo/rotina.**

Rotina	Grupo	15 kV			25 kV		
		5 kVA	10 kVA	15 kVA	5 kVA	10 kVA	15 kVA
Rotina 1	Grupo 1	5	3	3			11
	Grupo 2		1	8		11	
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	5			2	3	1
Rotina 3	Grupo 1	11	11	11	11	11	8
	Grupo 2	4	3	4	3	4	6
Rotina 4	Grupo 1	11	3	11	11	11	11
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1		1		3	2	
	Grupo 2	11		5	7	11	11

Optou-se por mostrar neste trabalho apenas os projetos selecionados que apresentam menor TRI e maior Redução de Energia, devido a quantidade excessiva de projetos possíveis.

Para a apresentação dos projetos, criaram-se dois conjuntos de tabelas, onde no primeiro conjunto têm-se seis tabelas para os projetos com menor TRI referentes aos transformadores de 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA, para as classes de isolamento de 15 kV e 25 kV. Desta maneira, as Tabelas 4.5 a 4.10 mostram alguns detalhes dos projetos selecionados com menor TRI. As linhas das tabelas que estiverem em branco, indicam que não foram selecionados transformadores para o grupo/rotina em questão.

**Tabela 4.5 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 5 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	114,14	38,29	152,43	2,39	98,66
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_3	98,02	47,09	145,11	0,34	27,48
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_1	104,12	46,62	150,74	0,08	29,37
	Grupo 2	Projeto_4	93,73	49,21	142,94	2,98	10,49
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_8	95,58	47,84	143,42	0,11	21,78
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	93,73	48,54	142,27	0,01	16,36

**Tabela 4.6 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 5 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	110,63	46,46	157,09	1,31	34,32
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_7	104,81	46,50	151,32	0,05	36,06
	Grupo 2	Projeto_1	119,66	39,80	159,46	2,39	89,36
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	109,81	46,27	156,08	0,40	36,29
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_2	113,76	49,33	163,09	3,23	7,99
	Grupo 2	Projeto_1	106,67	48,71	155,39	1,21	16,01

**Tabela 4.7 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 10 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_2	209,72	48,02	257,75	4,30	101,83
	Grupo 2	Projeto_1	179,79	58,08	237,87	3,56	24,69
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_1	195,37	57,85	253,22	0,10	21,03
	Grupo 2	Projeto_1	205,50	48,42	253,92	4,00	99,88
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	178,35	58,17	236,52	2,81	24,37
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_1	196,18	58,67	254,85	3,33	13,49
	Grupo 2						

**Tabela 4.8 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 10 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_2	189,35	68,08	257,44	0,27	27,88
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_2	194,86	67,45	262,31	1,68	31,40
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_11	211,53	67,98	279,51	0,08	20,72
	Grupo 2	Projeto_1	219,94	56,55	276,49	3,83	117,78
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	192,28	67,08	259,36	0,12	35,56
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_1	212,25	68,45	280,71	1,86	16,26
	Grupo 2	Projeto_1	189,35	68,50	257,86	1,06	24,21

**Tabela 4.9 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 15 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	278,47	68,04	346,51	3,82	151,07
	Grupo 2	Projeto_1	235,96	81,41	317,37	0,19	49,52
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_1	259,29	82,98	342,27	0,29	27,20
	Grupo 2	Projeto_1	269,35	68,73	338,07	3,17	148,41
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	234,27	81,80	316,07	0,01	46,70
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	235,01	83,48	318,49	2,35	31,69

**Tabela 4.10 – Projetos com menor TRI selecionados para transformadores de 15 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	261,82	87,39	349,21	0,28	42,13
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	271,43	87,04	358,46	3,60	41,69
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_1	293,76	87,60	381,36	0,60	28,60
	Grupo 2	Projeto_6	260,95	89,14	350,08	2,45	27,10
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_4	260,69	87,60	348,29	0,15	40,67
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	260,95	87,86	348,81	0,36	38,26

Nas Tabelas 4.11 a 4.16 têm-se detalhes dos projetos selecionados com maior Redução de Energia. As Tabelas são para os projetos de transformadores de 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA, para as classes de isolamento de 15 kV e 25 kV.

**Tabela 4.11 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 5 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	114,14	38,29	152,43	2,39	98,66
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	102,03	38,47	140,51	3,99	101,48
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_3	102,15	46,42	148,58	2,07	31,79
	Grupo 2	Projeto_1	108,95	39,95	148,90	3,28	86,01
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	85,47	46,58	132,05	1,26	36,47
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	93,73	48,54	142,27	0,01	16,36

**Tabela 4.12 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 5 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	110,63	46,46	157,09	1,31	34,32
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_4	98,70	45,77	144,47	1,36	44,70
	Grupo 2	Projeto_1	119,66	39,80	159,46	2,39	89,36
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_2	100,51	45,92	146,43	2,58	42,72
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_1	118,17	40,25	158,42	4,96	85,96
	Grupo 2	Projeto_1	106,67	48,71	155,39	1,21	16,01

**Tabela 4.13 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 10 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	210,17	47,94	258,12	4,34	102,35
	Grupo 2	Projeto_1	179,79	58,08	237,87	3,56	24,69
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_8	190,20	57,81	248,01	4,61	23,23
	Grupo 2	Projeto_1	205,50	48,42	253,92	4,00	99,88
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	178,35	58,17	236,52	2,81	24,37
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_1	196,18	58,67	254,85	3,33	13,49
	Grupo 2						

**Tabela 4.14 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 10 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	190,01	67,92	257,93	0,40	29,03
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	203,00	55,27	258,27	4,86	135,14
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_6	202,10	66,55	268,65	4,13	36,68
	Grupo 2	Projeto_1	219,94	56,55	276,49	3,83	117,78
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_2	172,09	66,90	239,00	3,15	44,53
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1	Projeto_1	212,25	68,45	280,71	1,86	16,26
	Grupo 2	Projeto_1	189,35	68,50	257,86	1,06	24,21

**Tabela 4.15 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 15 kVA/ 15 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_1	278,47	68,04	346,51	3,82	151,07
	Grupo 2	Projeto_1	235,96	81,41	317,37	0,19	49,52
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2						
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_2	252,00	82,32	334,32	3,32	35,66
	Grupo 2	Projeto_1	269,35	68,73	338,07	3,17	148,41
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_1	234,27	81,80	316,07	0,01	46,70
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	235,01	83,48	318,49	2,35	31,69

**Tabela 4.16 – Projetos com maior Redução de Energia selecionados para transformadores de 15 kVA/ 25 kV.**

Rotina	Grupo	Projeto	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Perdas Totais (W)	TRI (anos)	Redução de Energia (kWh/ano)
Rotina 1	Grupo 1	Projeto_2	264,13	87,25	351,39	0,90	42,44
	Grupo 2						
Rotina 2	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	271,43	87,04	358,46	3,60	41,69
Rotina 3	Grupo 1	Projeto_1	293,76	87,60	381,36	0,60	28,60
	Grupo 2	Projeto_4	271,58	72,53	344,11	4,88	168,68
Rotina 4	Grupo 1	Projeto_5	238,67	86,12	324,79	4,56	61,69
	Grupo 2						
Rotina 5	Grupo 1						
	Grupo 2	Projeto_1	260,95	87,86	348,81	0,36	38,26

Dentre os projetos desenvolvidos, optou-se por detalhar apenas um tipo de projeto: o que apresenta menor TRI para cada tipo de transformador (potência/ classe de isolamento). Assim as tabelas 4.17 a 4.22 mostram os projetos selecionados para cada tipo (Potência e classe de isolamento) de transformador. Essa escolha pelo menor TRI ou pela maior Redução de Energia depende da ótica da concessionária, ou seja, esta escolha depende dos objetivos da empresa.

Na Tabela 4.17 têm-se o projeto gerado pelo grupo 02 da rotina 05 para um transformador de 5 kVA/ 15 kV.

A Tabela 4.18 mostra o projeto gerado pelo grupo 01 da rotina 03 para um transformador de 5 kVA/ 25 kV.

Na Tabela 4.19 pode-se ver o projeto gerado pelo grupo 01 da rotina 03 para um transformador de 10 kVA/ 15 kV.

**Tabela 4.17 – Projeto selecionado para transformador de 5 kVA/ 15 kV.**

Projeto	Custo Total (R\$)	Preço de Venda (R\$)	TRI (anos)
Projeto_1	1038,59	1000,96	0,01
Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Redução de Energia (kWh/ano)
93,73	48,54	142,27	16,36
Diâmetro do Condutor AT	Distância Entre Enrolamentos	Altura do Calço	
10%	-50%	-50%	

**Tabela 4.18 – Projeto selecionado para transformador de 5 kVA/ 25 kV.**

Projeto	Custo Total (R\$)	Preço de Venda (R\$)	TRI (anos)
Projeto_7	1045,67	1026,89	0,05
Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Redução de Energia (kWh/ano)
104,81	46,50	151,32	36,06
Espessura do Condutor de BT	Espessura da Isolação do Condutor BT	Altura do Calço	
30%	-50%	10%	

**Tabela 4.19 – Projeto selecionado para transformador de 10 kVA/ 15 kV.**

Projeto	Custo Total (R\$)	Preço de Venda (R\$)	TRI (anos)
Projeto_1	1226,83	1142,44	0,10
Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Redução de Energia (kWh/ano)
195,37	57,85	253,22	21,03
Espessura do Condutor de BT	Espessura da Isolação do Condutor BT	Altura do Calço	
10%	-50%	-40%	

Na Tabela 4.20 têm-se o projeto gerado pelo grupo 01 da rotina 03 para um transformador de 10 kVA/ 25 kV.

**Tabela 4.20 – Projeto selecionado para transformador de 10 kVA/ 25 kV.**

Projeto	Custo Total (R\$)	Preço de Venda (R\$)	TRI (anos)
Projeto_11	1327,31	1182,61	0,08
Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Redução de Energia (kWh/ano)
211,53	67,98	279,51	20,72
Espessura do Condutor de BT	Espessura da Isolação do Condutor BT	Altura do Calço	
10%	-20%	-50%	

A Tabela 4.21 mostra o projeto gerado pelo grupo 01 da rotina 04 para um transformador de 15 kVA/ 15 kV.

**Tabela 4.21 – Projeto selecionado para transformador de 15 kVA/ 15 kV.**

Projeto	Custo Total (R\$)	Preço de Venda (R\$)	TRI (anos)
Projeto_1	1552,11	1365,45	0,01
Perdas no Cobre (W)	Perdas no Núcleo (W)	Perdas Totais (W)	Redução de Energia (kWh/ano)
234,27	81,80	316,07	46,70
Diâmetro do Condutor AT	Espessura da Isolação do Condutor BT	Distância Entre Enrolamentos	
10%	-50%	-50%	

Na Tabela 4.22 têm-se o projeto gerado pelo grupo 01 da rotina 04 para um transformador de 15 kVA/ 25 kV.

**Tabela 4.22 – Projeto selecionado para transformador de 15 kVA/ 25 kV.**

<b>Projeto</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>	<b>Preço de Venda (R\$)</b>	<b>TRI (anos)</b>
Projeto_4	1611,24	1383,69	0,15
<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Redução de Energia (kWh/ano)</b>
260,69	87,60	348,29	40,67
<b>Diâmetro do Condutor AT</b>	<b>Espessura da Isolação do Condutor BT</b>	<b>Distância Entre Enrolamentos</b>	
10%	-20%	-50%	

Como comentado anteriormente, os seis projetos mostrados mais detalhadamente através das Tabelas 4.17 a 4.22 foram selecionados por apresentarem menor TRI, porém esta escolha vai depender da visão da empresa envolvida, ou seja, a empresa poderá optar pelos projetos que apresentaram a maior Redução de Energia. Em resumo, esta escolha fica a critério da concessionária.

# Capítulo 5 – Novas Metodologias e Tecnologias para Projetos de Transformadores

## 5.1 – Impacto da Manipulação da Impedância Percentual nos Projetos

A impedância percentual, também chamada de impedância de curto-circuito, é um parâmetro que representa a porcentagem da tensão nominal que se aplicada ao primário de um transformador, implica na circulação da corrente nominal no secundário sob curto circuito, ou seja, a queda de tensão apresentada [RIES, 2007].

A impedância percentual é composta pela reatância percentual de dispersão e a resistência percentual. A reatância percentual de dispersão é composta pela soma entre a reatância de dispersão do primário e a reatância de dispersão do secundário, refletidas para o primário. A outra parcela da impedância percentual é a resistência percentual, que por sua vez, é composta da soma entre a resistência do enrolamento primário e a resistência do enrolamento secundário refletida ao primário [FEINBERG, 1979; MARTIGNONI, 1991; MARTIN, 1957; RIES, 2007].

Os transformadores de distribuição, quando utilizados na zona rural, operam com baixa demanda devido ao perfil de carga dos consumidores

destas regiões. Desta maneira, quando utilizados sob tais circunstâncias, as perdas em vazio predominam.

No projeto de transformadores eficientes, a serem utilizados em condições de pequena solicitação de demanda, procura-se atender as perdas em vazio, manipulando as dimensões do núcleo.

Outra solução, proposta neste capítulo, para a redução das perdas em vazio, consiste na otimização da impedância percentual, incrementando-a. O princípio desta técnica consiste em reduzir a indução magnética (densidade de fluxo magnético), reduzindo o fluxo magnético através do incremento do número de espiras do enrolamento de baixa tensão, considerando a seção do núcleo constante, neste caso basicamente influenciando a componente resistiva da impedância. O resultado desta otimização é um transformador operando com menor indutância magnética, implicando em menores perdas em vazio.

Conseguiu-se ainda reduzir as perdas em vazio dos projetos desenvolvidos através do aumento do número de camadas das bobinas de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT), implicando na redução da altura da bobina, resultando em uma menor altura de janela. Desta maneira, o núcleo se torna ainda mais compacto, podendo reduzir ainda mais seu custo de manufatura.

No Capítulo 6, item 6.1, será detalhado o método em questão, sendo mostrados alguns dados dos projetos desenvolvidos a partir desta técnica, como também o banco de dados utilizado na pesquisa. Por fim, será mostrada a análise financeira realizada para os projetos desenvolvidos.

### **5.1.1 – Banco de Dados Utilizado nesta Pesquisa**

Para a pesquisa da otimização da impedância percentual, foi utilizado um banco de dados proveniente da AES Sul, onde foram realizadas medições

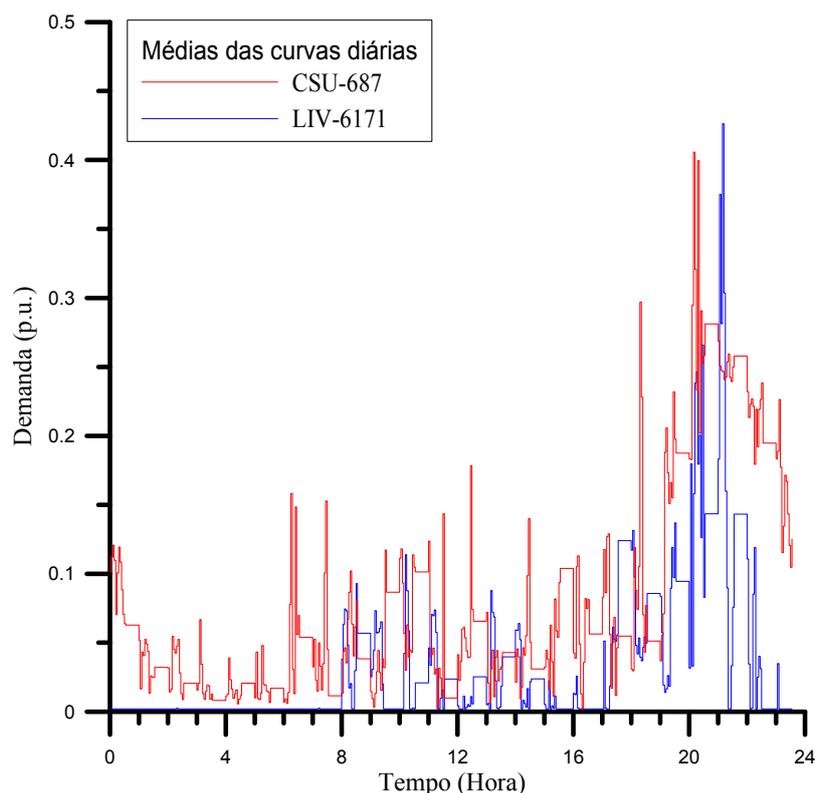
em 69 transformadores localizados na zona rural, área de concessão da empresa, sendo 10 unidades de 5 kVA, 30 unidades de 10 kVA e 29 unidades de 15 kVA. Porém, para este estudo, foram realizados projetos apenas para transformadores de 10 kVA/ 15 kVA, pois são mais amplamente utilizados. De posse dos dados das medições dos transformadores, levantou-se o perfil de carga dos clientes localizados nesta região. Esta pesquisa foi realizada através de um estudo realizado pelo LAT-EFEI, no âmbito de um P&D em parceria com a AES Sul. A partir deste estudo, obteve-se um TSMP médio (Tempo Suprindo Máxima Potência) de 1 hora/dia.

A análise do comportamento das cargas rurais foi concretizada a partir de um estudo estatístico para o TSMP e para a demanda máxima dos dados coletados dos transformadores, neste sentido, foram empregadas distribuições para construir os modelos estatísticos que melhor representassem os dados coletados, através do software MINITAB®.

Na Figura 5.1 pode-se ver os perfis de carga<sup>3</sup> de 2 transformadores de 10 kVA estudados e representados, segundo a concessionária, pelos seguintes códigos: CSU-687 e LIV-6171. Estes transformadores pertencem à rede de concessão da empresa, como também compunham o grupo dos equipamentos estudados. Através deste gráfico, percebe-se que os transformadores operam com baixa demanda, chegando ao máximo de 0,45 p.u. durante o horário de ponta. Desta maneira, fica demonstrada a necessidade de se projetar transformadores com a atenção voltada para as perdas em vazio.

---

<sup>3</sup> Estes dados foram coletados em fevereiro e março de 2009.



**Figura 5.1 – Gráfico da demanda em função do tempo para os transformadores da rede de concessão da empresa.**

### 5.1.2 – Aplicação de Transformadores em Zonas Rurais

Os transformadores de distribuição monofásicos, quando utilizados em zonas rurais, apresentam baixas perdas no cobre, devido ao perfil dos consumidores desta região, normalmente de baixa demanda. Em contrapartida, o transformador apresenta perdas em vazio que devem ser consideradas, pelo fato do equipamento operar grande parte do tempo com carregamento reduzido, como pode ser visto na Figura 5.1. Estas perdas em vazio devem ter sua redução priorizada durante o projeto.

Conforme mencionado anteriormente, neste capítulo é proposta uma solução para a redução das perdas em vazio. Esta redução é realizada através da diminuição da indução magnética, reduzindo o fluxo magnético através do

incremento do número de espiras do enrolamento de BT, considerando a seção do núcleo constante. Assim, influencia-se diretamente a componente resistiva da impedância. Esta manipulação resulta em um transformador operando com menor indutância magnética, que por sua vez, resulta em menores perdas no núcleo. Em decorrência deste resultado, é possível projetar transformadores com núcleos mais compactos, o que pode resultar em transformadores com custo de manufatura reduzido se comparado a um transformador com menor impedância percentual.

Os transformadores projetados segundo esta técnica apresentam as perdas nominais sob carga elevadas, o que pode ser considerado de menor importância, uma vez que o transformador opera com carregamento reduzido. Isto quer dizer que este tipo de projeto é desenvolvido para aplicações com baixa demanda, no caso a operação na zona rural.

### **5.1.3 – Aumento do Número de Camadas**

Através do aumento do número de camadas na BT, foi possível reduzir ainda mais as perdas no núcleo. Esta técnica resulta em um núcleo com sua altura reduzida, devido à redução da altura da bobina, considerando o número de espiras constante. Com a aplicação desta técnica, pode-se obter o núcleo mais compacto, sendo possível reduzir ainda mais seu custo de manufatura.

Os projetos desenvolvidos, segundo esta técnica, podem ser vistos no Capítulo 6, item 6.1.

## **5.2 – Transformadores com Núcleo Amorfo**

Os transformadores de distribuição monofásicos, quando operando sob condições nominais, apresentam elevada eficiência, próxima de 99%. No

entanto, quando tais equipamentos são utilizados em áreas rurais, suprindo clientes de perfil de baixo carregamento, as condições nominais de carregamento não são atendidas, resultando em baixa eficiência. Desta maneira, visando a utilização eficiente de transformadores de distribuição monofásicos, este capítulo apresenta outra solução de projeto para utilização em áreas rurais.

Quando os transformadores operam com baixa demanda, as perdas em carga são reduzidas quando comparados as perdas em vazio. Portanto, nessas condições, o projeto de transformadores eficientes visa principalmente a redução das perdas em vazio. Isto é geralmente obtido através da modificação das dimensões do núcleo, resultando no aumento da quantidade de aço-silício empregada.

Uma solução alternativa para a redução de perdas no núcleo consiste na utilização de tecnologia de núcleo amorfo. Esta tecnologia proporciona uma redução nas perdas em vazio nos equipamentos que as utilizam. Assim, a utilização da liga amorfa torna-se uma ferramenta viável, em termos técnicos, para melhoria da eficiência. Entretanto, a utilização de material amorfo está condicionada a uma análise técnica/ financeira de acordo com as necessidades de cada área de concessão.

No item 6.2 do Capítulo 6, serão mostrados alguns projetos desenvolvidos, como também os custos totais e de manufatura, baseados em informações de produção de fabricantes parceiros do LAT-EFEI. Estes projetos desenvolvidos com a tecnologia da liga amorfa foram comparados com os projetos obtidos através da metodologia da impedância percentual mostrada no item 5.1 deste capítulo.

### 5.2.1 – Metal Amorfo

O metal amorfo é uma liga de ferro, boro e silício ( $\text{Fe}_{78}\text{-B}_{13}\text{-Si}_9$ ), constituindo uma estrutura não-cristalina, formada pelo resfriamento rápido do metal fundido a taxas de resfriamento em torno de  $10^6\text{°C/s}$ . 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 exhibe baixas perdas e ganha excelentes propriedades magnéticas e químicas, quando comparada ao material convencional usado na fabricação de núcleos de transformador, o Aço-Silício (FeSi) [VIJAI, 2011].

Na Figura 5.2 pode-se ver um bobina de fita de metal amorfo.



**Figura 5.2 – Fita de metal amorfo [ALIBABA, 2011].**

### 5.2.2 – Comparação entre FeSi GO e ligas amorfas

Ferro silício de grãos orientados (GO) e ligas amorfas são obtidos por meio de tecnologias distintas. O FeSi, mediante processo de laminação a frio, e

a liga amorfa, por técnicas de solidificação rápida. O teor de silício nas chapas de grãos orientados varia na faixa de 3% a 3,5% e a resistividade em torno de 10 a 47  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ; já a liga amorfa,  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ , possui resistividade aproximadamente três vezes maior, 135  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  [LUCIANO, et al., 2009].

A espessura das fitas de liga amorfa geralmente varia entre 0,0025 e 0,035 mm. O desafio é obter um núcleo compacto a partir de uma fita longa e contínua, com largura média de 30 mm e muito maleável. A espessura das chapas de FeSi GO, utilizadas em núcleos de transformadores de distribuição, varia de 0,23 a 0,30 mm [LUCIANO, et al., 2009].

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram lâminas de aço-silício e o processo de construção do núcleo convencional, respectivamente. Enquanto que a Figura 5.5 mostra um núcleo de liga amorfa.



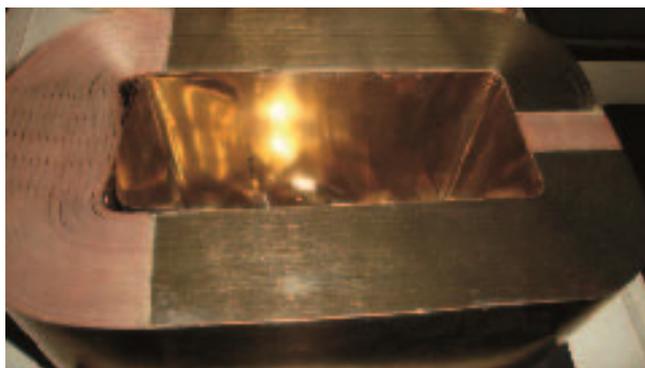
**Figura 5.3 – Lâminas de aço-silício.**

As ligas amorfas e as chapas de aço-silício diferenciam-se, também, pela estrutura atômica. As ligas amorfas se caracterizam por não apresentarem ordenação a curta distância, onde diferenças em sua estrutura fazem com que apresentem baixa força coerciva e uma área reduzida do laço de histerese

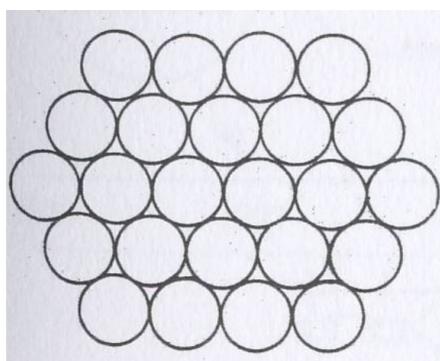
[LUCIANO, et al., 2009]. O metal amorfo não apresenta estrutura cristalina como o aço-silício. Isto significa que os átomos do metal amorfo são dispostos em um padrão diferenciado, aleatório, não cristalino; enquanto que os átomos do aço-silício são dispostos em uma estrutura cristalina ordenada, ver Figuras 5.6 e 5.7 [KENNEDY, 1998]. Opondo a liga amorfa, O aço-silício tem estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado (CCC). Em termos comparativos, as ligas amorfas apresentam indução de saturação reduzida em relação as ligas de aço-silício.



**Figura 5.4 – Núcleo composto com lâminas de aço-silício.**

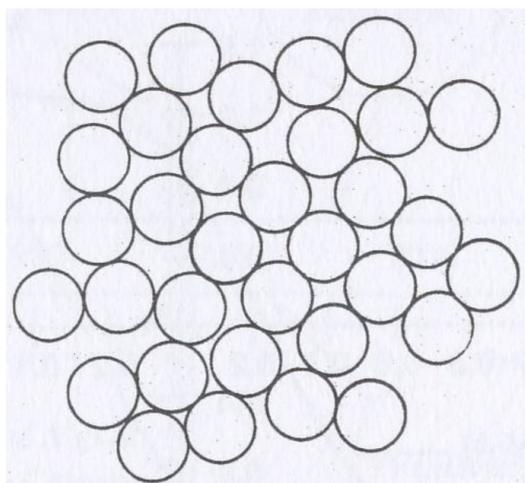


**Figura 5.5 – Núcleo amorfo.**



Cristalino  
Aço-silício

**Figura 5.6 – Estrutura cristalina do aço-silício [KENNEDY, 1998].**



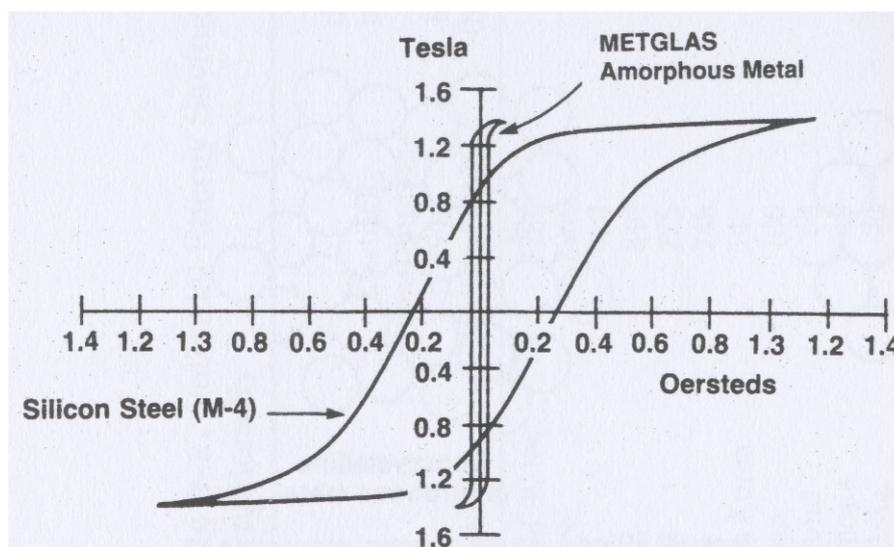
Não Cristalino  
Metal Amorfo

**Figura 5.7 – Estrutura não cristalina do metal amorfo [KENNEDY, 1998].**

Como dito anteriormente, a liga amorfa apresenta um área reduzida do laço de histerese, implicando em perdas por histerese muito baixas.

O movimento dos átomos provoca atrito gerando perdas na forma de calor, onde essas perdas são chamadas de perdas por histerese. Quando o campo magnético é aplicado ao metal amorfo, a forma aleatória de sua estrutura molecular causa menos atrito, se comparada à estrutura do aço silício. Em consequência, têm-se uma redução das perdas por histerese quando se utiliza metal amorfo no núcleo dos transformadores, implicando na redução significativa das perdas em vazio, quando comparado ao núcleo de aço silício [KENNEDY, 1998].

Na Figura 5.8 pode-se ver, a partir das curvas, que o metal amorfo satura em um menor nível de magnetização do que o aço silício.



**Figura 5.8 – Curva de magnetização do metal amorfo e do aço-silício [KENNEDY, 1998].**

Além da redução das perdas de histerese, transformadores com núcleo amorfo apresentam menores perdas por correntes de Foucault, comparados aos transformadores com núcleo de aço-silício. Transformadores que possuem núcleo amorfo têm menores perdas por correntes de Foucault do que transformadores com núcleo de aço silício, devido à natureza muito fina das

fitas da liga amorfa. As lâminas finas resultam em baixa resistência entre as lâminas, como também em baixas perdas por correntes de Foucault.

A combinação da redução das perdas por histerese e por correntes de Foucault resulta em transformadores que, utilizando ligas amorfas, apresentam perdas no núcleo de 70 a 80% menores quando comparados a transformadores convencionais, de aço-silício [KENNEDY, 1998].

### **5.2.3 – Ligas amorfas e suas aplicações em núcleos de Transformadores**

“Apesar de transformadores de distribuição com núcleo amorfo estarem em operação desde 1982, eles são considerados como o mais recente avanço no esforço em curso para melhorar a eficiência dos transformadores.” [KENNEDY, 1998]. Esta afirmação pode ser considerada válida mesmo depois de uma década, visto que ainda hoje o metal amorfo pode ser considerado, em alguns países como o Brasil, uma tecnologia recente. Transformadores com esta tecnologia são considerados, em termos técnicos, uma ótima solução para efficientização no sistema de distribuição, visto que estes transformadores podem substituir os transformadores convencionais com núcleo com aço-silício, reduzindo as perdas do sistema, através da redução das perdas em vazio. Entretanto, segundo Kennedy [1998], embora a utilização do núcleo amorfo possa reduzir significativamente as perdas em vazio, o custo operacional do ciclo de vida do transformador pode aumentar devido ao elevado custo inicial do equipamento.

Cronologicamente, o desenvolvimento das ligas amorfas potencialmente aplicáveis em núcleos de transformadores teve início em 1975. Sua introdução no mercado só veio a ocorrer em 1976, com o primeiro Transformador de Distribuição com Núcleo de Material Amorfo (TDMA), construído no Laboratório

Lincoln, do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA) [CAVALCANTI e LUCIANO, 2001].

Naquela oportunidade, um protótipo de transformador de 30 kVA, com núcleo de material amorfo, foi comparado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios comparativos, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao TDMA, particularmente nos aspectos relativos às perdas e à corrente de excitação: houve uma redução de 60% nas perdas totais (87,5% nas perdas do núcleo e 21% nas perdas do cobre) e a corrente de excitação foi reduzida de 2,5 A para 0,12 A. Entretanto, no que diz respeito ao peso, o TDMA apresentou um aumento de 15% com relação ao seu concorrente [VIJAI, 2011]. Atualmente, os Estados Unidos contam com mais de um milhão de transformadores com núcleos de material amorfo (10% do total) instalados em seu sistema de distribuição de energia elétrica. O Japão, com mais de 120 mil unidades instaladas, é o segundo país do Mundo em número de transformadores com núcleos de material amorfo, seguido de países como a Índia, Filipinas, Bangladesh, Coreia, Taiwan, China, Bélgica, Reino Unido e Irlanda [CAVALCANTI, et al., 2001].

No Capítulo 6, item 6.2, pode-se ver os projetos desenvolvidos com material amorfo.

### **5.3 – Utilização do Cobre ou do Alumínio no Projeto**

Os transformadores de distribuição monofásicos podem ser projetos utilizando cobre ou alumínio nos condutores das bobinas BT e AT. As principais consequências do uso destes materiais são as perdas em carga e o custo dos projetos.

Como dito, a principal razão para a escolha de enrolamentos de alumínio é o seu baixo custo inicial. O custo do cobre tem provado historicamente ser muito mais volátil do que o custo do alumínio, de modo que o preço de compra do condutor de cobre tem se mostrado geralmente a opção mais cara. No

entanto, junções de alumínio confiáveis exigem mais disciplina e especialização por parte dos montadores de transformadores, que o necessário para junções de cobre [SQUARE D, 1996].

O alumínio apresenta condutividade inferior a do cobre, apenas 61% da condutividade do cobre, o que provoca maiores perdas de energia em transformadores com enrolamentos de alumínio. Projetistas estão sempre preocupados com a temperatura do enrolamento. Para manter a temperatura abaixo do nível de isolamento, transformadores com enrolamentos de alumínio são projetados usando condutores com maior seção transversal, quando comparado ao condutor caso fosse de cobre. Em média, isto resulta em perdas de energia iguais para o uso com alumínio como para o cobre, diferenciando na quantidade de material utilizada para cada tipo. Portanto, transformadores com projeto similar com o mesmo aumento de temperatura possuem perdas mais ou menos equivalentes, independentemente do material condutor.

Os fabricantes de transformadores limitam a variedade de tamanhos da seção de condutor em estoque. Devido a isso, alguns projetos em alumínio podem obter menores perdas do que o cobre, simplesmente porque a escolha da seção do condutor é limitada, entretanto, isso acarreta em um maior uso do material em questão, alumínio. Em outros projetos, o cobre torna-se mais eficiente. Poucos, senão nenhum dos fabricantes de transformadores de baixa tensão alteram as dimensões do núcleo quando se muda de alumínio para cobre ou vice-versa, assim as perdas no núcleo permanecem praticamente equivalentes, independentemente do material utilizado no enrolamento [SQUARE D, 1996].

No item 6.3, do Capítulo 6, será mostrada uma comparação entre projetos usando os dois tipos de materiais para os condutores. Esta comparação será baseada nas perdas em vazio e em carga e nos custos dos projetos.

# Capítulo 6 – Projetos de Transformadores: Resultados

## 6.1 – Projeto de Transformadores Monofásicos Manipulando-se a Impedância Percentual

Através de uma rotina para desenvolvimento de projetos a partir do carregamento das unidades [PICANÇO, 2009], desenvolveu-se uma nova rotina que visa à redução das perdas em vazio através da otimização da impedância percentual. Os projetos mostrados neste trabalho foram confeccionados de acordo com esta nova rotina.

Os projetos desenvolvidos foram para transformadores monofásicos com terminais de AT para conexão fase-fase com tensão nominal de 13,8 kV, e terminais de BT para apenas um nível de tensão como sendo de 220 V.

Os transformadores seguem o projeto convencional, ou seja, apresentam núcleo formado por duas colunas, e composto por lâminas de aço-silício de grão-orientado. Em cada coluna tem-se um conjunto de bobinas conectadas em série, onde cada conjunto é formado de duas bobinas, sendo uma AT e uma BT. As bobinas, AT e BT, são concêntricas, sendo a de BT a de menor raio. Em termos de isolamento, para todos os casos utilizou-se de óleo entre as bobinas, e entre camadas, papel [RIES, 2007]. Os condutores utilizados tanto para AT quanto BT foram de cobre e em termos de seção,

utilizou-se circular e retangular, para o condutor AT e para o condutor BT, respectivamente.

Os transformadores foram projetados a partir de um transformador padrão, obtido de acordo com os limites impostos pela norma NBR 5440 [ABNT, 1999]. Desta maneira, o transformador padrão possui características com limites próximos aos normalizados. O objetivo de partir do projeto de um transformador padrão permite considerar pequenas variações de seus parâmetros no processo de obtenção e otimização de novos projetos, considerados, a princípio, mais eficientes.

Os projetos foram desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante, como também variando-se a seção, aumentando o número de opções.

### **6.1.1 – Projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante**

Partindo do transformador padrão, foram criados 21 projetos alterando-se alguns parâmetros: quantidade de espiras por enrolamento de BT e quantidade de camadas na BT.

As características do transformador padrão e dos 21 projetos desenvolvidos podem ser vistas nas Tabelas 6.1 e 6.2. Os projetos desenvolvidos e apresentados na Tabela 6.1 apresentam 2 camadas na bobina de BT.

**Tabela 6.1 – Projetos desenvolvidos com duas camadas na BT.**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
<b>ABNT [ABNT, 1999]</b>	-	60	260	2,5
<b>Projeto Padrão</b>	202,72	61,82	264,54	2,35
<b>Projeto_1</b>	243,27	40,10	283,37	2,84
<b>Projeto_2</b>	239,21	41,56	280,77	2,79
<b>Projeto_3</b>	235,16	43,13	278,29	2,74
<b>Projeto_4</b>	231,10	44,83	275,94	2,69
<b>Projeto_5</b>	227,05	46,67	273,72	2,64
<b>Projeto_6</b>	223,00	48,67	271,67	2,60
<b>Projeto_7</b>	218,94	50,85	269,79	2,55
<b>Projeto_8</b>	214,89	53,23	268,11	2,50
<b>Projeto_9</b>	210,83	55,83	266,66	2,45
<b>Projeto_10</b>	206,78	58,68	265,46	2,40

Na Tabela 6.2 podem ser vistos os projetos desenvolvidos com 3 camadas na bobina BT.

**Tabela 6.2 – Projetos desenvolvidos com três camadas na BT.**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
<b>ABNT [ABNT, 1999]</b>	-	60	260	2,5
<b>Projeto Padrão</b>	202,72	61,82	264,54	2,35
<b>Projeto_11</b>	262,23	34,18	296,41	3,88
<b>Projeto_12</b>	257,86	35,48	293,33	3,81
<b>Projeto_13</b>	253,49	36,87	290,36	3,74
<b>Projeto_14</b>	249,12	38,38	287,49	3,67
<b>Projeto_15</b>	244,75	40,01	284,76	3,60
<b>Projeto_16</b>	240,38	41,79	282,16	3,54
<b>Projeto_17</b>	236,00	43,72	279,73	3,47
<b>Projeto_18</b>	231,63	45,83	277,47	3,40
<b>Projeto_19</b>	227,26	48,14	275,41	3,33
<b>Projeto_20</b>	222,89	50,68	273,57	3,26
<b>Projeto_21</b>	218,52	53,47	271,99	3,19

O projeto 1 seria idêntico, em termos de parâmetros de entrada da rotina, ao projeto 11 diferenciando apenas no número de camadas da BT; o projeto 2 semelhante ao projeto 12, e assim por diante, com o projeto 21 sendo semelhante ao projeto padrão, no entanto agora com 3 camadas na bobina de BT. Na Tabela 6.3 têm-se um resumo comparativo entre os projetos com duas e três camadas na BT.

**Tabela 6.3 – Comparação entre os projetos desenvolvidos considerando a quantidade de camadas na BT.**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
<b>Projeto Padrão</b>	202,72	61,82	264,54	2,35
<b>Projeto_21</b> (Versão com três camadas)	218,52	53,47	271,99	3,19
<b>Projeto_1</b>	243,27	40,10	283,37	2,84
<b>Projeto_11</b> (Versão com três camadas)	262,23	34,18	296,41	3,88
<b>Projeto_5</b>	227,05	46,67	273,72	2,64
<b>Projeto_15</b> (Versão com três camadas)	244,75	40,01	284,76	3,60
<b>Projeto_10</b>	206,78	58,68	265,46	2,40
<b>Projeto_20</b> (Versão com três camadas)	222,89	50,68	273,57	3,26

Na Tabela 6.4 são mostrados os detalhes de alguns dos projetos desenvolvidos de acordo com a técnica descrita neste item.

**Tabela 6.4 – Projetos com a seção do núcleo constante (Espiras, perdas no núcleo, indução, resistência e impedância percentual).**

<b>Projetos</b>	<b>Espiras BT</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Indução na coluna (Gauss)</b>	<b>Resistência Percentual</b>	<b>Impedância Percentual</b>
<b>Projeto Padrão</b>	51,33	61,82	16750,00	2,03	2,35
<b>Projeto_21</b>	51,33	53,47	16750,00	2,19	3,19
<b>Projeto_1</b>	61,59	40,10	13958,33	2,43	2,84
<b>Projeto_11</b>	61,59	34,18	13958,33	2,62	3,88
<b>Projeto_5</b>	57,49	46,67	14955,36	2,27	2,64
<b>Projeto_15</b>	57,49	40,01	14955,36	2,45	3,60
<b>Projeto_10</b>	52,36	58,68	16421,57	2,07	2,40
<b>Projeto_20</b>	52,36	50,68	16421,57	2,23	3,26

Através da Tabela 6.4, pode-se ver que ao incrementar a impedância percentual, mais especificamente a sua componente resistiva, por meio do método descrito neste capítulo, conseguiu-se reduzir a indução magnética, implicando na redução das perdas em vazio. Incrementando-se o número de camadas da BT, conseguiu-se reduzir a altura da janela, que por sua vez, resultou na redução da massa do núcleo, implicando na redução das perdas em vazio.

Como mostra a Tabela 6.5, os incrementos na impedância percentual são associados a aumentos na sua componente resistiva, a resistência percentual, que são resultantes da utilização de enrolamentos compostos por um maior número de espiras. Isto implica em um aumento de volume de cobre utilizado no projeto se comparado ao utilizado no transformador padrão. Em contrapartida implica em maiores perdas nominais nos enrolamentos. No entanto, como comentado anteriormente, sob as condições de baixo carregamento observadas, estas perdas são reduzidas, de modo que, as

perdas totais em operação podem vir a ser menores que os valores normalizados [ABNT, 1999]. Em contrapartida ao aumento da resistência, a quantidade de aço-silício utilizada é reduzida quando comparada à empregada no transformador padrão, implicando em uma queda no preço de manufatura.

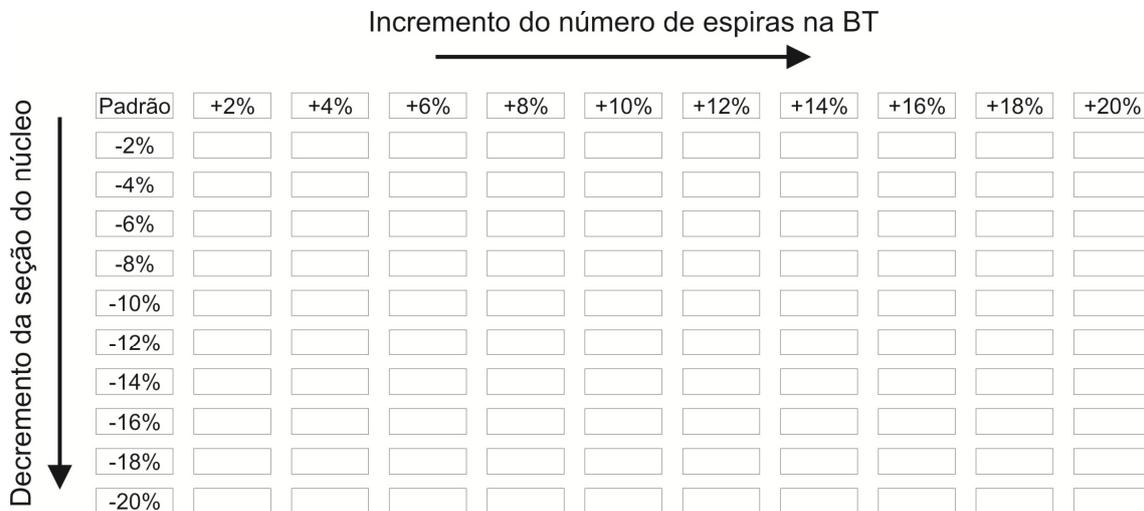
**Tabela 6.5 – Projetos com a seção do núcleo constante (Massa de cobre, massa de aço-silício e impedância percentual.**

<b>Projetos</b>	<b>Massa Total de Cobre (kg)</b>	<b>Massa Total de Aço-Silício (kg)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
<b>Projeto Padrão</b>	10,94	27,52	2,35
<b>Projeto_21</b>	11,76	25,01	3,19
<b>Projeto_1</b>	13,12	30,01	2,84
<b>Projeto_11</b>	14,11	26,67	3,88
<b>Projeto_5</b>	12,25	29,01	2,64
<b>Projeto_15</b>	13,17	26,00	3,60
<b>Projeto_10</b>	11,15	27,77	2,40
<b>Projeto_20</b>	12,00	25,17	3,26

### 6.1.2 – Projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo

De maneira similar a adotada na rotina para seção do núcleo constante, partiu-se de um transformador de referência, variando-se a seção do núcleo em 10 incrementos de 2%, totalizando uma variação máxima de 20% do projeto de referência. Desta maneira, para cada projeto criado com a variação da seção em 2%, variou-se o número de espiras em 10 incrementos de 2%, totalizando

uma variação máxima de 20%. A Figura 6.1 mostra como são criados os projetos segundo o método descrito neste parágrafo.



**Figura 6.1– Modelo mostrando a criação dos projetos.**

Para os projetos desenvolvidos segundo esta técnica, aumentou-se uma camada na bobina de BT para analisar-se sua influência. Desta maneira foram criados 120 projetos segundo a variação da seção do núcleo e do número de espiras da BT, aumentando-se para 241 projetos com o incremento do número de camadas da bobina BT.

A seleção dos projetos considerados viáveis é realizada segundo uma otimização com algumas restrições: perdas em vazio, perdas em carga, impedância percentual, corrente de excitação e Tempo de Retorno de Investimento (TRI). O TRI será abordado mais adiante.

Os projetos desenvolvidos e mostrados na Tabela 6.6 foram obtidos por meio das seguintes restrições: perdas em vazio iguais a 40 W, perdas em carga iguais a 400 W, impedância percentual igual a 3,5%, corrente de excitação igual a 3,5% e TRI igual a 5 anos.

**Tabela 6.6 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Perdas no cobre e no núcleo, impedância percentual, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>	<b>Seção do Núcleo (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Quant. de Camadas BT</b>
<b>Projeto Padrão</b>	202,72	61,82	2,35	48,03	2
<b>Projeto_1</b>	231,86	50,21	2,70	42,26	2
<b>Projeto_2</b>	233,81	48,09	2,73	43,22	2
<b>Projeto_3</b>	235,74	46,18	2,75	44,18	2
<b>Projeto_4</b>	237,65	44,44	2,77	45,14	2
<b>Projeto_44</b>	235,44	39,46	3,48	46,11	3
<b>Projeto_45</b>	233,16	39,70	3,44	47,07	3
<b>Projeto_46</b>	234,92	38,38	3,47	48,03	3

A princípio, através da otimização, foram selecionados 48 projetos, porém, em virtude da grande quantidade, a seleção foi reduzida para apenas 7 projetos, de modo que seus detalhes pudessem ser mostrados. Dentre os 48 projetos, foram selecionados apenas 7 grupos de projetos, onde cada grupo possui um tamanho de seção do núcleo. Desta maneira, para cada grupo optou-se por escolher o projeto que apresentou menores perdas no núcleo. Através da Tabela 6.6 percebeu-se que os projetos com maior quantidade de camadas apresentaram menores perdas no núcleo devido a altura da coluna do núcleo ter sido reduzida, implicando na redução da quantidade de aço-silício utilizada e do caminho do fluxo.

A Tabela 6.7 mostra outras informações acerca dos projetos desenvolvidos. Nesta tabela percebe-se que os projetos que apresentaram menores perdas no núcleo, possuem um maior incremento na quantidade de espiras na BT, de 14% a 20% do número de espiras inicial.

**Tabela 6.7 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Espiras, perdas no núcleo, indução, resistência e seção do núcleo).**

<b>Projetos</b>	<b>Espiras BT</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Indução na coluna (Gauss)</b>	<b>Resistência Percentual</b>	<b>Seção do Núcleo (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Projeto Padrão</b>	51,33	61,82	16750,00	2,03	48,03
<b>Projeto_1</b>	61,59	50,21	15861,74	2,32	42,26
<b>Projeto_2</b>	61,59	48,09	15509,26	2,34	43,22
<b>Projeto_3</b>	61,59	46,18	15172,10	2,36	44,18
<b>Projeto_4</b>	61,59	44,44	14849,29	2,38	45,14
<b>Projeto_44</b>	59,54	39,46	15041,31	2,35	46,11
<b>Projeto_45</b>	58,52	39,70	14992,84	2,33	47,07
<b>Projeto_46</b>	58,52	38,38	14692,98	2,35	48,03

A Tabela 6.8 mostra o aumento na massa de cobre devido à técnica do incremento da impedância percentual, como a também a redução da massa aço-silício na maioria dos projetos, principalmente nos projetos que sofreram aumento no número de camadas na bobina BT. A diminuição da massa de aço-silício utilizada nos projetos é resultado da redução da seção do núcleo, em contrapartida, ao aumento da coluna do núcleo devido ao aumento da altura da bobina, proveniente do incremento do número de espiras.

**Tabela 6.8 – Projetos variando-se a seção do núcleo (Massa de cobre, massa de aço-silício, impedância, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).**

<b>Projetos</b>	<b>Massa Total de Cobre (kg)</b>	<b>Massa Total de Aço-Silício (kg)</b>	<b>Impedância Percentual</b>	<b>Seção do Núcleo (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Quant. de Camadas BT</b>
<b>Projeto Padrão</b>	10,94	27,52	2,35	48,03	2
<b>Projeto_1</b>	12,50	25,98	2,70	42,26	2
<b>Projeto_2</b>	12,61	26,65	2,73	43,22	2
<b>Projeto_3</b>	12,71	27,31	2,75	44,18	2
<b>Projeto_4</b>	12,82	27,98	2,77	45,14	2
<b>Projeto_44</b>	12,72	25,13	3,48	46,11	3
<b>Projeto_45</b>	12,59	25,57	3,44	47,07	3
<b>Projeto_46</b>	12,69	26,17	3,47	48,03	3

### 6.1.3 – Análise Financeira dos Transformadores Projetados

Após o desenvolvimento dos projetos mostrados neste capítulo, realizou-se uma análise financeira, para assim, estimar os custos de cada um dos projetos. Os custos estimados foram o custo de manufatura e o custo total, desenvolvidos com base em uma unidade fabril fictícia, entretanto, estes custos se baseiam em valores praticáveis no mercado, obtidos no ano de 2009 com fabricantes parceiros do LAT-EFEI.

O custo de manufatura é o custo para a compra do transformador eficiente junto ao fornecedor. Neste custo estão inclusos os custos com: aço-

silício, cobre, tanque, mão-de-obra, outros componentes do transformador, despesas diversas com a fabricação do equipamento, impostos e lucro.

O custo total representa o custo de manufatura do transformador adicionado aos custos das perdas capitalizadas [PICANÇO, 2009]. Para a obtenção deste custo, considerou-se um período de vida útil do equipamento como sendo de 20 anos, custos do transformador amortizados ao longo de sua vida útil [KENNEDY, 1998; LAKERVI, 1989], um tempo de análise de 10 anos, uma taxa de juros de 8% a.a. e um TSMP igual a 1 hora/dia.

#### 6.1.3.1 – Custos dos projetos desenvolvidos considerando-se a seção do núcleo constante

Os custos dos transformadores projetados, como também o custo do transformador usado como padrão, podem ser vistos na Tabela 6.9.

**Tabela 6.9 – Custos de manufatura e total dos projetos desenvolvidos com a seção do núcleo constante.**

<b>Projetos</b>	<b>Preço de Manufatura (R\$)</b>	<b>Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)</b>
<b>Projeto Padrão</b>	1134,98	1250,65
<b>Projeto_21</b>	1118,76	1187,57
<b>Projeto_1</b>	1198,59	1158,75
<b>Projeto_11</b>	1175,31	1108,17
<b>Projeto_5</b>	1173,15	1181,23
<b>Projeto_15</b>	1152,69	1127,21
<b>Projeto_10</b>	1141,34	1234,92
<b>Projeto_20</b>	1124,42	1173,81

## 6.1.3.2 – Custos dos projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo

Os custos dos transformadores projetados, como também o custo do transformador usado como padrão, podem ser vistos na Tabela 6.10.

**Tabela 6.10 – Custos de manufatura e total dos projetos desenvolvidos variando-se a seção do núcleo.**

<b>Projetos</b>	<b>Preço de Manufatura (R\$)</b>	<b>Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)</b>
<b>Projeto Padrão</b>	1134,98	1250,65
<b>Projeto_1</b>	1141,82	1185,08
<b>Projeto_2</b>	1151,25	1177,75
<b>Projeto_3</b>	1160,70	1171,80
<b>Projeto_4</b>	1170,16	1167,06
<b>Projeto_44</b>	1135,31	1108,94
<b>Projeto_45</b>	1138,49	1112,13
<b>Projeto_46</b>	1147,00	1109,50

Como mostrado nas Tabelas 6.9 e 6.10, através das técnicas mostradas neste capítulo, conseguiu-se projetar transformadores de distribuição monofásicos eficientes, com o custo de manufatura e total próximos ou menor que o do transformador padrão, devido às perdas em vazio terem sido reduzidas. Isso demonstra que os projetos apresentam viabilidade técnica-econômica.

Os transformadores projetados apresentam perdas totais nominais superiores aos valores normatizados [ABNT, 1999], porém, como comentado anteriormente, os transformadores são desenvolvidos para operar em zonas rurais, regiões estas, onde os consumidores apresentam perfis de carga de baixa demanda. Desta maneira, os transformadores operariam com pequena

solicitação, próximo de operar em vazio, implicando assim em pequenas perdas em carga. Como resultado, em campo as perdas totais provavelmente seriam abaixo dos valores normatizados.

## 6.2 – Projetos de Transformadores com Núcleo Amorfo

Devido às perdas em vazio serem reduzidas, os transformadores com núcleo amorfo apresentam vantagens em relação ao núcleo de aço-silício, quando utilizado em regiões com baixa demanda, áreas rurais, nas quais este tipo de perda é predominante. Assim, alguns projetos de transformadores com núcleo amorfo foram desenvolvidos para serem analisados em termos de custo e eficiência. Uma comparação entre a metodologia sugerida anteriormente com base na alteração da impedância percentual e a tecnologia de núcleo amorfo também será realizada.

Os projetos de transformadores com núcleo amorfo foram desenvolvidos segundo a tecnologia da impedância percentual. Para o projeto de transformadores localizados na zona rural, pode-se manipular o número de espiras, elevando-o, implicando assim no aumento da resistência percentual. Assim, as perdas em vazio podem ser reduzidas, e as perdas nominais sob carga acabam sendo elevadas, o que pode ser considerado de menor importância, uma vez que o transformador opera com carregamento reduzido.

Partiu-se do transformador padrão, onde se criaram 3 projetos manipulando alguns parâmetros: número de espiras por enrolamento e a quantidade de camadas na BT. As características dos 3 projetos desenvolvidos podem ser vistas nas Tabelas 6.11 e 6.12. Como mencionado anteriormente, para projetos com este tipo de tecnologia também foi utilizada a metodologia da impedância percentual, de modo que a sua influência em um transformador com núcleo amorfo pôde ser verificada.

**Tabela 6.11 – Projetos de transformadores para a potência de 10 kVA e classe de isolamento de 15 kV.**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
Projeto_01	231,86	12,10	243,96	2,70
Projeto_02	226,02	12,55	238,57	2,63
Projeto_03	217,85	13,12	230,97	2,54

**Tabela 6.12 – Influência da impedância percentual no peso do cobre e do núcleo.**

<b>Projetos</b>	<b>Espiras BT</b>	<b>Indução na Coluna (Gauss)</b>	<b>Peso Total de Cobre (kg)</b>	<b>Peso Total do Núcleo (kg)</b>	<b>Seção do Núcleo (cm<sup>2</sup>)</b>
Projeto_01	61,59	15861,74	12,50	25,98	42,26
Projeto_02	59,54	16044,06	12,19	26,20	43,22
Projeto_03	56,46	16199,23	11,75	26,81	45,14

A partir das Tabelas 6.11 e 6.12, verificou-se que o aumento da impedância percentual pode ser aplicado ao transformador com núcleo amorfo reduzindo, assim, as perdas em vazio. Desta maneira, ao aumentar-se o número de espiras, conseguiu-se reduzir as perdas em vazio, de maneira semelhante a descrita no Capítulo 5.

### 6.2.1 – Comparação entre Projetos com a Tecnologia da Liga Amorfa e com a Metodologia da Impedância Percentual

Com a finalidade de se confrontar a tecnologia proposta para redução de perdas por meio da impedância percentual com o projeto de transformador com núcleo amorfo, os dados referentes aos projetos foram comparados, conforme mostrado nas Tabelas 6.13 e 6.14. A Tabela 6.13 mostra os níveis de perdas obtidos com as duas tecnologias e comparados ao transformador padrão ABNT.

**Tabela 6.13 – Transformadores desenvolvidos para a potência de 10 kVA e classe de isolamento de 15 kV.**

<b>Projetos</b>	<b>Perdas no Cobre (W)</b>	<b>Perdas no Núcleo (W)</b>	<b>Perdas Totais (W)</b>	<b>Impedância Percentual</b>
ABNT [ABNT, 1999]	-	60	260	2,5
<b>Núcleo de Aço-Silício</b>				
Projeto_01	262,23	34,18	296,41	3,88
Projeto_02	257,86	35,48	293,33	3,81
Projeto_03	253,49	36,87	290,36	3,74
<b>Núcleo Amorfo</b>				
Projeto_01	231,86	12,10	243,96	2,70
Projeto_02	226,02	12,55	238,57	2,63
Projeto_03	217,85	13,12	230,97	2,54

A Tabela 6.14 mostra alguns parâmetros construtivos obtidos dos projetos desenvolvidos para os transformadores com os dois tipos de núcleo:

peso do cobre e do núcleo (aço-silício e amorfo) usados em cada projeto, impedância percentual e custo de manufatura.

**Tabela 6.14 – Detalhes dos projetos.**

Projetos	Espiras BT	Indução na Coluna (Gauss)	Peso Total de Cobre (kg)	Peso Total do Núcleo (kg)	Impedância Percentual
<b>Núcleo de Aço-silício</b>					
Projeto_01	61,59	13958,33	14,11	26,67	3,88
Projeto_02	60,57	14194,92	13,88	26,50	3,81
Projeto_03	59,54	14439,66	13,64	26,34	3,74
<b>Núcleo Amorfo</b>					
Projeto_01	61,59	15861,74	12,50	25,98	2,70
Projeto_02	59,54	16044,06	12,19	26,20	2,63
Projeto_03	56,46	16199,23	11,75	26,81	2,54

Como mostrado na Tabela 6.14, o aumento da impedância percentual resulta no aumento de cobre utilizado nos projetos com aço silício (Item 6.1). Esse aumento resulta principalmente na redução das perdas em vazio como mostrado na Tabela 6.13.

Nas tabelas acima, pode-se ver que as perdas em vazio dos projetos com a tecnologia do metal amorfo são menores, comparadas com as perdas dos projetos com a metodologia da impedância percentual. A decisão de qual tecnologia adotar pode ser obtida com uma avaliação técnica/econômica atendendo as necessidades da concessionária.

## 6.2.2 – Análise Financeira dos Projetos Desenvolvidos

Uma análise financeira foi realizada com o intuito de verificar a viabilidade dos projetos com núcleo amorfo, em relação aos projetos com núcleo de aço-silício obtidos a partir da metodologia da impedância percentual. Esta análise estimou o custo de cada projeto. Os custos obtidos para os projetos foram os custos de manufatura e total, onde este último é baseado na capitalização das perdas. Os custos são baseados em uma planta fabril fictícia. Os custos dos projetos com núcleo amorfo foram estimados segundo dados fornecidos por fabricantes tradicionais de transformadores de distribuição.

Os custos dos transformadores com núcleo de aço-silício obtidos com a metodologia da impedância percentual e dos transformadores com núcleo amorfo podem ser vistos na Tabela 6.15.

**Tabela 6.15 – Custo de manufatura e custo total dos projetos: Núcleo de aço-silício e núcleo amorfo.**

<b>Projetos</b>	<b>Preço de Manufatura (R\$)</b>	<b>Custo total (R\$)</b>
<b>Núcleo de Aço-silício</b>		
Projeto_01	1125,86	1061,53
Projeto_02	1120,43	1065,04
Projeto_03	1115,02	1069,18
<b>Núcleo Amorfo</b>		
Projeto_01	1330,66	1056,53
Projeto_02	1328,73	1056,61
Projeto_03	1330,40	1059,31

Na Tabela 6.15, pode-se ver que o custo de manufatura de transformadores com tecnologia de núcleo amorfo é superior ao custo de manufatura dos transformadores desenvolvidos com metodologia da impedância percentual. No entanto, o custo total dos transformadores com núcleo amorfo pode vir a ser compatível com o custo dos transformadores obtidos com a técnica da impedância percentual. Para ambas as soluções, o investimento inicial pode ser compensado com a capitalização das perdas, resultando assim, em soluções viáveis. Como os custos totais são muito próximos para ambos os casos, é necessário realizar uma avaliação de acordo com os critérios de compra e capitalização adotados por cada concessionária.

### **6.3 – Projetos com Cobre ou Alumínio**

Os projetos desenvolvidos com enrolamento de alumínio foram estimados, considerando o enrolamento BT como tendo seção retangular, e o enrolamento AT como tendo seção circular, ou seja, o projeto do transformador com condutor em alumínio possui as mesmas características que o transformador com condutor em cobre.

#### **6.3.1 – Projeto de Transformador com Condutor de Alumínio**

As Tabelas 6.16 a 6.18 mostram os detalhes do projeto do transformador com condutor em alumínio. O projeto segue os limites impostos pela NBR 5440, em termos de perdas em vazio e totais.

**Tabela 6.16 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Perdas no condutor e no núcleo, seção do núcleo e quantidade de camadas BT).**

Projeto	Perdas no Condutor (W)	Perdas no Núcleo (W)	Seção do Núcleo (cm <sup>2</sup> )	Quant. de Camadas BT
Projeto Padrão	199,13	61,06	50,3	2

**Tabela 6.17 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Espiras, resistência, impedância e indução).**

Projeto	Espiras BT	Resistência Percentual	Impedância Percentual	Indução na coluna (Gauss)
Projeto Padrão	52,13	2,87	3,49	15750

**Tabela 6.18 – Detalhes do transformador com condutor de alumínio (Massa do condutor, massa de aço-silício, preço de manufatura e custo total).**

Projeto	Massa Total do Condutor (kg)	Massa Total de Aço-Silício (kg)	Preço de Manufatura (R\$)	Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)
Projeto Padrão	9,47	33,91	1074,08	1202,89

Os custos do projeto foram estimados segundo as Figuras 6.2 e 6.3.



Figura 6.2– Gráfico com preço diário do alumínio [KITCOMETALS, 2011].



Figura 6.3– Gráfico com preço diário do cobre [KITCOMETALS, 2011].

### 6.3.2 – Comparação Entre Projetos de Transformadores com Condutor de Alumínio e de Cobre

As Tabelas 6.19 a 6.21 mostram os dados comparativos entre um projeto com condutor de cobre e outro com condutor de alumínio. Os projetos

foram desenvolvidos visando os limites para as perdas, em vazio e totais, impostos pelas NBR 5440.

**Tabela 6.19 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Perdas no condutor, perdas no núcleo, seção do núcleo e quantidades de camadas).**

Projeto	Perdas no Condutor (W)	Perdas no Núcleo (W)	Seção do Núcleo (cm <sup>2</sup> )	Quant. de Camadas BT
Alumínio	199,13	61,06	50,30	2
Cobre	202,72	61,82	48,03	2

A Tabela 6.19 mostra que em termos de perdas, os transformadores podem ser considerados semelhantes. O transformador com condutor de alumínio necessitou de maior seção do núcleo, para que as perdas no mesmo fossem reduzidas, isto aconteceu devido o tamanho do núcleo ter sido aumentado, devido a quantidade de condutor utilizada, no caso alumínio.

**Tabela 6.20 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Espiras, resistência, impedância e indução).**

Projeto	Espiras BT	Resistência Percentual	Impedância Percentual	Indução na coluna (Gauss)
Alumínio	52,13	2,87	3,49	15750
Cobre	51,33	2,03	2,35	16750

A Tabela 6.20 mostra como esperado, que o condutor de alumínio apresentou maior resistência percentual, implicando em maior impedância percentual. A indução no núcleo foi reduzida no projeto com alumínio para que as perdas em vazio ficassem dentro dos limites impostos pela NBR 5440.

**Tabela 6.21 – Comparação entre os projetos com condutor de alumínio e cobre (Massa do condutor, massa de aço-silício, preço de manufatura e custo total).**

<b>Projeto</b>	<b>Massa Total do condutor (kg)</b>	<b>Massa Total de Aço-Silício (kg)</b>	<b>Preço de Manufatura (R\$)</b>	<b>Custo Total (Perdas capitalizadas) (R\$)</b>
<b>Alumínio</b>	9,47	33,91	1074,08	1202,89
<b>Cobre</b>	10,94	27,52	1134,98	1250,65

A Tabela 6.21 mostra que o peso utilizado de alumínio foi próximo ao utilizado de cobre. Como o alumínio possui peso específico menor, isto quer dizer que o volume utilizado deste material foi bem superior ao utilizado de cobre. Assim o tamanho do núcleo será maior no transformador com alumínio. Entretanto, como o alumínio possui custo aproximadamente 4 vezes menor que o cobre, o preço do transformador com este tipo de material ficou reduzido comparado ao transformador com condutor de cobre. Este custo foi composto considerando que o tanque do transformador será igual nos dois casos, considerando também na mesma quantidade de óleo isolante utilizada nas duas situações.

## Capítulo 7 – Considerações Finais

Através do estudo realizado no projeto de pesquisa P&D entre o LAT-EFEI e a AES Sul, observou-se que os transformadores localizados na zona rural, área de concessão da empresa sob análise, apresentavam um perfil de carregamento baixo. Desta maneira, os transformadores eficientes desenvolvidos para substituir estes transformadores convencionais necessitam ter as perdas no núcleo reduzidas.

Por meio de consultas aos fabricantes, verificou-se que atualmente, existem três soluções praticáveis no mercado para a redução das perdas em vazio. Uma solução seria o emprego de transformadores eficientes dentro dos padrões atualmente normalizados em aço silício, visando especificamente à redução das perdas em vazio. Esta solução apresenta um custo elevado, visto que para se reduzir as perdas em vazio, o projetista precisa direcionar sua atenção para o projeto do núcleo. Para esta solução, utiliza-se demasiada quantidade de aço-silício quando comparada a um transformador padrão, visto que as dimensões do núcleo são aumentadas, principalmente no que diz respeito a seção da coluna. Ao aumentar-se a seção da coluna, reduz-se a densidade de fluxo magnético, implicando assim na redução das perdas no núcleo, considerando-se o fluxo magnético constante.

Outra solução consistiria em utilizar transformadores com núcleo amorfo, onde, via de regra, equipamentos com núcleo obtido a partir de tal tecnologia apresentam custos elevados se comparados a um transformador padrão convencional com núcleo de aço-silício. Em termos comparativos, o transformador com núcleo amorfo, apesar de apresentar perdas em vazio

relativamente baixas, apresenta custos superiores quando confrontados com transformadores eficientes com núcleo convencional de aço-silício. Desta forma, a decisão de utilizar ou não desta tecnologia em projetos deverá depender de uma análise técnico/econômica para verificar a viabilidade de sua implantação.

Na comparação realizada no Capítulo 6, pode-se ver que o custo de manufatura de transformadores com tecnologia de núcleo amorfo é superior ao custo de manufatura dos transformadores desenvolvidos com metodologia da impedância percentual com núcleo de aço-silício. No entanto, o custo total dos transformadores com núcleo amorfo por vir a ser compatível com o custo dos transformadores obtidos com a técnica da impedância percentual. O investimento inicial pode vir a ser compensado com a capitalização das perdas, para ambas as soluções, implicando assim, em solução viáveis. Dessa forma, devido os custos totais serem muito próximos para ambas as soluções, é prudente realizar uma análise técnico/econômica de acordo com os critérios de compra e capitalização adotados pela empresa interessada.

A terceira solução seria a manipulação da impedância percentual através de uma otimização, elevando-a. Conforme demonstrado no Capítulo 6, o aumento da impedância pode resultar em um transformador eficiente para aplicação em zona rural com clientes de perfil de baixo carregamento, e ainda pode apresentar custo inferior ao custo do transformador padrão. Isto é possível devido à menor densidade de fluxo obtida. Deste modo, a menos de mudanças relativas nos custos de manufatura, os transformadores com impedância percentual mais elevada, se mostram, a melhor solução dentre as três possíveis, visto que apresentam perdas em vazio reduzidas e eficiência frente ao tipo de carga, associados a preços de manufatura atrativos.

Neste trabalho também verificou-se a utilização de condutores com material de cobre e de alumínio, tanto no enrolamento BT quanto na AT, em projetos de transformadores monofásicos para serem usados em regiões de baixa demanda. Para este tipo de transformador verificou-se que em termos de perdas, os projetos podem ser considerados semelhantes, visto que estes foram desenvolvidos visando este objetivo. Para que pudessem ser

comparadas, estas perdas estão relacionadas às perdas impostas pela NBR 5440.

O transformador com condutor de alumínio necessitou de maior seção do núcleo, para que as perdas no mesmo fossem reduzidas. O peso utilizado de alumínio foi próximo ao utilizado de cobre. Como o alumínio possui peso específico menor, isto quer dizer que o volume utilizado deste material foi bem superior ao utilizado de cobre. Assim o tamanho do núcleo será maior no transformador com alumínio. Este tamanho está relacionado com a largura e altura da janela, onde aumentando estas dimensões, as perdas no núcleo serão aumentadas por consequência. Assim, devido a este problema, aumentou-se a seção do núcleo e reduziu-se a indução magnética para que as perdas ficassem dentro dos limites impostos pela NBR 5440.

Pôde-se ver ainda que o projeto com condutor de alumínio possui custo de manufatura reduzido comparado ao projeto com condutor de cobre. Isto pode ser explicado pelo custo do alumínio ser aproximadamente 4 vezes menor que o do cobre, considerando que os dois projetos utilizaram o mesmo tanque como também a mesma quantidade de óleo isolante. Diante destes dois projetos, percebeu-se que, ao desenvolver projetos de maior potência, o custo do transformador com condutor de alumínio pode vir a ser maior que o do transformador com condutor de cobre. Isto pode ser explicado devido a grande quantidade de alumínio a ser empregada, implicando na utilização de um tanque maior e uma maior quantidade de óleo isolante utilizado, devido a grande dissipação de calor. Assim, neste caso, o projeto de cobre pode vir a ser mais indicado, considerando o custo de manufatura.

# Contribuição Técnica

## Contribuição na forma de artigos publicados:

Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Coriolano, D. L. e Diniz, A. M. M.. **Influência do Carregamento e da Impedância Percentual nos Projetos de Transformadores Monofásicos para Redes Rurais.** III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. III SBSE. Belém, Pará, Brasil. Maio, 2010.

Coriolano, D. L., Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L. e Diniz, A. M. M.. **Comparação entre Metodologias para Análise Estatística da Carga.** III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. III SBSE. Belém, Pará, Brasil. Maio, 2010.

Diniz, A. M. M., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Nunes, A. A., e Coriolano, D. L.. **Estudo do Remanejamento de Transformadores Instalados na Rede de Média Tensão.** III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. III SBSE. Belém, Pará, Brasil. Maio, 2010.

Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Coriolano, D. L. e Diniz, A. M. M.. **Core Losses Profit in Rural Monophase Transformers by Means of Percent Impedance**

**Optimization.** Modern Electric Power Systems 2010. MEPS'10. Wroclaw, Poland. September, 2010.

Coriolano, D. L., Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L. e Diniz, A. M. M.. **Economical Analysis for Efficient Transformers Projects.** Modern Electric Power Systems 2010. MEPS'10. Wroclaw, Poland. September, 2010.

Diniz, A. M. M., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Nunes, A. A., e Coriolano, D. L.. **Economical Profits in Medium Voltage Networks Obtained by Rearrangement of Installed Transformers.** Modern Electric Power Systems 2010. MEPS'10. Wroclaw, Poland. September, 2010.

Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Coriolano, D. L. e Diniz, A. M. M.. **Ganho de Perdas a Vazio em Transformadores Monofásicos Rurais Através da Otimização da Impedância Percentual.** XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguai. Maio, 2011.

Coriolano, D. L., Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L. e Diniz, A. M. M.. **Análise Financeira dos Projetos de Transformadores Monofásicos Eficientes.** XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguai. Maio, 2011.

Coriolano, D. L., Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L. e Diniz, A. M. M.. **Comparação entre Metodologias para Análise Estatística da Carga.** XIV Encontro Regional

Ibero-americano do CIGRÉ. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguai. Maio, 2011.

Diniz, A. M. M., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Nunes, A. A., e Coriolano, D. L.. **Desbalanceamento no Carregamento de Transformadores Trifásicos no Sistema de Distribuição.** XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguai. Maio, 2011.

Diniz, A. M. M., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Nunes, A. A., e Coriolano, D. L.. **Remanejamento de Transformadores Monofásicos Instalados na Rede de Média Tensão.** XIV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguai. Maio, 2011.

Diniz, A. M. M., Martinez, M. L. B., Wanderley Neto, E. T., de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Nunes, A. A., e Coriolano, D. L.. **Ganhos Econômicos Obtidos através do Remanejamento de Transformadores Instalados na Rede de Média Tensão.** XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. XIX SENDI. São Paulo, SP, Brasil. Novembro, 2010.

Nunes, A. A., Martinez, M. L. B., de Oliveira, H. R. P. M., Salustiano, R., Wanderley Neto, E. T., Batista, E. L., Nóbrega, A. M. e Diniz, A. M. M.. **Efficiency and economical viability of countryside transformers based on percent impedance optimization and amorphous core.** The 21<sup>st</sup> International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED 2011. Frankfurt, Germany. June, 2011.

**Outras contribuições:**

Embasamento teórico para a mudança do valor da impedância percentual na norma NBR 5440 de 1999, durante sua revisão, alterando de 2,5% para 3,0% para os transformadores de 5, 10 e 15 kVA, 15 e 24,2 kV.

## Trabalhos Futuros

Para trabalho futuro, sugere-se a confecção das rotinas para projetos de transformadores, descritas neste trabalho, em uma linguagem de programação mais robusta, como exemplo a linguagem C#, ou JAVA. Sugere-se também aperfeiçoar as rotinas para que as mesmas possam calcular o projeto do tanque, como também do óleo isolante, ou seja, o projeto térmico. Também pode ser trabalho futuro, o aperfeiçoamento da rotina para projeto de transformadores com condutor de alumínio, para que esta rotina possa desenvolver projetos com condutores sendo chapas, e não com seção circular ou retangular, como faz a rotina atual. Por fim, sugere-se também o aperfeiçoamento da rotina que calcula o projeto do transformador com núcleo amorfo, para que o projeto se aproxime das condições reais, visto que a rotina atual desenvolve o projeto com este tipo de material de maneira similar ao projeto com núcleo de aço-silício, mudando apenas o material de aço-silício para amorfo, sendo que a estrutura do núcleo na realidade é diferente nos dois casos.

## Referências bibliográficas

Alibaba. **Fita de Liga Amorfa** Disponível na internet via URL: <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/amorphous-ribbon-284811621.html>.

Arquivo capturado em fevereiro de 2011.

Cardoso, B. P. **Eficiência de Transformadores de Distribuição**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2005.

Cavalcanti, L. F e Luciano, B. A. **Análise da Viabilidade Técnica/Econômica da Utilização de Transformadores com Núcleo Amorfo em Redes Rurais de Distribuição de Energia, Classe 15 kV**. I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, I CITENEL. Brasília, 2001.

de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Martinez, M. L. B., Coriolano, D. L. e Picanço, A. F. **Análise Econômica da Substituição de Transformadores Padrão por Eficientes**. III CBEE - Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Belém - PA, Setembro, 2009.

de Oliveira, H. R. P. M., Batista, E. L., Martinez, M. L. B., Coriolano, D. L., Picanço, A. F. **Análise das Cargas para o Projeto de Transformadores Eficientes**. III CBEE - Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Belém - PA, Setembro, 2009.

Feinberg, R. **Modern Power Transformer Practice**. The Macmillan Press Ltd, 1979.

IEEE Standard C57.110. **IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents.** 1998.

Kennedy, B. W. **Energy Efficient Transformers.** McGraw-Hill, 1998.

Kitcometals. **Alumínio and Cobre.** Disponível na internet via URL: <http://www.kitcometals.com/charts/>. Arquivo capturado em fevereiro de 2011.

Lakervi, E. e Holmes, E. J. **Electricity Distribution Network Design.** Londres, Inglaterra, Ed. Peter Peregrinus Ltd., Vol. 9, 1989.

Luciano, B. A., Batista, T. C., Freire, R. C. S., de Castro, W. B. e Camacho, M. A. G. **Medições das Perdas e da Corrente de Excitação em Transformadores Monofásicos de Baixa Potência com Núcleo de Liga Amorfa: Antes e Depois do Processo de Oxidação.** VIII Semetro. João Pessoa, PB, Brasil. Junho, 2009.

Martignoni, A. **Transformadores.** 8ª ed., Ed. São Paulo: Globo, 1991.

Martin, J. C. **La Escuela del Técnico Electricista: Teoría, Calculo y Construcción de Transformadores.** 3ª ed., vol. VII, Ed. Barcelona: Editorial Labor, S.A., 1957.

Martinez, M. L. B. **Tópicos en transformadores para Sistemas de Media Tensión Seminario dos Gerentes Técnicos e Ingenieros de las Empresas de Transmisión y Distribución de Electricidad en Chile.** Iquique, Outubro, 2009.

Moniz, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Setembro, 2007.

NBR 5380. **Transformadores de Potência: Método de Ensaio**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Maio, 1993.

NBR 5440. **Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição: Padronização**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. Julho, 1999.

Nunes, R. V. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Dezembro, 2007.

Picanço. A. F. **Avaliação Econômica de Transformadores de Distribuição com Base no Carregamento e Eficiência Energética**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Abril, 2006.

Picanço. A. F. **Desenvolvimento de Uma Metodologia para a Aplicação de Transformadores Eficientes com Base nos Perfis de Carregamento**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Agosto, 2009.

Ries, W. **Transformadores – Fundamentos para o Projeto e Cálculo**. 1ª ed., Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

Rodrigues, A. L. **Curva de Histerese**. Disponível na internet via URL:[http://www-seme.dee.fct.unl.pt/ProjectoRuiJardim/Relatorio/Projecto\\_ficheiros/image715.jpg](http://www-seme.dee.fct.unl.pt/ProjectoRuiJardim/Relatorio/Projecto_ficheiros/image715.jpg). Arquivo capturado em fevereiro de 2011.

Square D. **Aluminum vs. Copper**: Conductors in Low Voltage Dry Type Transformers. Bulletin No. 7400PD9601. September, 1996.

Vijai. **Metal Amorfo**. Disponível na internet via URL:<http://www.vijai.com.br/br/amorphous.php>. Arquivo capturado em janeiro de 2011.

Wikipedia. **Correntes de Foucault**. Disponível na internet via URL:[http://pt.wikipedia.org/wiki/Corrente\\_de\\_Foucault](http://pt.wikipedia.org/wiki/Corrente_de_Foucault). Arquivo capturado em fevereiro de 2011b.

Wikipedia. **Histerese**. Disponível na internet via URL:<http://pt.wikipedia.org/wiki/Histerese>. Arquivo capturado em fevereiro de 2011.

# Apêndice A

## Fator de Energia Consumida - FE

O Fator de Energia Consumida (FE) ou Tempo Suprindo a Máxima Potência (TSMP) indica o tempo total durante um dia (24 horas) que o transformador operando a plena carga necessitaria para apresentar as perdas série de um ciclo normal de carga média, segundo equação abaixo:

$$FE = \frac{24}{n_d} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} \left( \frac{S_i}{S_n} \right)^2$$

Onde:

$S_i$  é a potência instantânea em W;

$S_n$  é a potência nominal em W;

$n_d$  é o número de intervalos de tempo utilizados para discretizar a carga diária.

O TSMP calculado para a curva de demanda a seguir é 19,29 horas/dia. Percebe-se, por definição, que a área em destaque da curva de demanda corresponde à área formada pela curva do TSMP.

