

MARCELO CABRAL ARRUDA

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EFICIENTES, VANTAGENS E APLICAÇÃO NO
MERCADO BRASILEIRO**

São Paulo
2015

MARCELO CABRAL ARRUDA

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EFICIENTES, VANTAGENS E APLICAÇÃO NO
MERCADO BRASILEIRO**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída
e Eficiência Energética.

Área de Concentração:

Transformadores de Potência
Eficientes

Orientador: Prof. Dr. José Aquiles
B. Grimoni

São Paulo
2015

Nome: ARRUDA, Marcelo

Título: Transformadores de Potência Eficientes, Vantagens e Aplicação no Mercado Brasileiro

Monografia apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Especialista
em Energias Renováveis,
Geração Distribuída
e Eficiência Energética.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Arruda, Marcelo

Transformadores de Potência Eficientes, Vantagens e Aplicação no Mercado Brasileiro / M. Arruda -- São Paulo, 2015.
65 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Transformadores de Potência. 2. Transformadores de Distribuição. 3. Eficiência Energética I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha esposa que me incentivou a realizar o curso de pós-graduação, me apoiou na realização desta monografia e ao meu filho que em sua inocência soube respeitar os momentos em que me dediquei aos estudos.

Também dedico este trabalho aos meus pais que sempre valorizaram meu estudo e meu crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Aquiles que me orientou e guiou na elaboração desta monografia.

Agradeço igualmente a todos os professores do PECE-Poli pela dedicação e comprometimento durante as aulas ministradas.

Diz-me e o esqueço, ensina-me e o
recordo, envolve-me e o aprendo.
(Benjamin Franklin)

RESUMO

Transformadores são equipamentos altamente eficientes, porém como todo equipamento elétrico possui perdas.

Com o avanço das novas tecnologias, e o aumento da conscientização mundial sobre a necessidade de reduzir as perdas no sistema elétrico de geração, transmissão e distribuição, avançaram as pesquisas em melhoria da eficiência de transformadores. Este trabalho avalia as principais tecnologias disponíveis no mercado para a melhoria de eficiência de transformadores de distribuição isolados à óleo.

Também são analisadas as novas regulamentações nacionais e internacionais que estão em implementação ou já em uso pelos fabricantes de transformadores de distribuição.

Por fim, são avaliadas as vantagens no uso de transformadores de distribuição eficientes no mercado brasileiro.

ABSTRACT

Power transformers are equipment with high efficient levels, however as any other electrical devices, there are losses in the power conversion.

With the advance of new technologies and the worldwide effort to reduce losses in the electrical power systems (generation, transmission and distribution system), the research on efficiency of power transformers increased.

This monograph will evaluate the main technologies available in the market to improve the efficiency of power distribution liquid filled transformers.

This monograph will also, analyze the new national and international regulations, which are in implementation or in use by the distribution transformer manufactures.

The last part of this document will assess the advantages of the use of efficient distribution power transformers in brazilian market.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Características dos Transformadores de Distribuição.....	2
Figura 2.2 - Desenho Esquemático de um Transformador Ideal.....	3
Figura 2.3 - Vistas Esquemáticas de Transformadores (a) Núcleo Envolvido e (b) Núcleo Envolvente	4
Figura 2.4 - Domínios Magnéticos Orientados Aleatoriamente (à esquerda) e Orientados no Sentido do Campo Magnético (à direita).....	6
Figura 2.5 - Fluxos Concatenados e Mútuo em um Núcleo de Transformador	7
Figura 2.6 - Circuito para Ensaio de Curto Circuito para Transformadores Monofásico de dois Enrolamentos.....	8
Figura 2.7 - Circuito para Ensaio de Transformador à Vazio e Corrente de Excitação em Transformadores Monofásicos sem Transformadores para Instrumentos	9
Figura 3.1 - Exemplo de Transformadores com Núcleo Laminado à 90° (figura superior) e laminado à 45 °	13
Figura 3.2 - Representação gráfica da diminuição do núcleo através da alteração de camadas no primário e secundário do transformador	15
Figura 3.3 - Diferenças na estrutura dos materiais cristalinos e amorfos	15
Figura 3.4 - Produção de Ligas Amorfas.....	16
Figura 3.5 - Exemplo de Filmes Amorfos	17
Figura 3.6 - Exemplo de Construção de Transformador Trifásico com Núcleo Amorfo	20
Figura 3.7 - Comparação de Montagem de Transformadores com (A) Núcleo Construído com Aço Silício de Grão Orientado, (B) Liga Amorfa E (C) Por Chapas de Aço Silício e Liga Amorfa	23
Figura 4.1 – Placa Característica de Transformador atendendo a nova regulamentação de eficiência energética para o mercado europeu	31
Figura 4.2 - Selo INMETRO para Transformadores de Distribuição Isolados À Óleo – Proposta Portaria 378	34
Figura 4.3 - Selo INMETRO Criado a partir da Portaria 488, para Transformadores de Distribuição Novos	34
Figura 5.1 – Comparação de custo de transformadores com tecnologia convencional e amorfo	38
Figura 5.2 - Inserção de Parâmetros da Instalação utilizando ferramenta online.....	39

Figura 5.3 - Inserção de Dados do Transformador.....	39
Figura 5.4 - Comparativo de dois transformadores de mesma potência, construídos com tecnologias diferentes – TCX-75A (Amorfo) e TCX-75 (Aço Silício).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Potencial de Economia de Energia com o Emprego de Transformadores de Distribuição Eficientes em Países Seleccionados	10
Tabela 3.2 – Perdas Anuais em Transformadores e Potencial anual de economia com o uso de materiais amorfos	21
Tabela 3.3 – Resumo de Perdas, Eficiência e Custos para Transformadores Fabricados com Núcleo Misto (Aço Silício e Liga Amorfa).....	24
Tabela 4.1 - Escopo NEMA TP1	26
Tabela 4.2 - Eficiência para transformadores de distribuição fabricados a partir de Jan/2016 de acordo com a Norma 10 CFR 431 - Subparte K.....	27
Tabela 4.3 - Valor máximo de perdas em carga e em vazio (em W) para transformadores trifásicos de média potência imersos em líquido isolante.....	29
Tabela 4.4 - Requisitos mínimos aplicáveis ao Índice de Eficiência de Pico para transformadores de grande potência imersos em líquido isolante	30
Tabela 4.5 – Valores padrões de perdas em transformadores de distribuição, estabelecidos na Norma 5440 publicada em 05.06.2014.....	35
Tabela 5.1 – Cálculo das Perdas Técnicas para 2 modelos de Transformadores com potência de 75kVA	41
Tabela 5.2 – Resultado Financeiro.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Perdas no Sistema de Transmissão e Distribuição como Porcentagem da Produção Total de Energia Produzida.....	11
Gráfico 3.2 - Perfil de Consumo das Famílias Brasileiras	12
Gráfico 3.3 - Curva de Magnetização da liga amorfa e do aço silício.....	17
Gráfico 3.4 – Ciclo de Histerese da liga amorfa (amorphous metal) e do aço silício (silicon steel).....	18
Gráfico 4.1 - Comparação das Políticas de Eficiência em Transformadores de Distribuição Trifásicos	32
Gráfico 5.1 – Fluxo de Caixa Descontado	42
Gráfico 5.2 – Fluxo de Caixa Acumulado	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	Asea Brown Boveri;
AMDT	Amorphous core distribution transformer;
AMCCDT	Amorphous-CRGO core distribution transformer;
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil);
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais (Brasil);
CRGO	Cold-rolled grain oriented;
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz;
DOE	Department of Energy (USA);
GE	General Electric Company;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Brasil);
IEA	International Energy Agency;
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers;
IEC	International Electrotechnical Commission;
MEPS	Padrões Mínimos de Desempenho Energético;
NEMA	Associação dos Fabricantes de Equipamentos Elétricos Nacional (USA);
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Brasil);
PEE	Programa de Eficiência Energética;
UE	União Europeia;

LISTA DE SÍMBOLOS

V_p = Tensão primária (V);

V_s = Tensão secundária (V);

N_1 = Número de espiras no primário;

N_2 = Número de espiras no secundário;

I_1 = Corrente primária (A);

I_2 = Corrente secundária (A);

H = Intensidade de campo magnético;

T = Tesla;

μ = Permeabilidade magnética do material

ϕ_{DP} = Fluxo concatenado no enrolamento primário;

ϕ_{DS} = Fluxo concatenado no enrolamento secundário;

η = Rendimento;

SUMÁRIO

Capítulo	Descrição	Página
1	Introdução	1
2	Conceito	2
3	Eficiência dos Transformadores	10
4	Regulamentação	26
5	Capitalização da Perdas	36
6	Conclusão	44
7	Bibliografia	46

1 Introdução

1.1 Objetivo

O Objetivo deste trabalho pretende analisar as diferentes tecnologias existentes no mercado aplicadas a melhora de eficiência energética de transformadores de distribuição. O trabalho irá se dedicar a transformadores de distribuição isolados à óleo, limitando-se a baixas potências.

O trabalho também irá avaliar as regulamentações existentes no mercado mundial a respeito de eficiência energética aplicada à transformadores de distribuição e discutirá a viabilidade da aquisição de transformadores no mercado brasileiro.

1.2 Motivação

O estudo da eficiência energética em empreendimentos e equipamentos, permite ao engenheiro eletricista um visão mais detalhada da instalação e aprofundamento no uso de equipamentos. Permite também o aprimoramento dos conceitos aprofundados de engenharia tornando-lhe um profissional diferenciado no mercado.

O abrangente uso de transformadores, assim como a diversidade de modelos e tecnologias incentiva a pesquisa no desenvolvimento deste tipo de equipamento.

A descoberta de novos métodos construtivos, ou mesmo novas tecnologias, permitirá grandes reduções de consumo de energia e melhora da eficiência de transformadores, sendo este, item presente em qualquer estágio do sistema elétrico.

2 Conceito

Transformadores são equipamentos que permitem a amostragem de corrente ou tensão, a conversão de tensão em níveis diferentes e também a conversão de impedâncias.

Este equipamento é largamente utilizado no sistema elétrico, o mesmo possibilitou o desenvolvimento e utilização da energia elétrica em corrente alternada. Através dos transformadores, foi vencida as dificuldades de geração e transmissão de energia elétrica para longas distâncias.

Os transformadores podem ser divididos em duas classes, de alta potência quando utilizados no sistema de transmissão e de distribuição quando utilizados para reduzir os níveis de tensão das linhas de transmissão, para valores mais baixos que serão utilizados nas indústrias ou em centros urbanos.



Figura 2.1 - Características dos Transformadores de Distribuição
Fonte: Autor

Os transformadores são equipamentos de construção relativamente simples quando comparados a outras máquinas elétricas. Entretanto, a teoria eletromagnética referente ao seu funcionamento pode ser considerada complexa. Sua construção mais tradicional é feita basicamente com chapas de aço silício agrupadas e enroladas posteriormente com material condutor, sendo o cobre e o alumínio os mais utilizados.

2.1 Transformador Ideal

Um transformador ideal é um dispositivo sem perdas com um enrolamento de entrada e um ou mais enrolamentos de saída. As relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e, entre a corrente de entrada e a corrente de saída, são dadas por duas equações simples. (CHAPMAN, 2013)

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1) \quad \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2)$$

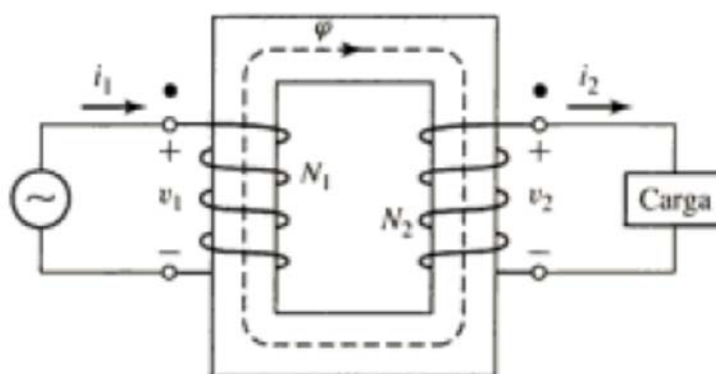


Figura 2.2 - Desenho Esquemático de um Transformador Ideal
Fonte: Del Toro (1999)

O transformador representado na Figura 2.2, possui forma construtiva denominada núcleo envolvido. Esta representação, embora menos utilizada na prática, permite fácil assimilação dos conceitos presentes no estudo de transformadores.

O enrolamento primário do transformador (à esquerda) ao ser alimentado por uma tensão alternada de frequência 60Hz (por exemplo), irá produzir uma tensão também alternada de mesma frequência no enrolamento secundário. Contudo, dependendo da quantidade de espiras do secundário, esta tensão poderá ser igual, maior ou menor do que a tensão aplicada no primário.

A corrente alternada (I_1) ao passar pelo condutor do enrolamento primário/secundário, produzirá por sua vez um campo magnético de intensidade H , que de acordo com a Lei de Ámpere será:

$$H = \frac{N \cdot i}{l_n} \quad (3)$$

Os núcleos dos transformadores, construídos com materiais ferromagnéticos possuem alta permeabilidade (μ) à passagem do campo magnético. Desta forma, o campo magnético é conduzido por todo o núcleo através do fluxo magnético (ϕ), gerando no enrolamento secundário uma tensão alternada maior ou menor do que a aplicada no primário de acordo com a equação 1.

O fluxo magnético é dado pela seguinte equação:

$$\phi = B * A \quad (4)$$

Onde:

B= Densidade de fluxo magnético resultante = $\mu * H$

A= área da seção reta do núcleo

Ao se conectar uma carga nos terminais secundários, fecha-se o circuito fazendo circular corrente.

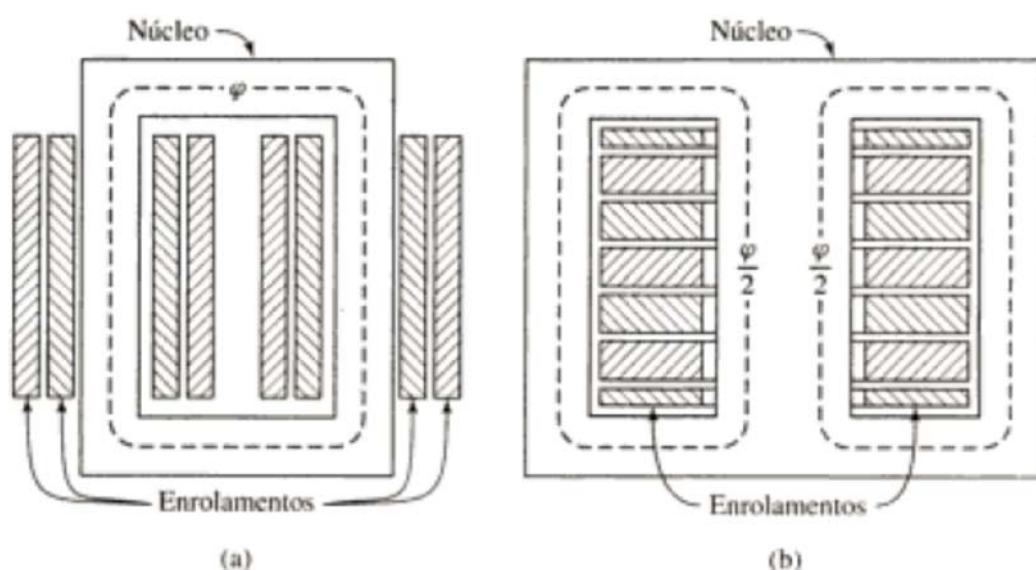


Figura 2.3 - Vistas Esquemáticas de Transformadores (a) Núcleo Envolvido e (b) Núcleo Envolvente
Fonte: Stephen D. Umas (2014)

2.2 Perdas

Idealmente, toda a potência elétrica que entra no primário do transformador, deveria ser entregue no secundário, no entanto algumas perdas são verificadas.

2.2.1 Perdas no Enrolamento

2.2.1.1 Perdas no cobre (I^2R)

As perdas no cobre são as perdas devido ao aquecimento resistivo nos enrolamentos primário e secundário do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da corrente nos enrolamentos. (CHAPMAN, 2013)

2.2.2 Perdas no Núcleo

2.2.2.1 Perdas por Correntes Parasitas

As perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault, ocorrem devido ao aquecimento resistivo, causado pela passagem de corrente elétrica no núcleo do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador.

De acordo com Stephen Chapman em (CHAPMAN, 2013), a quantidade de energia perdida devido às correntes parasitas depende do tamanho dos vórtices de corrente e da resistividade do material dentro do qual circulam as correntes. Quanto maior o vórtice, maior será a tensão induzida resultante (devido ao maior fluxo no interior do vórtice). Quanto maior a tensão induzida, maior será o fluxo de corrente resultante e, portanto, maiores serão as perdas do tipo I^2R . Por outro lado, quanto maior a resistividade do material em que as correntes fluem, menor será o fluxo de corrente para uma dada tensão induzida no vórtice.

Desta forma, para reduzir as perdas por corrente parasita, um núcleo ferromagnético, submetido a um fluxo magnético alternado, pode ser dividido em muitas camadas ou lâminas delgadas, então o tamanho máximo de um vórtice de corrente será reduzido, resultando uma tensão induzida menor, uma corrente menor e perdas menores. Essa redução é grosseiramente proporcional à espessura dessas lâminas, de modo que as mais finas são melhores. O núcleo é construído com muitas lâminas em paralelo. Uma

resina isolante é usada entre elas, limitando os caminhos das correntes parasitas a áreas muito pequenas. Como as camadas isolantes são extremamente finas, há uma diminuição das perdas por correntes parasitas e um efeito muito pequeno sobre as propriedades magnéticas do núcleo

2.2.2.2 Perdas por Histerese

Toda vez que o núcleo do transformador é magnetizado (material ferromagnético), os domínios presentes no núcleo são orientados na direção do campo magnético. Ao se retirar o campo magnético, os domínios não voltam a posição original.

Como o campo magnético se altera a cada semiciclo, os domínios são forçados a mudar de posição a cada semiciclo também, gastando uma energia para realizar a mudança de direção dos domínios.

As perdas por histerese estão associadas à alteração da configuração dos domínios magnéticos no núcleo durante cada semiciclo. Elas são uma função não linear, complexa, da tensão aplicada ao transformador.

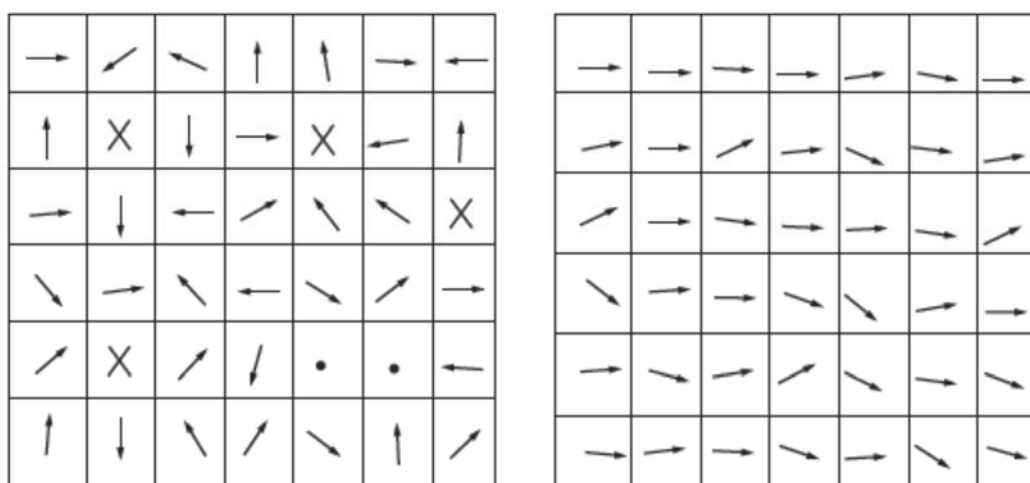


Figura 2.4 - Domínios Magnéticos Orientados Aleatoriamente (à esquerda) e Orientados no Sentido do Campo Magnético (à direita)

Fonte: Stephen Chapman (2013)

Existem também outros fatores construtivos que podem aumentar as perdas por histerese no núcleo, tais como:

- Ferro e aço submetidos a tratamento a frio;
- Concentração alta de carbono na fabricação do aço;
- Imperfeições ou impurezas naturais dos materiais envolvidos na fabricação.

2.2.2.3 Fluxo de Dispersão

Os fluxos ϕ_{DP} e ϕ_{DS} que escapam do núcleo e passam através de apenas um dos enrolamentos do transformador são conhecidos como fluxos de dispersão.

Esses fluxos que se dispersaram produzem uma indutância de dispersão nas bobinas primária e secundária.

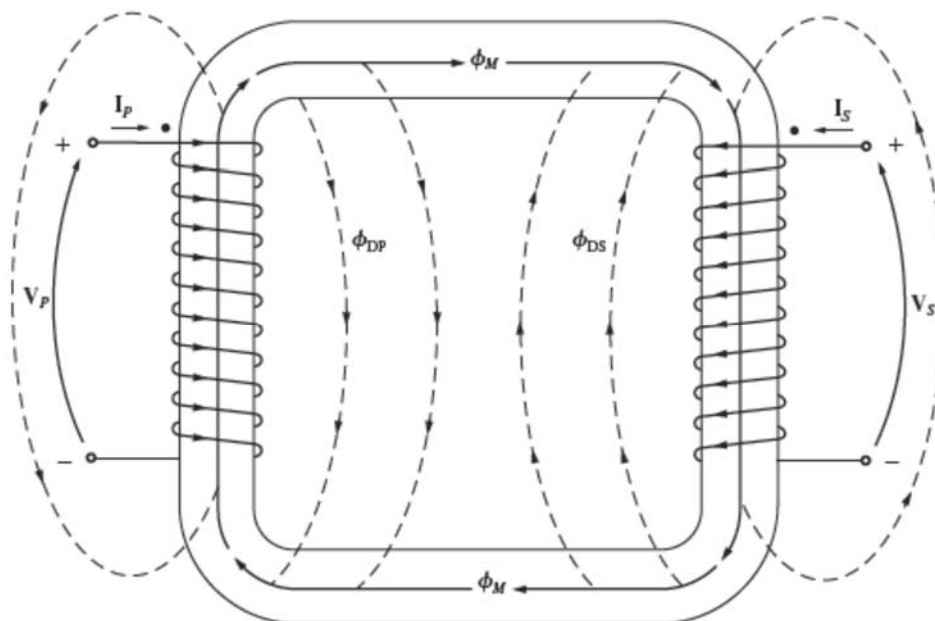


Figura 2.5 - Fluxos Concatenados e Mútuo em um Núcleo de Transformador
Fonte: Stephen Chapman (2013)

Segundo Stephen D. Umas (FITZGERALD, et al., 2010), os fluxos de dispersão produzem quedas de tensão nas reatâncias de dispersão dos enrolamentos e em geral reduzem o fluxo mútuo abaixo do nível que, de outra forma, seria produzida pela tensão aplicada.

2.2.3 Métodos para Determinação das Perdas

A norma NBR 5356-1 estabelece os critérios para ensaios de transformadores de potência que também são aplicados á transformadores de distribuição. Estes ensaios possibilitam o conhecimento das perdas no núcleo e também das perdas no enrolamento do transformador.

2.2.3.1 Ensaio em Curto Circuito

O teste no transformador, conhecido como ensaio de curto circuito, tem como objetivo conhecer as perdas no enrolamento. Dito em muitos livros como perdas no cobre, pode representar a perda no enrolamento composto por qualquer que seja o material (exemplo alumínio).

O teste é feito através do curto circuitamento de um dos enrolamentos do transformador (primário ou secundário), em geral se curto circuita o secundário quando o transformador é abaixador ($V_1 > V_2$), desta forma a corrente a ser medida no primário possui um valor menor e pode ser verificada através de um instrumento menos robusto. A Figura 2.6, demonstra o circuito para testes de curto circuito.

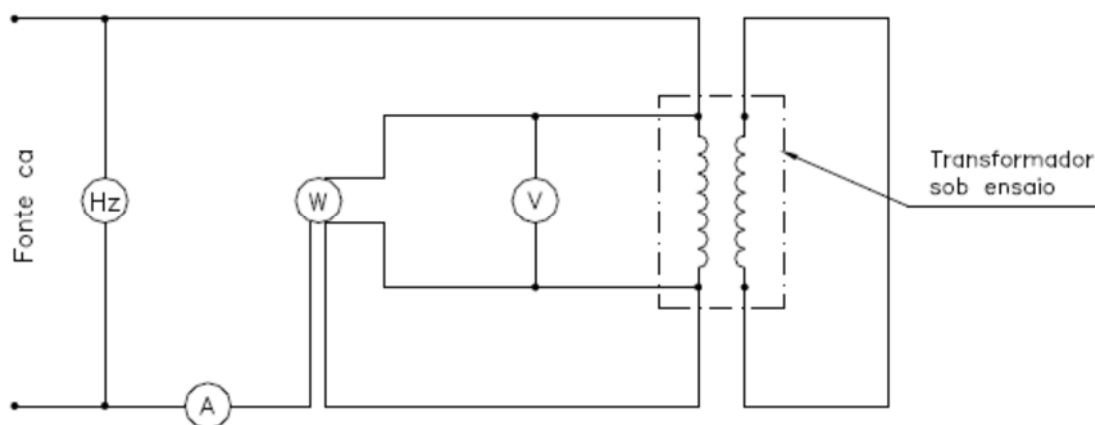


Figura 2.6 - Circuito para Ensaio de Curto Circuito para Transformadores Monofásico de dois Enrolamentos

Fonte: ABNT NBR5356 (2014)

2.2.3.2 Ensaio à Vazio

O teste conhecido como ensaio à vazio, objetiva conhecer as perdas no núcleo do transformador. Essas perdas podem ser medidas com o transformador sem carga.

Alimentando-se o transformador com tensão no lado primário, é possível através de alguns instrumentos, conhecer a potência consumida no núcleo do transformador.

A Figura 2.7, demonstra o circuito para teste do transformador à vazio. A corrente, tensão e potência medidas são utilizadas para determinação da potência perdida no núcleo do transformador. As outras medições possibilitarão encontrar o fator de potência do circuito (F_p) e a corrente de excitação.

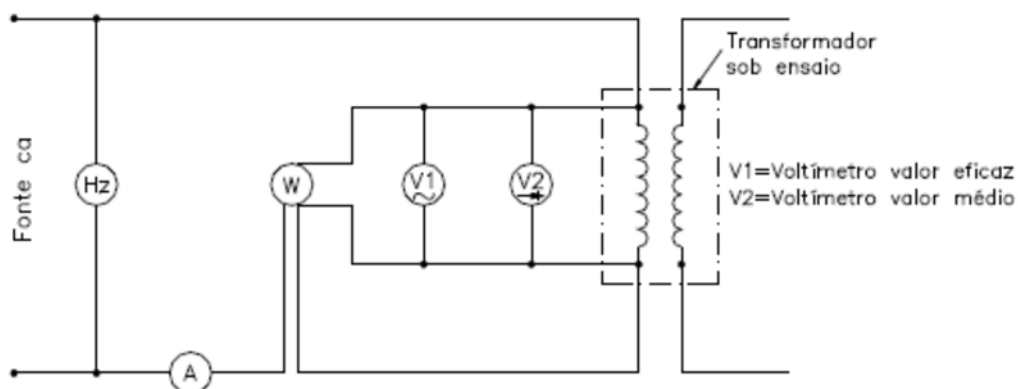


Figura 2.7 - Circuito para Ensaio de Transformador à Vazio e Corrente de Excitação em Transformadores Monofásicos sem Transformadores para Instrumentos
Fonte: ABNT NBR5356 (2014)

De acordo com a norma NBR 5356, para se obter o valor das perdas à vazio (P_m) em um transformador, a tensão de ensaio deve ser ajustada por um voltímetro que mede o valor médio de tensão, mas que é graduado de modo a fornecer o valor eficaz de uma tensão senoidal com o mesmo valor médio. O valor lido por esse voltímetro é U' . Simultaneamente, um voltímetro medindo o valor eficaz de tensão deve estar conectado em paralelo com o voltímetro de valor médio e a tensão U que ele indica deve ser registrada.

O cálculo das perdas à vazio será:

$$P_o = P_m * (1 + d) \quad (5)$$

Onde:

P_o = Perdas à vazio corrigida;

P_m = Perdas à vazio medida;

$$d = \frac{U' - U}{U'}$$

3 Eficiência dos Transformadores

A eficiência de um transformador, depende da aplicação para o qual este foi projetado (DEL TORO, 1999).

Tomando a premissa que estamos tratando apenas de transformadores de distribuição isolados à óleo, a eficiência de um transformador é medida descontando-se a suas perdas, sendo elas no núcleo e enrolamento.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \rightarrow \eta = 1 - \frac{\Sigma perdas}{P_{entrada}} \quad (6)$$

onde:

$$\Sigma perdas = perdas \text{ no núcleo} + perdas \text{ no cobre}$$

A eficiência de um transformador é alta, em torno de 97% dependendo de seu tamanho, no entanto devido a quantidade de transformadores utilizados no sistema elétrico, os 3% restantes se somados representam um grande desperdício de energia. Como mostrado na Tabela 3.1, o potencial de energia que pode ser economizado com a aplicação de transformadores de distribuição eficientes chega a 150TWh por ano, o que equivale a **1,5 vezes** a energia produzida pela hidroelétrica de Itaipu no ano de 2013.(Itaipu, 2015)

Pais/Região	Perdas Anuais em Transf. de Distribuição (TWh)	Potencial de economia (TWh)	Redução anual de emissões de gases que causam efeito estufa (milhões de Ton. CO2)
EU-25	55	22	9
USA	141	84	60
Australia	6	3+	3
India	6	3	3
China	55	25	25
Japan	32	13	6 – 8
TOTAL	295	150	106

Tabela 3.1 - Potencial de Economia de Energia com o Emprego de Transformadores de Distribuição Eficientes em Países Selecionados
Fonte: Leonardo Energy (2004)

As perdas nos sistemas de transmissão e distribuição representam aproximadamente 8% de toda a energia elétrica produzida globalmente, como pode ser observado no

Gráfico 3.1. Nela podemos verificar que as perdas de energia no Brasil representam mais de 15% de toda a energia produzida.

A redução nas perdas dos transformadores, além da economia de energia, também promove a redução da emissão de CO₂ pertinente a produção de eletricidade.

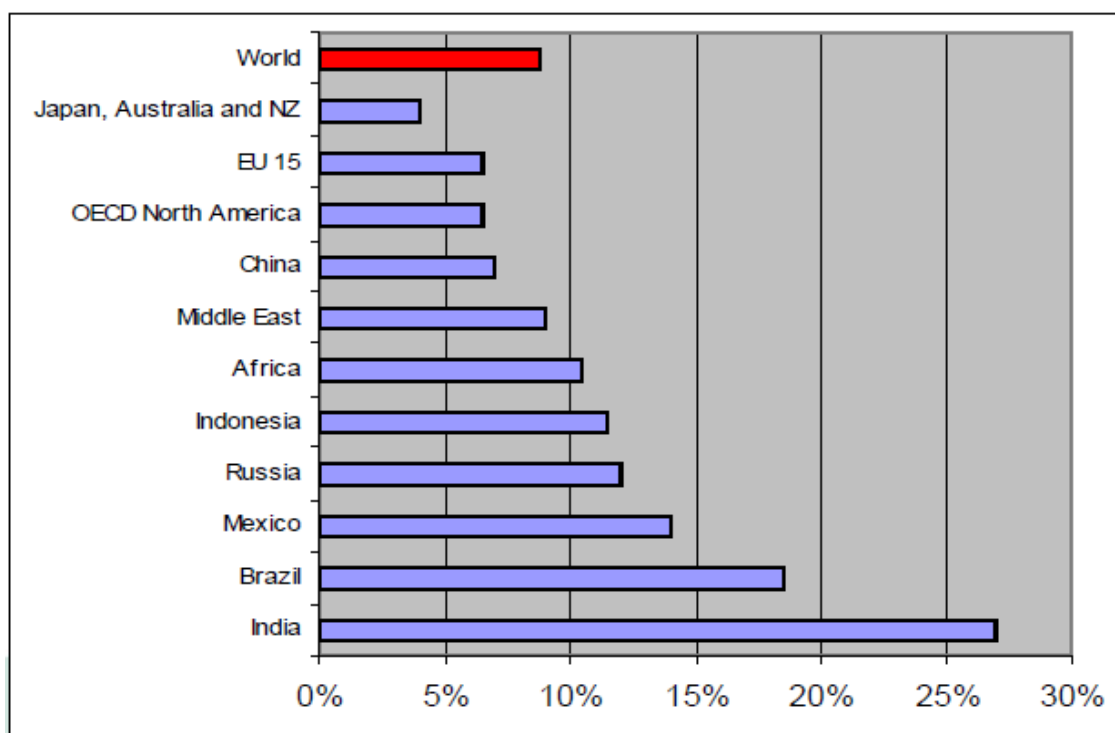


Gráfico 3.1 - Perdas no Sistema de Transmissão e Distribuição como Porcentagem da Produção Total de Energia Produzida

Fonte: International Energy Agency (2004)

Transformadores utilizados na indústria são altamente carregados, ou seja, a carga demandada do transformador está próxima da carga nominal do equipamento. Entretanto, transformadores utilizados em redes de distribuição residências ou rurais são submetidos à ciclos de carga durante o dia, de acordo com as atividades típicas das famílias, como pode ser visto na Gráfico 3.2.

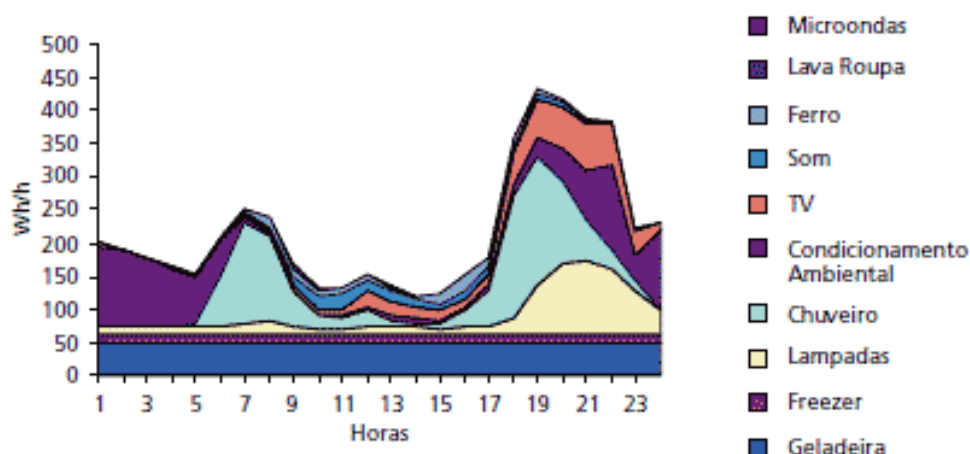


Gráfico 3.2 - Perfil de Consumo das Famílias Brasileiras
Fonte: Procel (2009)

Observa-se no Gráfico 3.2, que durante boa parte do dia, o consumo típico de uma família restringe-se a menos da metade do consumo registrado nos horários de pico (das 18:00hs às 21:00hs).

No caso de transformadores voltados para aplicação industrial ou comercial, o correto dimensionamento do transformador pode diminuir os impactos das perdas à vazio no sistema. Já no caso de transformadores em redes de distribuição residências/rurais o dimensionamento justo do transformador não é adequado, visto que o perfil de carga é muito variável.

Existe um grande potencial de economia de energia com o emprego de transformadores mais eficientes no atual sistema elétrico. Especialmente em países menos desenvolvidos, como é o caso do Brasil.

Visando diminuir as perdas em transformadores, diversas ações estão sendo estudadas, algumas delas já apresentaram resultados muito satisfatórios.

3.1 Soluções para Redução das Perdas em Transformadores

3.1.1 Alterações construtivas do Núcleo

A revisão dos padrões de construção dos núcleos de transformadores, se mostraram uma grande alternativa no aumento da eficiência dos transformadores à seco, quando comparados aos núcleos de ligas amorfas, que são mais caros.

Os núcleos dos transformadores são tradicionalmente construídos em lâminas formando ângulos de 90° , isso é feito para diminuir custos e acelerar a produção.

Pesquisas mostraram que a alteração no design do núcleo permite aumento de eficiência. As lâminas dos núcleos cortadas à 45° aumentam o acoplamento magnético e consequentemente a permeabilidade magnética do núcleo (MILLER, 2015)

O custo e tempo de produção do núcleo do transformador aumentam aplicando-se essa forma de construção, no entanto, pode ser realizada por qualquer fabricante.

Grandes empresas que atuam no mercado americano e, também brasileiro, por exemplo as empresas Thomas & Betts e Eaton, aplicaram estes novos conceitos de produção em pequenos transformadores instalados em Data Center. Estes fabricantes visam atender as novas normas americanas de eficiência para transformadores (NEMA TP1).



Figura 3.1 - Exemplo de Transformadores com Núcleo Laminado à 90° (figura superior) e laminado à 45°

Fonte: EATON Ltda (2007)

Este tipo de alteração construtiva ainda não foi aplicada à transformadores de distribuição isolados à óleo, porém representa uma alternativa a ser estudada pelos fabricantes.

3.1.2 Aumento na Impedância Porcentual

Estudos indicam que o aumento da impedância porcentual, embora causem o aumento das perdas no enrolamento, possibilitam a diminuição das perdas à vazio nos transformadores.

O aumento da impedância porcentual é feito através do aumento do número de espiras nos enrolamento do transformador, causando a diminuição da indutância magnética, devido a redução do fluxo magnético, que por fim resulta em menores perdas à vazio, considerando a seção do núcleo constante (NUNES, 2015).

Esta relação pode ser verificada através da equação 7 abaixo:

$$n_s = \frac{10^8 * (\frac{V_s}{2})}{4,44 * f * \varnothing} \quad (7)$$

Onde:

n_s = número de espiras do secundário;

V_s = Tensão do secundário em (V);

f = frequência (Hz);

\varnothing = fluxo no núcleo (Maxwells).

Quando aplicada à transformadores com baixo carregamento, exemplo de transformadores monofásicos para aplicações rurais e, utilizando-se de bobinas em camadas, verifica-se a possibilidade de diminuição da janela do núcleo.

O aumento da impedância porcentual implica no aumento das perda no enrolamento, no entanto devido ao baixo carregamento destes transformadores, esse aumento não terá grande relevância.

Desta forma, temos uma redução de massa que representa menor custo de fabricação e também maior eficiência.

De acordo com Nunes (2015), conseguiu-se reduzir ainda mais as perdas em vazio dos projetos desenvolvidos, através do aumento do número de camadas das bobinas BT e AT, que implica diretamente na altura da bobina, reduzindo-a, resultando em

uma menor altura de janela, implicando também uma menor massa de aço-silício utilizada.

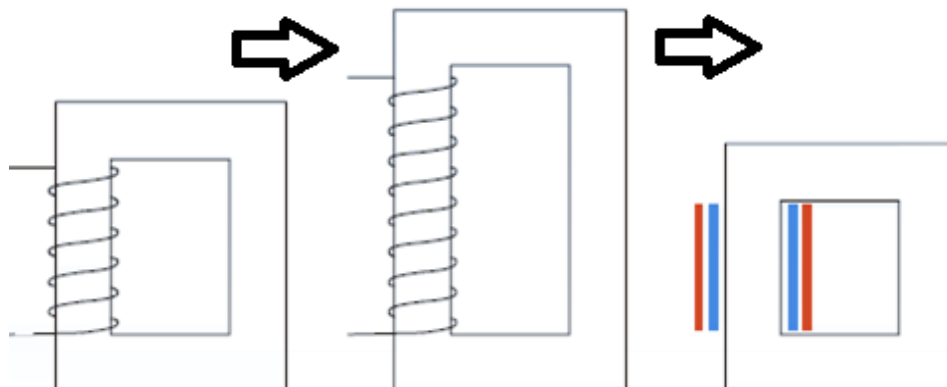


Figura 3.2 - Representação gráfica da diminuição do núcleo através da alteração de camadas no primário e secundário do transformador
Fonte: Leonardo Energy (2010)

3.1.3 Uso de Materiais Amorfos e suas Características

Os materiais amorfos surgiram como solução para redução das perdas a vazio de transformadores na década de 70, desde então o uso de transformadores de distribuição construídos com núcleos formados por chapas de ligas amorfas (Ferro, Boro e Silício) somente cresceu (VIEIRA, 2015).

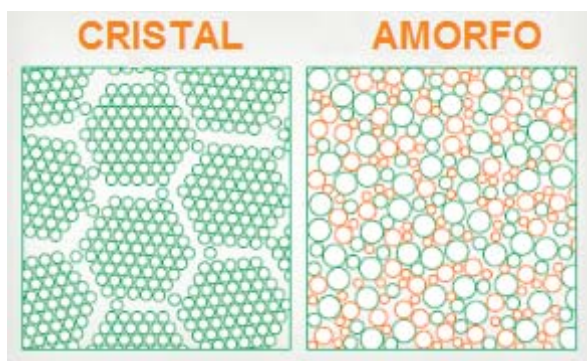


Figura 3.3 - Diferenças na estrutura dos materiais cristalinos e amorfos
Fonte: ABB (2015)

3.1.3.1 Processo de Fabricação de Ligas Amorphas

A produção das ligas amorphas é representada na Figura 3.4. O composto de $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ é aquecido a 1300°C em um forno de indução. Depois o material é despejado sobre um cilindro rotativo para rápida solidificação. O fluxo sobre o cilindro é então resfriado à uma taxa de 106K/s , resultando em lâminas de espessura de 17 a $25\mu\text{m}$.

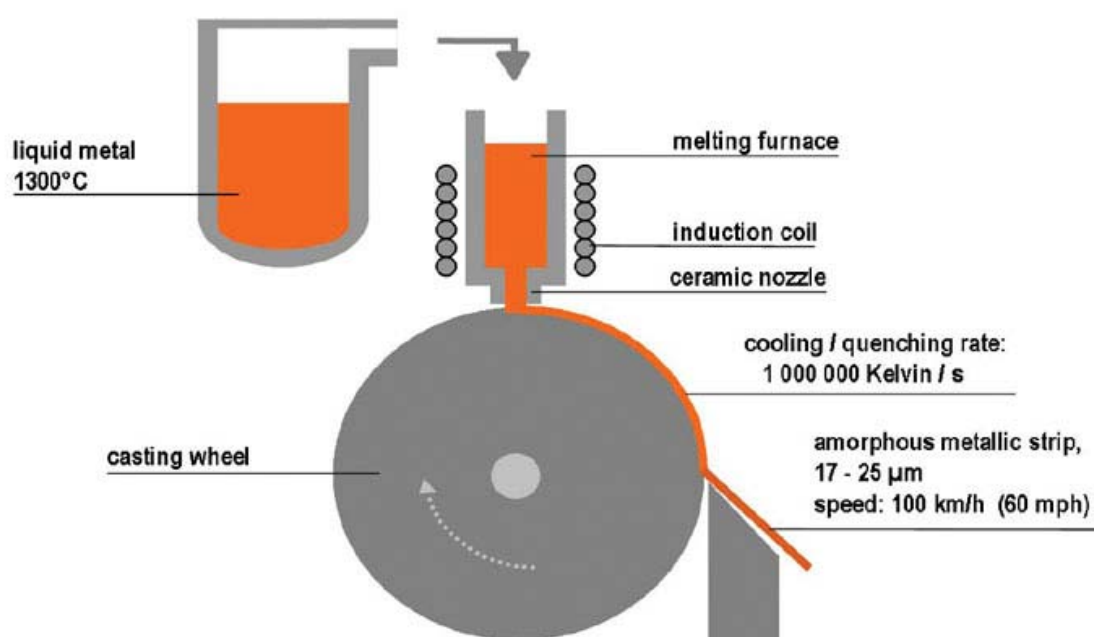


Figura 3.4 - Produção de Ligas Amorphas
Fonte: Hitachi (2010)

Como pode ser observado, as ligas amorphas, embora representem uma solução para a redução de perdas à vazio em transformadores, são de difícil produção, a importação também possui restrições, visto que atualmente existe apenas um produtor global deste material, estando localizado no Japão (VIEIRA, 2015).



Figura 3.5 - Exemplo de Filmes Amorfos
Fonte: Hitachi (2010)

3.1.3.2 Curvas de Magnetização

A capacidade de magnetização de um material é expressa pela relação entre indução magnética B e o campo magnético H . Os Gráfico 3.3 e Gráfico 3.4, comparam as ligas amorfas e aço silício. É possível verificar que a curva de magnetização da liga amorfa $\text{Fe}_{80}\text{B}_{11}\text{Si}_9$ sofre menos variação quando o material é submetido ao campo magnético.

As ligas amorfas possuem alta permeabilidade magnética (μ) e ciclo de histerese menor. Assim, as perdas por histerese nas ligas amorfas são menores se comparadas ao aço silício de grão orientado.

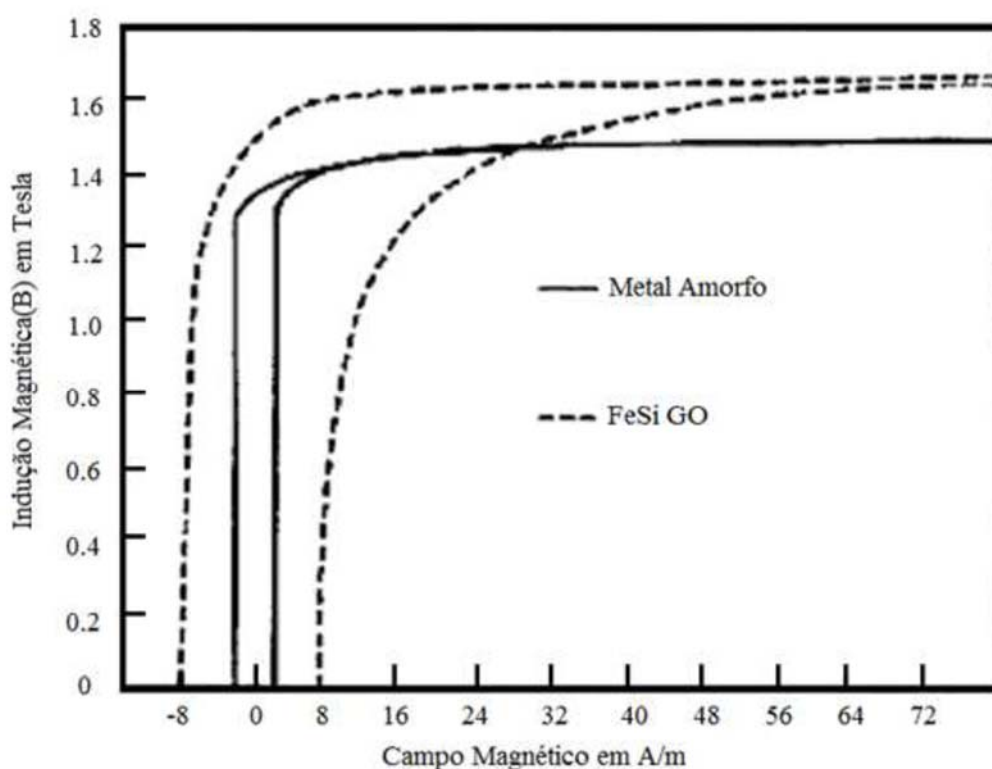


Gráfico 3.3 - Curva de Magnetização da liga amorfa e do aço silício
Fonte: Leonardo Energy (2011)

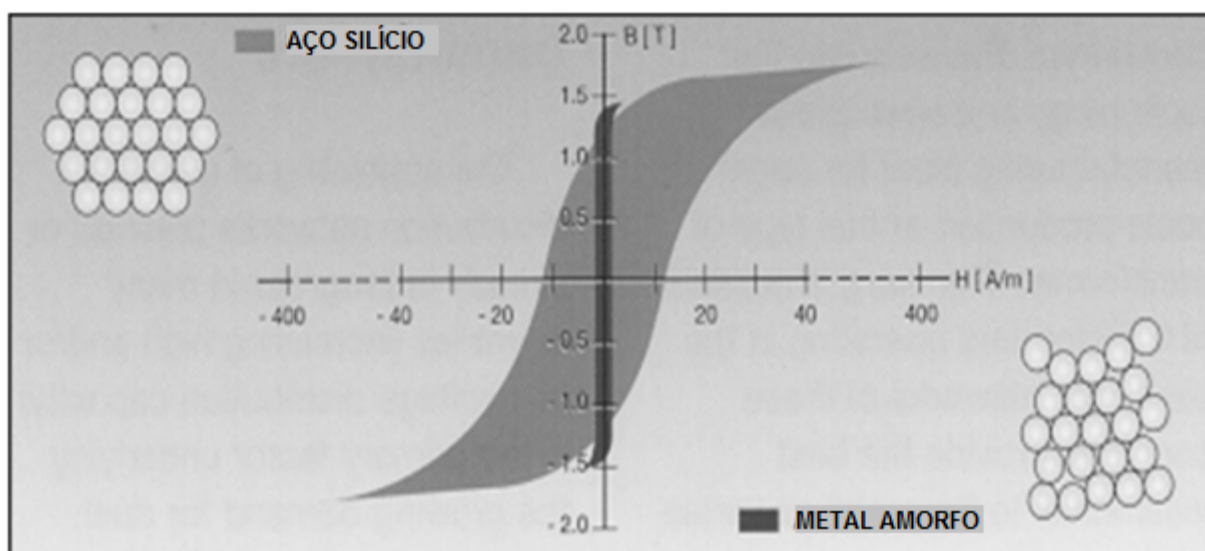


Gráfico 3.4 – Ciclo de Histerese da liga amorfa (amorphous metal) e do aço silício (silicon steel)
 Fonte: Powels Trafo Ltda (2004)

3.1.3.3 Espessura e Dureza das Lâminas

As chapas do metal amorfo têm espessura da ordem de dez vezes mais finas que as chapas de aço silício convencionais, devido à necessidade de resfriamento rápido na fundição do metal amorfo. Porém, tal processo causa um aumento nos custos de produção, pois o corte deste material necessita técnicas avançadas, perícia e uso de ferramentas especiais, devido sua a grande dureza, que é da ordem de quatro vezes maior que o aço silício (CAMPOS, 2015).

3.1.3.4 Fator de Empilhamento

Devido as características de alta dureza e pequena espessura das lâminas de ligas amorfas, estas possuem um fator de empilhamento (ou fator de empacotamento) de aproximadamente 80%. Nos transformadores montados com chapas de aço silício, este fator é da ordem de 95% dos transformadores. Para corrigir este problema, é necessário aumentar a área da seção do núcleo do transformador.

3.1.3.5 Efeito de Recozimento

De acordo com (CAMPOS, 2015), os aços elétricos convencionais por serem magneticamente orientados têm stress elástico em condições bem menos rigorosas que os metais amorfos. Estes, por não serem, a priori magneticamente orientados e por terem elevado stress elástico introduzido durante o processo de fabricação deve ser imperativamente recozido.

O recozimento na presença de um campo magnético longitudinal melhora significativamente suas propriedades magnéticas, tais como indução de saturação, força coercitiva, perdas ativas e potência de excitação, promovendo a relaxação estrutural do material.

O alto stress interno das ligas amorfas é resultado da solidificação rápida, não permitindo a formação de cristais no material e deixando-o instável. A relaxação estrutural obtida pelo tratamento térmico e magnético realizado durante o recozimento em temperaturas abaixo da cristalização, leva o material a um estado semi-estável. Com isso, ele reduz a ductibilidade do material, deixando-o mais rígido e quebradiço.

3.1.3.6 Massa e Volume

O baixo fator de empilhamento, como citado acima, provoca o aumento da área do transformador e consequentemente o aumento de seu volume. O processo de montagem do núcleo, diferente da montagem feita com chapas de aço silício que possuem cantos à 90°, obriga o montador de um transformador trifásico incluir um 4º núcleo a fim de manter a mesma impedância para todos os 3 enrolamentos. Vide exemplo na Figura 3.6, tornando o transformador maior do que os convencionais.



Figura 3.6 - Exemplo de Construção de Transformador Trifásico com Núcleo Amorfo

Fonte: COLLA (2014)

3.1.3.7 Indução de Saturação

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

3.1.3.8 Magnetostricção

Magnetostricção ou magnetostricção é a deformação de estruturas cristalinas devido à aplicação de campos magnéticos, observada tanto em monocristais como em policristais do tipo ferromagnético. Este fenômeno causa a vibração dos núcleos ferromagnéticos de aparelhos de corrente alternada, com o dobro da frequência da corrente.

Transformadores construídos com ligas amorfas ou de aço silício apresentam níveis de vibração muito parecidos.

3.1.4 Oportunidade de Redução de Perdas com uso de Transformadores Amorfos

Os prós e contras apresentados nos subcapítulos acima, não diminuem o interesse dos institutos de pesquisa nas ligas amorfas. Conforme apresentado na Tabela 3.2, o potencial de redução de consumo com o uso deste material é muito grande.

Na Europa e nos Estados Unidos, as novas normas regulamentadoras exigindo a redução de perdas nos transformadores, guiou fabricantes a recorrerem à tecnologia de ligas amorfas. Um dos grandes fabricantes de transformadores no mundo, a ABB fabrica transformadores com núcleo de liga amorfas em sua fábrica da Polônia e fornece aos demais países da Europa.

No Brasil existem empresas que estão trabalhando com a produção de transformadores amorfos, como por exemplo a subsidiária indiana Vijai (recentemente adquirida pela Toshiba Transformadores). O mercado aceitou bem o seu uso, mesmo sendo mais caros que os demais transformadores de núcleo de aço silício. De forma idêntica aos países europeus e americanos, os organismos regulamentadores brasileiros estão exigindo de forma crescente o aumento da eficiência em transformadores de distribuição fabricados no Brasil ou importados. A liga amorfa não é a única solução para a redução das perdas em transformadores, mas atualmente mostra-se uma solução de rápida assimilação pelas empresas distribuidoras de energia.

	Perdas Anuais em Transformadores (TWh)	Potencial anual de economia (TWh)	Redução de CO₂ em milhões de Toneladas
USA	141	84	60
EU25	55	22	9
Japan	44	31	12
China	33	18	13
India	6	3	3
Australia	6	3	3
Total	285	161	100

Tabela 3.2 – Perdas Anuais em Transformadores e Potencial anual de economia com o uso de materiais amorfos

Fonte: Leonardo Energy (2010)

3.1.5 Núcleos Mistos

A dificuldade em se baratear a fabricação de núcleos amorfo, até mesmo por interesse dos detentores da tecnologia de fabricação, fez surgir projetos que utilizam outras formas construtivas com o foco em eficiência e ao mesmo tempo viabilidade econômica do uso do material amorfo.

Nesta linha de pensamento, um estudo elaborado pelo departamento de engenharia da faculdade de engenharia de Agra na Índia (SINGH, 2015), propõe a construção de transformadores utilizando núcleos mistos, ou seja, com material amorfo e aço silício. A construção seria realizada com chapas intercaladas destes materiais, a Figura 3.7 compara as formas construtivas de transformadores de distribuição montados com núcleo de aço silício, núcleo amorfo e núcleo amorfo e aço silício.

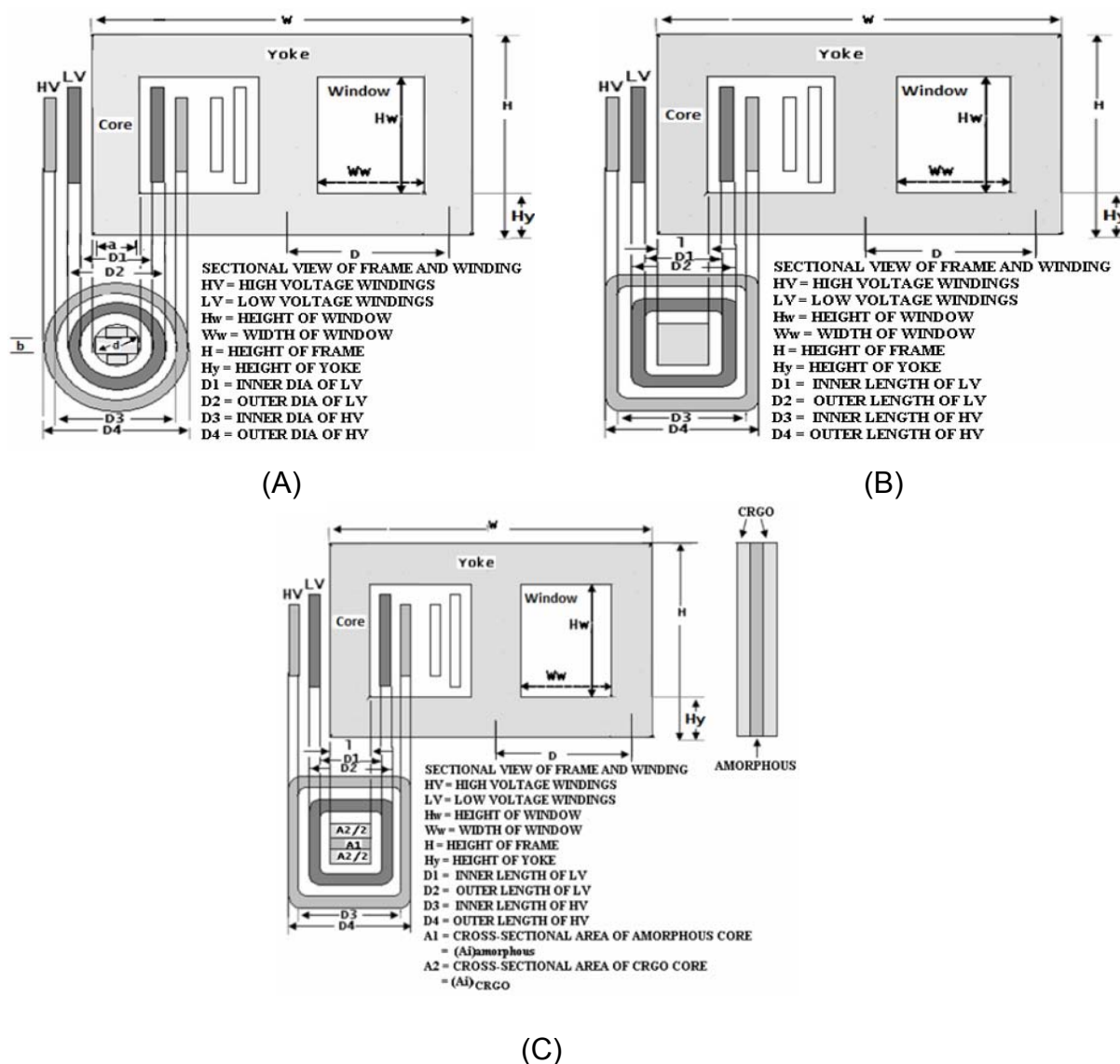


Figura 3.7 - Comparação de Montagem de Transformadores com (A) Núcleo Construído com Aço Silício de Grão Orientado, (B) Liga Amorfa E (C) Por Chapas de Aço Silício e Liga Amorfa

Fonte: ARPN Jornal (2012)

O estudo concluiu que a utilização de núcleos mistos é mais viável do que a construção de núcleos unicamente com materiais amorfos. O resultado do estudo é resumido na Tabela 3.3. Como pode ser visto, o custo do transformador fabricado com núcleo misto é levemente superior ao fabricado com núcleo de aço silício, todavia há um aumento em 0,3% da eficiência do transformador.

Tendo em vista a dificuldade no mercado nacional para aquisição de material amorfo, esta forma de construção pode ser uma alternativa para aumento de eficiência de

transformadores sem grande aumento dos custos que serão repassados ao usuário final.

Descrição	Núcleo construído com chapas de aço silício de grão orientado	Núcleo construído com lâminas de liga amorfa	Núcleo construído com chapas de aço silício e lâminas de liga amorfa
Perdas no núcleo em Watts	1058	43.1	(13.8+586.6)=600.4
Perdas no cobre em Watts	2862	2913	2913
Eficiência à plena carga com fator de potência 0,8 ind.	98%	98,50%	98,30%
Custo do núcleo em Rupias (\$)	38,952	86,296	(26160+23464)=49,624
Custo do enrolamento em Rupias (\$)	1,12,769	1,15,658	1,15,658
Custo de núcleo e enrolamento em Rupias (\$)	151,721	201,954	165,282

Tabela 3.3 – Resumo de Perdas, Eficiência e Custos para Transformadores Fabricados com Núcleo Misto (Aço Silício e Liga Amorfa)
Fonte: ARPN Jornal (2012)

3.2 Aplicação de Transformadores Eficientes no Mercado Brasileiro

O Brasil possui diversos fabricantes de transformadores, desde pequenos produtores até fabricantes multinacionais. Assim sendo, a fabricação de transformadores mais eficientes pode ser alcançada sem dependência de fatores externos.

Algumas ações dos órgãos regulamentadores e fiscalizadores já estão sendo implementadas, como é o caso da criação do selo de eficiência energética para transformadores, realizado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia).

A ANEEL, através do Programa de Eficiência Energética (PEE) obriga as empresas distribuidoras de energia, a investir 0,5% de sua receita operacional líquida em ações que tenham por objetivo o combate ao desperdício de energia elétrica. Entre essas ações, está a troca de equipamentos do sistema elétrico por outros mais eficientes.

Tendo em vista que transformadores em geral, são equipamentos com alto ciclo de vida (em torno de 30 anos), o processo de troca dos transformadores no sistema de distribuição deverá ser realizado continuamente até que, após um longo período todos os transformadores estejam adequados.

O custo da produção de ligas amorfas poderia ser reduzido com a criação de um fornecedor local. Tendo em vista que o Brasil é um dos grandes exportadores de ferro e, que também domina a produção de aço, a produção de ligas amorfas seria um avanço para a indústria nacional, permitindo tanto a produção para atendimento à demanda interna, quanto exportação para mercados externos.

Técnicas mais simples e que menor onerem fabricantes e consumidores, deverão ser adotadas, pois são mais fáceis de serem assimiladas no mercado.

4 Regulamentação

No cenário atual, diversos países estão financiando ou incentivando ações para a melhoria na eficiência nos equipamentos e sistemas elétricos, porém com a ausência de uma regulação específica sobre o tema, muitas das metas traçadas não serão alcançadas. Neste contexto, alguns países ou “mercados” se destacam não só pela qualidade das regulamentações criadas, mas também pelas ambiciosas metas a serem atingidas em um curto período de tempo.

4.1 Regulamentação no Mercado Americano

Os Estados Unidos da América e o Canadá representam um dos maiores mercados consumidores no mundo. Nestes países, as normas que guiam os fabricantes de equipamentos elétrico são elaboradas pela NEMA, pelo IEEE e também pelos órgãos de fiscalização de cada país em específico.

Em 2002 a NEMA, elaborou um guia para determinação da eficiência em transformadores de distribuição, onde foi estabelecido os valores mínimos exigidos de eficiência para transformadores de distribuição isolados à óleo e também para transformadores à seco (vide Tabela 4.1)

Classe de Tensão	Tensão Primária	34.5kV e menor
	Tensão Secundária	600V e menor
Isolação à Óleo	Monofásico	10-833kVA
	Trifásico	15-2500kVA
Seco	Monofásico	15-833kVA
	Trifásico	15-2500kVA

Tabela 4.1 - Escopo NEMA TP1
Fonte: NEMA (2015)

A adoção dos valores propostos pela NEMA TP1 na fabricação de transformadores, é voluntária pelos fabricantes americanos.

Para auxiliar o atendimento à norma TP1, em 2005, foi criado pelo NEMA, a norma TP2 (Standard Test Method for Measuring the Energy Consumption of Distribution

Transformers), estabelecendo os procedimentos para testes e análise da performance de transformadores de distribuição (à seco e imersos em líquido isolante). A norma também auxilia no correto dimensionamento de transformadores.

Em paralelo à iniciativa da NEMA, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) lançou a norma 10 CFR Part 431 – Sub-parte K, onde também estabelece valores mínimos de eficiência para Transformadores de Distribuição, bem como métodos de testes para determinação de performance.

Os valores de performance da norma 10 CFR Part 431 são mais elevados e sua adoção pelos fabricantes não é facultativa, sendo obrigatória para todos os transformadores fabricados após 1 de janeiro de 2016.

A Tabela 4.2 traz os valores de eficiência para os transformadores monofásicos e trifásicos de acordo com a norma 10 CFR Part 431 carregados à 50% da carga nominal mencionada na placa de características do transformador (DOE, 2015).

Monofásicos		Trifásicos	
kVA	Eficiência (%)	kVA	Eficiência (%)
10	98.70	15	98.65
15	98.82	30	98.83
25	98.95	45	98.92
37.5	99.05	75	99.03
50	99.11	112.5	99.11
75	99.19	150	99.16
100	99.25	225	99.23
167	99.33	300	99.27
250	99.39	500	99.35
333	99.43	750	99.40
500	99.49	1000	99.43
667	99.52	1500	99.48
833	99.55	2000	99.51
		2500	99.53

Tabela 4.2 - Eficiência para transformadores de distribuição fabricados a partir de Jan/2016 de acordo com a Norma 10 CFR 431 - Subparte K

Fonte: DOE (2015)

4.2 Regulamentação no Mercado Europeu

O regulamento (UE) N.º 548/2014 estabeleceu os requisitos de concessão ecológica para a colocação no mercado ou a colocação em serviço de transformadores de potência, sendo valor mínimo de 1 kVA, utilizados em redes de transporte e distribuição de eletricidade de 50 Hz ou destinados à aplicações industriais. O regulamento só é aplicável aos transformadores adquiridos após a entrada em vigor do mesmo (JORNAL DA UNIÃO EUROPEIA, 2015).

As perdas em transformadores de distribuição na Europa excedem 38TWh/ano, o que equivale ao consumo anual da Dinamarca e à 30 milhões de toneladas de CO₂ (WILSON, 2015).

A iniciativa de tornar mais eficientes produtos residências e industriais é conhecida na União Europeia como *Ecodesign*. Para transformadores de distribuição a norma 548/2014 tornou-se efetiva a partir de 1 de julho 2015, porém é dividida em dois estágios, sendo que o segundo estágio (mais rigoroso), somente entrará em vigor a partir de 1 de julho de 2021.

Potência Nominal (kVA)	Fase 1 (a partir de 1 de Julho de 2015)		Fase 2 (a partir de 1 de Julho de 2021)	
	Valor máximo de perdas em carga $P_k(W)$ (*)	Valor máximo de perdas em vazio $P_o(W)$ (*)	Valor máximo de perdas em carga $P_k(W)$ (*)	Valor máximo de perdas em vazio $P_o(W)$ (*)
≤ 25	$C_k(900)$	$A_o(70)$	$A_k(600)$	$A_o - 10\% (63)$
50	$C_k(1\ 100)$	$A_o(90)$	$A_k(750)$	$A_o - 10\% (81)$
100	$C_k(1\ 750)$	$A_o(145)$	$A_k(1\ 250)$	$A_o - 10\% (130)$
160	$C_k(2\ 350)$	$A_o(210)$	$A_k(1\ 750)$	$A_o - 10\% (189)$
250	$C_k(3\ 250)$	$A_o(300)$	$A_k(2\ 350)$	$A_o - 10\% (270)$
315	$C_k(3\ 900)$	$A_o(360)$	$A_k(2\ 800)$	$A_o - 10\% (324)$
400	$C_k(4\ 600)$	$A_o(430)$	$A_k(3\ 250)$	$A_o - 10\% (387)$
500	$C_k(5\ 500)$	$A_o(510)$	$A_k(3\ 900)$	$A_o - 10\% (459)$
630	$C_k(6\ 500)$	$A_o(600)$	$A_k(4\ 600)$	$A_o - 10\% (540)$
800	$C_k(8\ 400)$	$A_o(650)$	$A_k(6\ 000)$	$A_o - 10\% (585)$
1000	$C_k(10\ 500)$	$A_o(770)$	$A_k(7\ 600)$	$A_o - 10\% (693)$
1250	$B_k(11\ 000)$	$A_o(950)$	$A_k(9\ 500)$	$A_o - 10\% (855)$
1600	$B_k(14\ 000)$	$A_o(1\ 200)$	$A_k(12\ 000)$	$A_o - 10\% (1080)$
2000	$B_k(18\ 000)$	$A_o(1\ 450)$	$A_k(15\ 000)$	$A_o - 10\% (1\ 305)$
2500	$B_k(22\ 000)$	$A_o(1\ 750)$	$A_k(18\ 500)$	$A_o - 10\% (1\ 575)$
3150	$B_k(27\ 500)$	$A_o(2\ 200)$	$A_k(23\ 000)$	$A_o - 10\% (1\ 980)$

Tabela 4.3 - Valor máximo de perdas em carga e em vazio (em W) para transformadores trifásicos de média potência imersos em líquido isolante

Fonte: Jornal Oficial da União Europeia (2014)

Potência Nominal (MVA)	Fase 1 (1 de julho de 2015)	Fase 2 (1 de julho de 2021)
	Valor mínimo do Índice de Eficiência de Pico (%)	
$3,15 \leq S_N \leq 4$	99.465	99.532
5	99.483	99.548
63	99.510	99.571
8	99.535	99.593
10	99.560	99.615
125	99.588	99.640
16	99.615	99.663
20	99.639	99.684
25	99.657	99.700
315	99.671	99.712
40	99.684	99.724
50	99.696	99.734
63	99.709	99.745
80	99.723	99.758
≥ 100	99.737	99,77

Tabela 4.4 - Requisitos mínimos aplicáveis ao Índice de Eficiência de Pico para transformadores de grande potência imersos em líquido isolante

Fonte: Jornal Oficial da União Europeia (2014)

CE		ABB	
Type TNOSCT-100/11PNS UNI			
No. 1LPL525913		Year of manufacture 2014	
Rated power 100 kV·A		No. of phases 3	
TRANSFORMER to specification EN (IEC) 60076-1			
Rated voltage [V]		Current [A]	Insulation level
HV	11000 ± 2x2.5%	5.25	LI75 AC28
LV	415	139.10	AC3
Tap no.	HV voltage [V]	Connection symbol	Dyn11
1	11550	Cooling	ONAN
2	11275	Rated frequency	50 Hz
3	11000	Short-circuit imp.	3.88 %
4	10725	Load losses	1750 W
5	10450	No-load losses	145 W
Ambient temp. 40°C		Total mass	463 kg
Temperature rise of:		Mass of active part	279 kg
Windings	60K	Mass of oil	100 kg
Oil	55K	Type of oil	Mineral Nyro Taurus
		Oil to	IEC 60296
Windings material HV/LV: Al/Al		Core material: grain-oriented electrical steel	
Mass of windings: 53kg		Mass of core: 169kg	

Figura 4.1 – Placa Característica de Transformador atendendo a nova regulamentação de eficiência energética para o mercado europeu

Fonte: ABB Ltda (2015)

As regulamentações europeias e americanas objetivam uma redução imediata nas perdas técnicas de transformadores e também miram em um futuro próximo a máxima eficiência em transformadores utilizando-se das tecnologias atuais.

No Gráfico 4.1, comparam-se as políticas de eficiência relacionadas à transformadores de distribuição. Observa-se que para transformadores de distribuição com potência inferior à 100kVA, países como Índia e Estados Unidos possuem níveis de eficiência mais elevados.

A implementação ao longo dos próximos anos das MEPS ao redor do mundo irá, além de reduzir perdas de energia no sistema, melhorar a competitividade dos fabricantes de transformadores, pois irá reduzir no mercado fabricantes menos qualificados que

não possuem capacitação técnica e estrutura adequada para atender as normas integralmente.

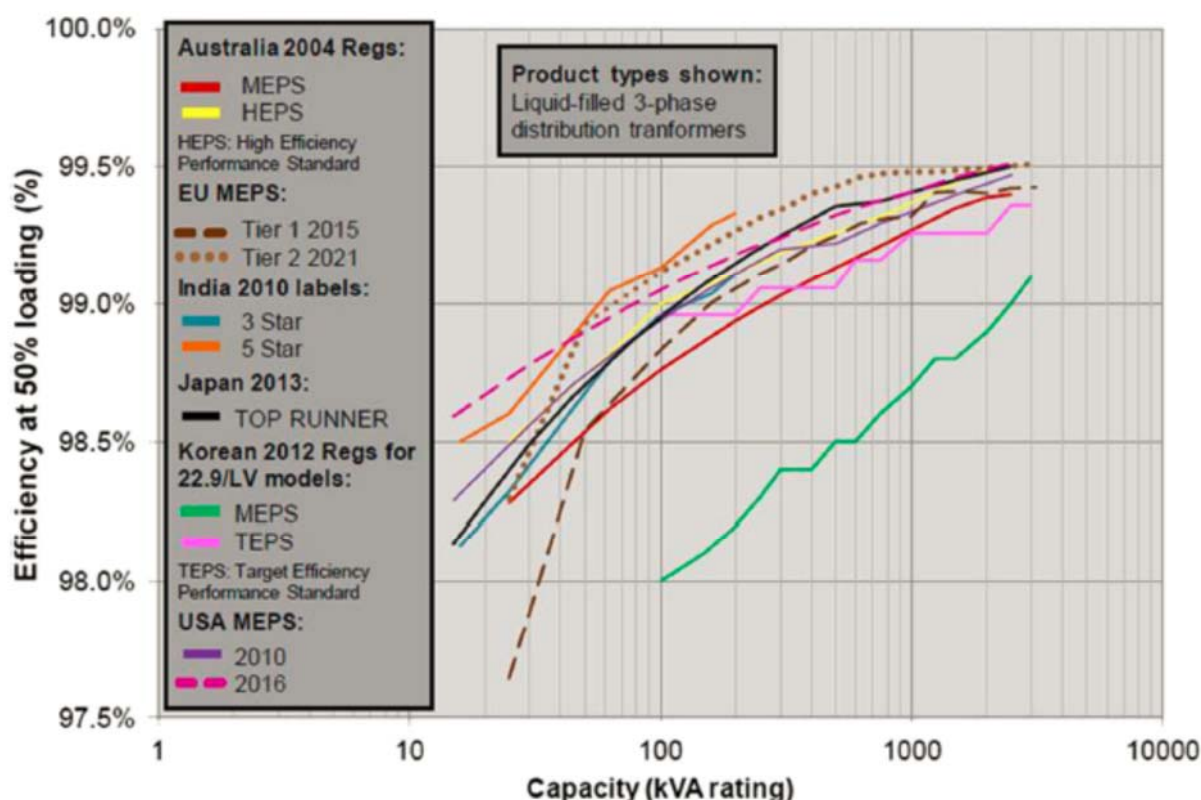


Gráfico 4.1 - Comparação das Políticas de Eficiência em Transformadores de Distribuição Trifásicos
Fonte: Almeida/Santos/Martins (2015)

4.3 Regulamentação no Brasil

O Brasil seguindo as tendências mundiais, visando reserva de mercado e além de tudo atualizar suas normas com base nas tecnologias atuais, criou através do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, em conjunto com o INMETRO (Portaria no 378 de 28 de Setembro de 2010), os requisitos mínimos de eficiência para **transformadores de distribuição isolados à óleo**. Esta portaria permitiu ao INMETRO criar o selo de eficiência energética para transformadores, que inicialmente era facultativo, porém atualmente é obrigatório para todos os transformadores de distribuição conforme especificados abaixo e fabricados a partir de Dezembro de 2013:

- a) Transformador de Distribuição Monofásico nas tensões primárias nominais de 15; 24,2; e 36,2 kV e potências de 5 a 100 kVA;
- b) Transformador de Distribuição Trifásico nas tensões primárias nominais de 15; 24,2; e 36,2 kV e potências de 15 a 300 kVA.

A portaria 378, que tem como base as normas NBR 5440 e NBR 5356 e, até o momento poucos fabricantes estão aptos a utilização do selo de eficiência em seus produtos.

A grande quantidade de fabricantes de transformadores de distribuição de baixa potência, criou no mercado brasileiro uma informalização na produção destes equipamentos. Observa-se que muitos fabricantes possuem estruturas precárias de produção, mas como possuem preços muito baixos de revenda, acabam por concorrer com grandes produtores que em tese são mais estruturados e devido a isto possuem custos mais elevados

Com a iniciativa do INMETRO, tanto fabricantes quanto empresas prestadoras de serviços para reforma de transformadores terão que se adaptar as normas técnicas e seguir os critérios estabelecidos pelo INMETRO para obtenção do selo de eficiência. Em 22 de Março de 2013, entrou em vigor através do Ministério de Minas e Energia, a portaria no. 104, estabelecendo que a partir de 31 de Dezembro de 2013, todos os fabricantes de transformadores ou empresas que atuem na reforma destes equipamentos deverão atender os requisitos mínimos de eficiência estabelecidos por norma.

Em 04 de Dezembro de 2014, a portaria no. 378 foi revisada e substituída pela portaria 488, foram realizadas poucas alterações, como por exemplo podemos citar as penalidades ao não cumprimento da norma, e também sobre a realização de ensaio somente em laboratórios creditados pelo INMETRO. A portaria também estabeleceu um cronograma de revisões de metas de eficiência, sendo estabelecido um prazo de 4 anos para revisão dos valores de perdas máximas em transformadores.

Uma das conquistas do INMETRO foi a criação de uma etiqueta de eficiência energética que é adquirida pelos fabricantes após ensaio do transformador em laboratório creditado. As Figura 4.2 e Figura 4.3, representam as etiquetas elaboradas pelo INMETRO, sendo a última atualmente em vigor.



82 mm	
	57 mm 25 mm
35 mm	Energia (Elétrica) Fabricante Modelo Tipo Potência (kVA) Classe de Tensão (kV)
	TRANSFORMADOR EM LÍQUIDO ISOLANTE PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ABCDEF XYZ(Logo) ABC 1 2 3 ABC 1 2 3 ABC 1 2 3
25 mm	Perdas máximas (tap nominal) - Vazio (W) - Totais (W) Relação de Transformação
25 mm	Perdas máximas (tap crítico) - Vazio (W) - Totais (W) Relação de Transformação
8 mm	NBI (kV)
30 mm	 Pesquisa por Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE Transformadores de Distribuição - Potência ____/____/____ 
IMPORTANTE: NÃO SERÁ PERMITIDA A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA EM DESACORDO COM PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM	

Figura 4.2 - Selo INMETRO para Transformadores de Distribuição Isolados À Óleo – Proposta
 Portaria 378
 Fonte: INMETRO (2010)

70,00		60,00	
60,00	Energia (Elétrica) Fornecedor Modelo Tipo Potência (kVA) Classe de Tensão (kV)	TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO EM LÍQUIDO ISOLANTE	PERDAS MÁXIMAS (tap nominal) - Vazio (W) 00000 - Totais (W) 00000 - Relação Transformação 00000
	 Programa Nacional de Conservação de Energia - ENCE Para obter mais informações sobre o ENCE, visite o site: www.ence.gov.br Eletrobras		PERDAS MÁXIMAS (tap crítico) - Vazio (W) 00000 - Totais (W) 00000 - Relação Transformação 00000
	IMPORTANTE: NÃO PERMITIR A REMOÇÃO DA ETIQUETA DO INMETRO.		NBI (kV) 00000
70,00		60,00	

Figura 4.3 - Selo INMETRO Criado a partir da Portaria 488, para Transformadores de Distribuição
 Novos
 Fonte: INMETRO (2014)

Como processo de alinhamento dos requisitos de eficiência nacionais aos internacionais, a norma NBR5440 foi revisada. A Tabela 4.5 traz exemplo de requisitos de eficiência e valores de perdas admissíveis para transformadores de distribuição isolados à óleo com potência de 5 e 10kVA.

Potência do Transformador kVA	Eficiência	Perdas em vazio	Perda Total	Rendimento mínimo C=0,5 e FP=0,92	Corrente de Excitação	Tensão de curto-circuito
	Nível	W	W	%	%	%
5	A	15	85	98,61	3,4	2,5
	B	20	100	98,29		
	C	25	110	98,03		
	D	30	125	97,72		
	E	35	140	97,41		
10	A	30	160	98,66	2,7	
	B	35	180	98,47		
	C	40	200	98,29		
	D	45	225	98,08		
	E	50	245	97,9		

Tabela 4.5 – Valores padrões de perdas em transformadores de distribuição, estabelecidos na Norma 5440 publicada em 05.06.2014

Fonte: ABNT NBR5440 (2014)

5 Capitalização da Perdas

De acordo com a Norma NBR5440, a avaliação de compra de um transformador de distribuição deve levar em conta não somente o custo inicial da aquisição do equipamento, mas também as perdas técnicas deste equipamento durante todo o seu ciclo de vida.

Para avaliar qual a solução de equipamento é mais adequada para a sua instalação, o comprador de um transformador deve considerar a capitalização das perdas. Este cálculo apresentado pelos fabricantes como TOC (Total Ownership Cost – Custo total da propriedade), leva em consideração os seguintes fatores:

- Perdas em Vazio do Transformador P_o (W);
- Perdas em Carga P_k (W);
- A Taxa de Carregamento (média sobre um ano em %);
- Tempo de Operação (tempo de operação em horas/ano);
- Custo da Eletricidade (R\$/kWh);
- Taxa de Interesse (taxa de desconto em %);
- Tempo de vida útil (anos);
- Emissão de CO_2 ;

Além destes fatores, o proprietário pode adicionar ao cálculo, o custo de instalação, manutenção, armazenagem, reparo, administração, etc. Porém estes últimos dados não são considerados no cálculo do TOC.

Ao se calcular o TOC se capitalizam as perdas durante um período de funcionamento do transformador e os valores destas perdas são trazidos para o momento presente, sendo possível verificar o impacto financeiro das mesmas. Esta análise permite ao comprador verificar o tempo de payback do investimento colocando o devido peso a cada escolha, ou seja, transformadores menos eficientes podem ser mais baratos inicialmente, mas poderão ao longo de sua vida útil ultrapassarem o custo de um transformador mais eficiente.

O cálculo do TOC é realizado de acordo com a equação 8:

$$Cc = Ct + A \times Po + B \times Pk \quad (8)$$

Onde:

- Cc é o custo de capitalização (R\$);
- Ct Soma do preço da compra (R\$);
- A é o custo das perdas em vazio, expresso em watts (W);
- Po é o valor das perdas em vazio, expresso em watts (W);
- B é o custo das perdas em carga por watt (W);
- Pk é o valor das perdas em carga, expresso em watts (W);

Os valores de Po e Pk são inerentes ao transformador e deverão ser verificados através dos testes à vazio e curto-circuito. Os valores de A e B dependem da expectativa de carga do transformador e do preço da energia (ABNT, 2014).

De acordo com a Norma NBR5440, para pequenos transformadores é possível uma simplificação do cálculo dos fatores A e B. Esta simplificação leva em conta somente o preço do transformador e suas perdas durante a vida útil do equipamento. Mesmo não sendo um cálculo exato, permite ao comprador uma orientação para a compra. Os fatores A e B são calculados pelas equações 9 e 10:

$$A = \frac{(1+j)^n - 1}{i \cdot (1+j)^n} * C_{kWh} * 8760 \quad (9)$$

$$B = \frac{(1+j)^n - 1}{i \cdot (1+j)^n} * C_{kWh} * 8760 * \left(\frac{IL}{Ir}\right)^2 \quad (10)$$

Onde:

- i é a taxa de desconto, expressa em porcentagem por ano (%/ano);
- j é a taxa anual de aumento do preço da energia (%/ano)
- n é a vida útil, expressa em anos;
- C_{kWh} é o preço do kWh, expresso em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh);
- 8760 é o número de hora do ano (h/ano);
- IL é a corrente média da carga, expressa em ampères (A);
- Ir é a corrente nominal, expressa em ampères (A).

Após realizar o cálculo do TOC, o comprador conseguirá descobrir qual equipamento de uma variedade de fabricantes analisados é mais economicamente viável.

Transformadores com núcleo feitos de metais amorfos, por exemplo, são mais caros inicialmente, mas ao analisarmos sua vida útil podem tornar-se mais economicamente viáveis.

5.1 Exemplo de Aplicação 1

Neste exemplo de aplicação são comparados 2 modelos de transformadores com potência de 800kVA e isolamento à óleo, sendo um com núcleo construído com chapas de aço-silício e outro com núcleo formado por liga de metal amorfo, onde os fatores A e B são iguais à 10EUR/W e 2 EUR/W respectivamente. De acordo com a Figura 5.1, embora o custo inicial do transformador amorfo possa ser um pouco maior inicialmente, se considerarmos a capitalização das perdas (TCO), este será a melhor escolha para o comprador.

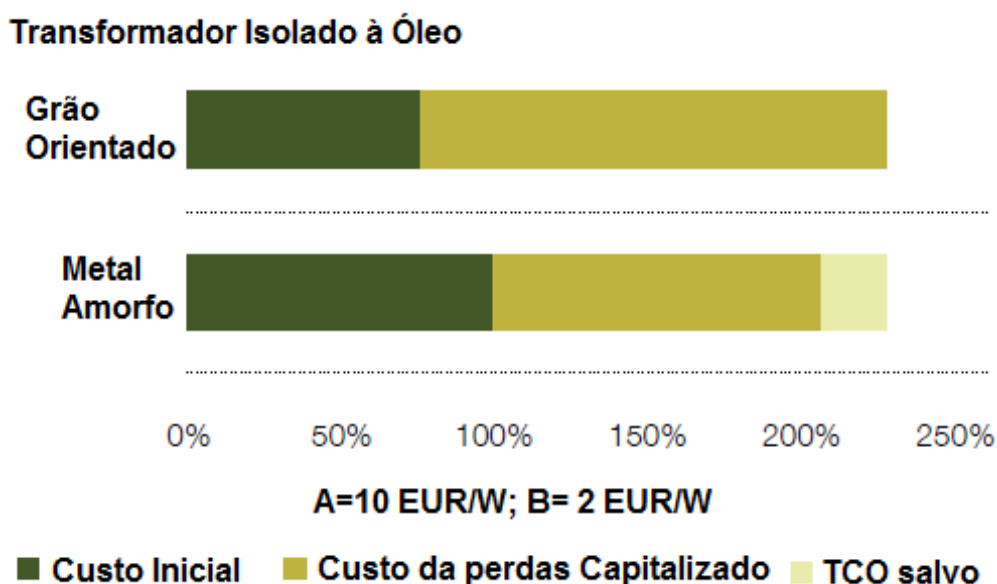


Figura 5.1 – Comparação de custo de transformadores com tecnologia convencional e amorfo
Fonte: ABB Ltda (2015)

5.2 Exemplo de Aplicação 2

Alguns fabricantes de transformadores já disponibilizam ferramentas para cálculo automático do TCO. No site do fabricante ABB (<http://www.abb.com/transformers-tco-calculator>), é possível além de calcular o valor do TCO, também comparar diferentes fabricantes e tecnologias.

Foi utilizado o formulário disponível no site para comparar dois transformadores de potência 75kVA, porém o transformador com tag TCX-75 foi fabricado com núcleo de

aço-silício e outro com tag TCX-75A foi fabricado com núcleo amorfo, abaixo nas Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4, estão o resultado da simulação.

Transformer energy efficiency

Total Cost of Ownership calculator

Settings

Currency: BRL

Use of Watts or Kilowatts in inputs: ☒ Watts ☐ Kilowatts

Conditions

Initial electricity price (1st year): 0.23261 BRL/kWh

Annual increase of energy price: 7 %

Interest rate (for the investment): 9 %

Nominal rating: 500 kVA

Service life: 20 Years

Average load during lifetime: 50 %

Operating hours per year: 8760 Hours

Loss capitalization values: A-factor: 45.29 BRL/W, B-factor: 11.32 BRL/W

Figura 5.2 - Inserção de Parâmetros da Instalação utilizando ferramenta online
Fonte: ABB Ltda (2015)

Compare transformers

Name: TCX-75A_0.8

Initial purchase price: 7560 BRL

No load losses (P_0): 56 kW

Load losses (P_k): 1142.38 kW

Cooling losses at no load (P_{C0}): 0 kW

Cooling losses at rated current (P_{Cs}): 0 kW

Add: Press the "Add" button to add a transformer with given values into the comparison.

Figura 5.3 - Inserção de Dados do Transformador
Fonte: ABB Ltda (2015)

TCX-75A_0,8	Compared with: TCX-75A
 Lowest total cost  Lowest impact on environment	
No load losses (W): 56 Load losses (W): 1 142 Peak efficiency index (IEC) (%): -Infinity Purchase price (BRL): 7 560 Total cost of ownership (BRL): 23 027	No load losses (W): 280 Load losses (W): 1 142 Peak efficiency index (IEC) (%): -Infinity Purchase price (BRL): 5 400 Total cost of ownership (BRL): 31 012
 Total lifetime savings (BRL):	7 985
 Payback time (years):	4.7
 Energy savings/year (kWh):	1 962
 Energy savings/total (kWh):	39 245
 CO ₂ emission reduction/year (kg):	959
 = CO ₂ absorption capability (trees):	44

Figura 5.4 - Comparativo de dois transformadores de mesma potência, construídos com tecnologias diferentes – TCX-75A (Amorfo) e TCX-75 (Aço Silício)

Fonte: ABB Ltda (2015)

Na Figura 5.4, é mostrado um resumo da simulação. O custo elevado do transformador amorfo de 40% maior do que o do transformador construído com núcleo de aço silício, inviabiliza financeiramente o uso do transformador TCX-75A. No entanto, como pode ser verificado na ferramenta, a aplicação do transformador amorfo irá gerar uma redução de emissões de CO₂ muito considerável (959kg), abaixo das emissões de CO₂ é informada a quantidade de árvores necessárias para absorver a mesma quantidade de CO₂ informada.

Quando observado somente um único equipamento, essa redução não parece ser muito significativa, mas ao se analisar um complexo industrial ou um sistema de distribuição de uma cidade, por exemplo, o valor de redução de emissão de CO₂ é muito relevante.

Outros fabricantes, como por exemplo Siemens, Schneider-Electric e GE, possuem ferramentas em seus sites semelhantes a apresentada acima. No site da Siemens (<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/transformers/>), é possível verificar se o transformador adquirido ou existente em uma instalação atende as novas normas de eficiência europeia.

5.3 Exemplo de Aplicação 3

Tomando como base, o exemplo de aplicação do item 5.2, é possível realizar uma análise de viabilidade econômica para auxiliar a decisão de compra do transformador.

Cálculo das Perdas Técnicas NBR5440/IEC			
Dado	Unidade	Aço Silício	Amorfo com Perdas à Vazio menores em 80%
IC (Custo Inicial)	R\$	5.400,00	7.560,00
A (Custo das Perdas em Vazio)	R\$	45.215,33	45.215,33
Po (Perdas em Vazio)	Watts	280	56
B (Custo das Perdas em Carga)	R\$	11.303,83	11.303,83
Pk (Perdas em Carga)	Watts	1142,38	1142,38
t (Tempo de Operação no Ano)	Horas	8760	8760
Cn/2 (Custo da Energia à Meia Vida do Transformador)	R\$/kWh	0,61	0,61
i (Taxa de Desconto)	-	10%	10%
n (Vida Útil)	Anos	20	20
j (Taxa Anual de Aumento no Custo da Energia)	-	7,0%	7,0%
C (Preço da Energia)	R\$/kWh	0,249	0,249
TCO	R\$	25.578.962,51	15.452.889,41
Δ Entre CGO e AMDT	R\$	10.126.073,11	
Economia Anual	R\$/Ano	488,60	
Payback	Anos	15,47	

Tabela 5.1 – Cálculo das Perdas Técnicas para 2 modelos de Transformadores com potência de 75kVA

Parâmetros Financeiros			Resultado Financeiro	
Inv. Inicial Adicional	-R\$ 7.560	Ilo	Payback simples	15,5 anos
Fluxo de Caixa	R\$ 489	FLC	Payback Descontado	23,2 anos
Taxa de desconto	10%	r	VPL	-R\$ 805
Período (anos)	20	n	TIR	8,7%

Tabela 5.2 – Resultado Financeiro

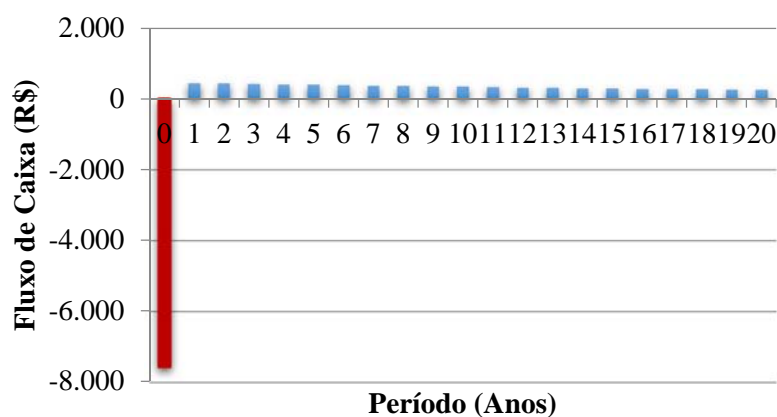


Gráfico 5.1 – Fluxo de Caixa Descontado

Fonte: Autor

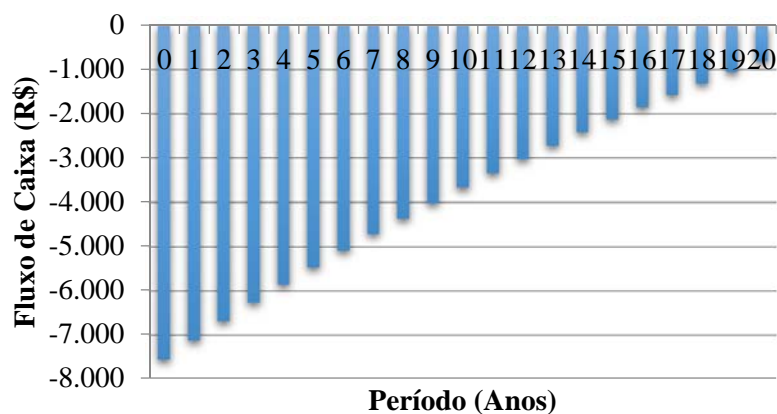


Gráfico 5.2 – Fluxo de Caixa Acumulado

Fonte: Autor

Como pode ser verificado, o custo elevado do transformador amorfo acabou por inviabilizar a sua compra. A solução para esta elevação do custo pode ser a utilização de transformadores com núcleos mistos, conforme apresentado no item 3.1.5.

A análise puramente financeira da escolha do material a ser utilizado na construção do transformador despreza, o impacto ambiental causado pelo desperdício de energia no sistema de distribuição que utiliza transformadores com altas perdas à vazio. A geração de energia, seja por fonte renováveis, seja por combustíveis fósseis, irá impactar o meio ambiente e esse impacto deve ser mitigado o máximo possível.

Portanto, o uso de materiais amorfos, bem como novas tecnologias de construção de núcleos de transformadores que proporcionem baixas perdas à vazio, devem ser subsídios por governos até que possam se viabilizar economicamente.

5.4 Incentivo a Pesquisas Futuras

Os transformadores de distribuição tem sido alvo da maioria das pesquisas em melhoria de eficiência energética, contudo outros tipos de transformadores também poderão contribuir na redução de perdas no sistema elétrico.

Os transformadores à seco, também muito utilizados na indústria devido a redução nos custos de manutenção, já possuem processo de fabricação utilizando núcleo constituído de material amorfo.

Os transformadores de médio e grande porte também poderão ser alvo de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, visando a melhoria de sua eficiência.

6 Conclusão

O aumento de eficiência verificado em transformadores de distribuição inspira a pesquisa no aumento de eficiência em outros modelos de transformadores e, também em outros elementos que compõe o sistema elétrico.

Embora este trabalho tenha se restringido a verificar a eficiência em transformadores de distribuição isolados à óleo, verifica-se que em todos os modelos e para diversas potências de transformadores, soluções estão sendo pesquisadas para aumentar sua vida útil e diminuir as perdas técnicas.

As perdas à vazio, representando um potencial de redução de até 80%, devem ser reduzidas com o emprego de novas técnicas e novas tecnologias, como por exemplo, a utilização de metais amorfos.

A solução ideal na redução das perdas à vazio será a que menor onerem os fabricantes e, conseqüentemente o usuário. O uso de materiais amorfos poderá, no futuro, ser a solução mais viável para construção de transformadores eficientes, porém o correto dimensionamento destes equipamentos também é fundamental para redução de perdas.

Além do ganho em eficiência, transformadores certificados por órgãos competentes, como por exemplo o INMETRO, seguem rigorosas metodologias de fabricação, que por si só, melhoram a qualidade do produto e conseqüentemente sua vida útil. Desta forma, os usuários do sistema de distribuição serão beneficiados pelo menor tempo de interrupção em fornecimento de energia causada por falhas em transformadores, também poderá haver uma redução em tarifas, visto que a potência consumida durante operação à vazio ou com carga reduzida é custeada pelo usuário final.

As normas atualmente em vigor estão exigindo a melhoria de eficiência para os novos transformadores e será necessário que o mercado se adeque as normas para alcançar níveis de eficiência internacionais, possibilitando também a exportação de produtos para o mercado norte americano e europeu. Os fabricantes que mais rapidamente se adequarem terão condição de se manter no mercado e ao mesmo tempo, ampliar suas vendas.

Os engenheiros projetistas que realizam o dimensionamento de transformadores de distribuição devem se utilizar do cálculo do custo da propriedade (TCO) para a correta decisão sobre o melhor modelo a ser especificado e adquirido. Com orientação correta dos custos das perdas de cada equipamento, será possível ao engenheiro ou

comprador verificar o impacto do uso de equipamentos menos eficientes em seu sistema.

A conscientização mundial para redução de perdas e diminuição das emissões de carbono não estão restritas à produção de combustíveis fósseis. Toda atividade humana de uma forma ou de outra causa impacto ao meio ambiente. A redução de perdas em transformadores é um avanço no setor elétrico em um sistema que já se encontra saturado no quesito de geração. Os investimentos em fontes renováveis, como por exemplo eólica ou solar, são prejudicados quando os demais equipamentos que compõe o sistema desperdiçam energia sem realizar qualquer trabalho.

No contexto nacional, a utilização de transformadores eficientes é aplicável, pois temos fabricantes de transformadores capacitados para a montagem e testes destes equipamentos. Além disso, o parque de transformadores brasileiro é de grande proporções e representa um grande potencial de redução de consumo.

As opções citadas neste trabalho permitem múltiplas escolhas de tipos de tecnologias de acordo com a aplicação do transformador. Os transformadores destinados à aplicação rural ou residencial podem ser fabricados com impedância porcentual reduzida e, transformadores destinados a sistema de distribuição industriais poderão se fabricados com núcleos constituídos de ligas amorfas ou futuramente com núcleos mistos, caso essa tecnologia se desenvolva.

Um outro fator decisivo para que os fabricantes de transformadores optem por soluções mais eficientes e/ou desenvolvimento de novas tecnologias está na aceitação e exigência de grandes empresas. No Brasil, setores industriais ligados a atividade de mineração, petroquímica, papel e celulose respondem por uma grande parcela do mercado e atualmente essas indústrias estão desinvestindo, portanto a demanda por novos equipamento irá cair.

A redução de impostos sobre a importação de materiais amorfos, em um primeiro momento poderá incentivar o mercado a produzir equipamentos com essa tecnologia, visando também as empresas concessionárias de energia e também possibilitará colocar os fabricantes nacionais em níveis de competitividade com fabricantes estrangeiros.

7 Bibliografia

ABB LTDA., **Green Distribution Transformer Program – Partnership for a sustainable environment** – 1LAB000195. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/ce3ee1a4c90e44289393fb3fd36e8d17/GTD_Sustainability_A4-natural%20ester_upd_27-10-2015.pdf>. Acesso em: 08/10/2015.

AL-BADI, A.H., ELMOUDI, A., METWALLY, I., AL-VAHAIBI, A., AL-AJMI, H., AL BULUSHI, M., **Losses Reduction In Distribution Transformers**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/>>. Acesso em: 25/07/2015.

ALMEIDA, A., SANTOS, B., MARTINS, F., **Energy-Efficient distribution transformers in Europe: impact of Ecodesign regulation**. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s12053-015-9365-z>>. Acesso em: 16/09/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de Potência - Parte: 1 - Generalidades, 2010. 103 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440**: Transformadores para Rede Área de Distribuição - Requisitos, 2014. 67 p.

CAMPOS, M. L. B., **Estudo de Aplicação Experimental e Viabilidade de Utilização de Transformadores de Distribuição com Núcleo Amorfo**, Disponível em: <http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/Dissertacao_ManuelCampos.pdf>. Acesso em: 09/07/2015.

CHAPMAN, S. **Fundamentos de Máquina Elétricas**, Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013. 698 p.

COLLA, F., **Power and Distribution Transformers - Outlook on the Energy Market**, Disponível em: <www.leonardo-energy.org>. Acesso em: 14/07/2015.

CRISÓSTOMO, B. L. L., FRANCA, R. L. B., SILVEIRA, V. C. L., **Eficiência Energética Associada ao Emprego de Transformadores com Núcleo de Liga Amorfa: O Estado da Arte**. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/pnsmi>. Acesso em: 17/07/2015.

DEL TORO, V., **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, New Jersey: LTC Editora, 1999. 550 p.

DEPARTMENT OF ENERGY – USA, **10 CFR 431.196 - Energy conservation standards and their effective dates**, Disponível em: <<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/10/431.196>>. Acesso em: 10/09/2015

E. Wilson, Switching off Denmark - Distribution Transformer Losses Exposed, Disponível em: <www.wilsonpowersolutions.co.uk>. Acesso em: 20/10/2015.

FITZGERALD, A. E., JR, C. K. e UMAS, S. D. **Máquinas Elétricas** 6a. Edição, Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010. 603 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZACAO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Portaria nº 378**. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 10/08/2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZACAO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Portaria nº 488**. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 10/08/2015.

INTERNATION ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC, **6007601**: Power Transformers: General, 1999. 98 p.

“Itaipu Binacional,” Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em: 16/09/15.

JORNAL DA UNIÃO EUROPÉIA, **REGULAMENTO (UE) N.º 548/2014**, Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/oj/direct-access.html?locale=pt>>. Acesso em: 05/08/2015

KEULENAER, H. D., **Energy Saving by Reducing No Load Loss of Distribution Transformers**, Disponível em: <<http://leonardo-energy.org/ebook/energy-saving-reducing-no-load-loss-distribution-transformers>>. Acesso em: 27/09/2015.

KOSOW, I. L., **Máquinas Elétricas e Transformadores**, Porto Alegre: Ed. Globo, 1982. 667 p.

LI, D., Zhang, L., LI, G., LU, Z., ZHOU, S., **Reducing the Core Loss of Amorphous Cores for Distribution Transformers**. Disponível em: <www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/100326.pdf>. Acesso em: 28/09/2015.

MILLER, F., **Leverage Transformer Technology to Improve Energy Efficiency and Reduce Data Center Utility Costs**, Disponível em: <www.tnbpowersolutions.com>. Acesso em: 18/07/15.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – BRASIL. **Portaria nº 104**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 10/08/2015.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION - NEMA, **Standard Publication TP1**: Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers, 2002. 16 p.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION - NEMA, **Standard Publication TP2**: Standard Test Method for Measuring the Energy Consumption of Distribution Transformers, 2005. 40 p.

NUNES, A. A., **Transformadores Monofásicos Rurais e Impedância Percentual**, Disponível em: <http://leonardo-energy.org.br/iniciativas_arquivo/eficiencia-energetica-em-transformadores-de-distribuicao/>. Acesso em: 10/09/2015.

POLLARI, K., M., **Transformer Energy Efficiency**. Disponível em: <<http://new.abb.com/energy-efficiency>>. Acesso em: 09/10/2015.

RAMANAN, V.R., CARLEN, M., **Distribution Goes Green**. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/f28b7caf32af14e8c1257a25002f2717/40-47%202m221_EN_72dpi.pdf>. Acesso em: 08/10/2015.

SALUSTIANO, R., NETO, E., MARTINEZ, M., **The Unbalanced Load Cost on Transformer Losses at a Distribution System**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/>>. Acesso em: 10/09/2015.

SIEMENS LTDA., **New EU requirements for transformers**. Disponível em: <<http://siemens.com/energy/transformes>>. Acesso em: 14/07/2015.

SIEMENS LTDA., **New DOE requirements for transformers**. Disponível em: <<http://siemens.com/energy/transformes>>. Acesso em: 14/07/2015.

SINGH, P. K., MOHAN, M., **Distribution Transformer with Amorphous-CRGO Core: An Effort to Reduce the Cost of Amorphous Core Distribution Transformer**, Disponível em: <www.arpnjournals.com>. Acesso em: 10/09/2015.

SJÖBERG, D., FOGELBERG, T., SWIATKOWSKI, M., MORTENSEN, E., **Energy Efficient Transformers and Reactors**. Disponível em: <<http://www.cigre.org/>>. Acesso em: 25/07/2015.

VAISHYA, S., VAISHYA, R K., BAJPAI, S. K., **Efficiency Improvements in Transformers by Adoption of New Magnetic Material**. Disponível em: <www.ijetae.com>. Acesso em: 17/09/2015.

VIEIRA, G. A., **Amorphos Material**, Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab1.pdf>>. Acesso em: 20/07/15.

VITOR, A. L. O., FINOCCHIO, M. A. F., MENDONÇA, M., **Comparação Das Perdas à Vazio de Transformadores Trifásicos da Classe 15kV, Dotados de Núcleo Amorfo e Ferro Silício**, Disponível em: < <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/58>>. Acesso em: 10/09/2015.