



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

BRUNO SOARES DOS SANTOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

***Perdas em transformadores nos sistemas de
distribuição de energia elétrica: urbanos e rurais***

Campina Grande – Paraíba

Setembro – 2012

BRUNO SOARES DOS SANTOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

***Perdas em transformadores nos sistemas de
distribuição de energia elétrica: urbanos e rurais***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Benedito Antonio Luciano, Dr.

Campina Grande – Paraíba

Setembro - 2012

BRUNO SOARES DOS SANTOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

***Perdas em transformadores nos sistemas de
distribuição de energia elétrica: urbanos e rurais***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em: / /

Prof.: Benedito Antonio Luciano, Dr.

(Orientador)

Prof.: Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.

(Componente da Banca)

Campina Grande – Paraíba

Setembro - 2012

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria de Fátima dos Santos Cabral, e ao meu pai, Gildo Soares Cabral, pela educação e oportunidades que me proporcionaram.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais Maria de Fátima e Gildo Soares, e meu irmão, Luis Gustavo, pelo amor, incentivo e apoio incondicional necessário para que eu concluísse o curso de Engenharia Elétrica.

À minha noiva, Jéssika Freitas, pelo amor, compreensão dos incontáveis momentos ausentes e incentivos para que eu realizasse meu sonho de concluir este curso.

Às amizades iniciadas durante o curso que contribuíram para a conclusão do mesmo e que permeará por toda vida, em especial: Miquéias Melo, João Paulo Pereira, Laécio Trajano, Arthur Dantas, Márcio Rilton, Valdemir Brito, Anderson Câmara.

Aos amigos Alberto Dantas e Gilvan Pereira, que com perseverança me convenceram a realizar meu sonho, cursar Engenharia Elétrica.

Aos amigos, Joseildo Barros e Stayner Guimarães, que infelizmente não estão aqui presente, mas estariam felizes com minha formação.

A todos aqueles que compõem o Departamento de Engenharia Elétrica, em especial os professores, a quem devo grande respeito e admiração pelos ensinamentos que me proporcionaram tornar um engenheiro eletricista.

Ao professor Benedito Antonio Luciano, pela orientação, apoio e confiança.

A todos aqueles que não foram citados, mas que de forma direta ou indiretamente fizeram parte de minha vida acadêmica.

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) são apresentadas algumas considerações relativas ao projeto, fabricação e desempenho de transformadores monofásicos e trifásicos empregados em sistemas de distribuição de energia elétrica, em zonas rurais e urbanas, além de uma análise das perdas associadas ao seu funcionamento sob condições de cargas senoidais e as que introduzem componentes harmônicos. Também é apresentada uma análise comparativa da viabilidade técnica e econômica do emprego, nos núcleos de transformadores monofásicos de distribuição de energia elétrica de idênticas potências nominais, de ligas amorfas em substituição às tradicionais ferro-silício (FeSi) de grãos orientados (GO), particularmente no que diz respeito às perdas no núcleo, com objetivo de reduzi-las e assim elevar a eficiência energética, resultando numa menor necessidade de geração de energia elétrica que, por consequência, contribui para a redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente como CO_2 e SO_2 .

Palavras-chave: eficiência energética, ligas amorfas, perdas no núcleo, transformadores de distribuição.

ABSTRACT

In this TCC are presented some considerations about the design, fabrication and performance of single phase and three phase transformers used in distribution systems of electrical energy in rural and urban areas, and an analysis of losses associated with its operation under linear and nonlinear loads. Also is presented a comparative analysis of technical and economic viability of amorphous alloy core single-phase distribution transformers, with identical power ratings, in replace to the traditional iron-silicon (FeSi) grain oriented (GO) core single-phase distribution transformers, particularly with respect to losses in the core, in order to reduce them and thus increase the energy efficiency, resulting in less need for electric power generation that, consequently, contributes to the reduction of greenhouse gases to the environment as CO₂ and SO₂.

Keywords: amorphous alloys, core losses, distribution transformers, energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Transformador com secundário aberto.	16
Figura 2 – (a) Aspectos da construção do transformador do tipo núcleo envolvido. (b) Diagrama em corte do transformador tipo envolvido.	18
Figura 3 – (a) Aspectos da construção do transformador do tipo núcleo envolvente. (b) Diagrama em corte do transformador tipo envolvente....	19
Figura 4 – Enrolamentos concêntricos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT).....	21
Figura 5 – Enrolamentos alternados AT e BT em disco.	22
Figura 6 – Bobina de baixa tensão (BT).....	22
Figura 7 – Bobinas de alta tensão (AT).....	23
Figura 8 – Núcleo de liga amorfa produzido industrialmente	24
Figura 9 – Canal de óleo	25
Figura 10 – Isolamento dos condutores AT.....	26
Figura 11 – (a) Cabeceiras BT. (b) Cabeceiras AT	26
Figura 12 - Vista superior da bobina de um transformador de distribuição.	28
Figura 13 – Tanque do transformador pronto para ser soldada a parte inferior	29
Figura 14 – Transformador ideal com carga.....	33
Figura 15 – Três circuitos idênticos nos terminais ab para um transformador ideal..	36
Figura 16 – Vista esquemática dos fluxos mútuo e disperso de um transformador ..	37
Figura 17 – Circuito equivalente do enrolamento primário	38
Figura 18 – Diagrama fasorial sem carga.	39
Figura 19 – Circuito equivalente com o ramo de excitação.	40
Figura 20 – Circuito equivalente com o transformador ideal.	41
Figura 21 – Circuito equivalente T de um transformador.	41
Figura 22 – Circuito equivalente completo com o secundário do transformador em curto-circuito.....	42
Figura 23 – Circuito equivalente L com o ramo de excitação no secundário do transformador.....	43
Figura 24 – Circuito equivalente completo com o secundário do transformador em aberto	44
Figura 25 – Circuito equivalente L com o ramo de excitação no primário do transformador	45
Figura 26 – Representação de um cristal ferromagnético não – magnetizado.....	47

Figura 27 – Representação de um cristal ferromagnético completamente magnetizado pelo campo H	47
Figura 28 – Estrutura cristalina do FeSi	49
Figura 29 – Núcleo composto com lâminas de FeSi	49
Figura 30 – Estrutura não – cristalina do metal amorfo	50
Figura 31 – Fita de liga amorfa.....	51
Figura 32 – Curva de magnetização do metal amorfo e do FeSi.	52
Figura 33 – Ciclo de Histerese e relações de energia por meio ciclo.....	53
Figura 34 – Trajetória das correntes parasitas num núcleo de material condutor	55
Figura 35 – Correntes parasitas nas lâminas do núcleo de um transformador.	55
Figura 36 – Lâminas empilhadas de material ferromagnético	56
Figura 37 – Composição das três componentes de perdas em materiais ferromagnéticos.....	57
Figura 38 – Transformador monofásico de distribuição (núcleo de liga amorfa) de 15 kVA 13800 V / 220 V instalado na zona rural de Massaranduba.	62
Figura 39 - Arranjo interno do transformador produzido pela CEMEC	62
Figura 40 – Transformador monofásico de distribuição (núcleo de liga amorfa) de 15 kVA 13800 V / 220 V, classe 15 kV em ensaio no laboratório de Alta Tensão da CELB.....	63
Figura 41 - Perdas versus porcentagem de carga de um transformador de distribuição a seco de núcleo de liga amorfa de 630 kVA	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio comparativos entre transformadores de 15 kVA, 13800 V/220 V, classe 15 kV	63
Tabela 2 – Resultados dos ensaios com transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa realizados na CEMEC.	64
Tabela 3 – Comparação entre transformadores monofásicos de 15 kVA, 7967 V/ 220 V, 60 Hz	67
Tabela 4 – Comparativo de perdas entre dois transformadores de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de FeSi GO	70
a) Sem distorção harmônica	70
b) Com 26% de distorção harmônica total de corrente	71
c) Grau de distorção harmônica de corrente (relativo ao conteúdo harmônico)....	71
Tabela 5 – Comparativo de perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de FeSi GO.....	72
a) Transformadores trifásicos de 100 kVA (zona rural).....	72
b) Transformadores trifásicos de 250 kVA (planta industrial).....	72

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	13
2 – OBJETIVOS	15
2.1 – Objetivo Geral	15
2.2 – Objetivos Específicos	15
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 – Transformadores	16
3.1.1 – Aspectos de construção de um transformador	17
3.1.2 – Partes constituintes de um transformador	20
a) Enrolamentos.....	20
b) Núcleo magnético	23
c) Isolamento	24
d) Tanque.....	28
3.1.3 – Outras características dos transformadores	29
a) Emprego.....	29
b) Número de enrolamentos.....	29
c) Número de fases	29
d) Tipos de resfriamento.....	29
3.1.4 – Tipos de Transformadores.....	30
a) Transformador Abaixador.....	30
b) Transformador Elevador.....	30
c) Transformador Monofásico.....	30
d) Transformador Polifásico.....	30
e) Banco de Transformadores	30
f) Transformador de Potência.....	30
g) Transformador de Potencial	30
h) Transformador de Corrente.....	31

i) Transformador de Alimentação	31
j) Transformador de Transmissão.....	31
k) Transformador de Distribuição	31
l) Transformador para Subestação	31
m) Autotransformador.....	32
n) Transformador de Rádio – Frequência (RF).....	32
o) Transformador de áudio	32
p) Transformadores de Pulso	32
3.1.5 – Transformador Ideal.....	33
3.1.6 – Reatâncias no transformador e circuitos equivalentes.....	36
3.1.7 – Ensaio	42
a) Ensaio de Curto-Circuito	42
b) Ensaio de Circuito Aberto.....	44
3.1.8 – Materiais Ferromagnéticos	46
a) Ferro-silício (FeSi) de grãos orientados (GO)	48
b) Ligas amorfas.....	50
3.1.9 – Perdas nos materiais ferromagnéticos.....	52
a) Perdas por histerese	52
b) Perdas por correntes parasitas	54
c) Perdas anômalas.....	57
4 – ESTUDOS DE CASOS	58
4.1 – Estudo de caso 1	59
4.1.1 – Estudo de viabilidade técnica	59
4.1.2 – Estudo de viabilidade econômica.....	64
4.2 – Estudo de caso 2.....	69
4.2.1 – Estudo comparativo de dois transformadores trifásicos de 500 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de ferro-silício GO.	69
4.2.2 – Estudo comparativo de dois transformadores trifásicos de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de ferro-silício GO laminado a frio.....	70
4.2.3 – Estudo sobre os efeitos das distorções harmônicas em transformadores trifásicos de 100 kVA e 250 kVA instalados num sistema de distribuição de energia elétrica localizado na Índia.....	71

5 – APLICAÇÕES DE LIGAS AMORFAS EM NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ELEVADA.....	73
6 – CONCLUSÕES	74
7 – REFERÊNCIAS.....	75

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, a maioria dos transformadores instalados nos sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais, são fabricados com núcleos de ferro-silício (FeSi) de Grãos Orientados (GO) e enrolamentos de cobre. Isto representa uma tecnologia consolidada, restando como alternativa para a melhoria da eficiência energética destes equipamentos a substituição dos materiais convencionais por outros que apresentem perdas específicas menores, além de beneficiar o meio ambiente pela redução da necessidade de construção de novas usinas geradoras de eletricidade.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica nas zonas urbanas funcionam na maior parte do dia e da noite em plena carga. Nessas condições, as perdas nos enrolamentos (circuito elétrico) se superpõem às perdas no núcleo (circuito magnético).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica localizados nas áreas rurais apresentam, em geral, alto custo de operação para as companhias concessionárias, devido à sazonalidade de suas cargas. Nessas condições, as perdas nos núcleos dos transformadores fabricados com aço ao silício convencional de GO tornam-se significativas pelo fato desses transformadores operarem na maior parte do tempo em condições de carga leve ou mesmo a vazio. Em tais circunstâncias, a corrente total solicitada pelo sistema tem uma parcela preponderantemente oriunda da corrente de excitação dos transformadores que, para efeito analítico, pode ser decomposta em duas componentes: uma magnetizante, de caráter não-linear, relacionada com as perdas histeréticas; e outra, em fase com a tensão, relacionada com as perdas ativas, provocada, sobretudo, pelas correntes parasitas.

Dentre os transformadores monofásicos utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica rurais destacam-se os transformadores monobuchas, caracterizados como monofilar com retorno por terra – MRT, que são transformadores com somente uma bucha no lado de alta tensão e uma, duas ou mais buchas no lado de baixa tensão. Geralmente, esses transformadores são de

baixo custo de aquisição e têm potências nominais de 5, 10 e 15 kVA. No Brasil, transformadores dessa natureza são fabricados de acordo com a NBR 5440.

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) serão apresentados os resultados dos estudos analíticos e práticos sobre o desempenho de transformadores de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais, com destaque para os aspectos das perdas nos circuitos elétricos e magnéticos, com vistas à eficiência energética.

2 - OBJETIVOS

2.1 - Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre as perdas de energia elétrica em transformadores instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais, com foco centrado na eficiência energética.

2.2 – Objetivos Específicos

- Realizar estudos sobre o princípio físico do funcionamento dos transformadores, em geral, e particularmente no que diz respeito às perdas de energia elétrica associadas ao processo de funcionamento desses equipamentos;
- Identificar formas de mitigar tais perdas;
- Analisar a viabilidade técnica e econômica do emprego de ligas amorfas em substituição às tradicionais ligas de ferro-silício GO utilizadas nos núcleos dos transformadores instalados nos sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais.

3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – Transformadores

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 5440, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Transformador é definido como: “um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas, geralmente, com tensões e intensidades de correntes diferentes”.

Essencialmente, um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. O fluxo comum estabelece um enlace com outro enrolamento, o secundário, induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência. Ao se estabelecer uma proporção adequada entre os números de espiras do primário e do secundário, praticamente qualquer relação de tensões, ou relação de transformação, pode ser obtida (FITZGERALD, 2006).

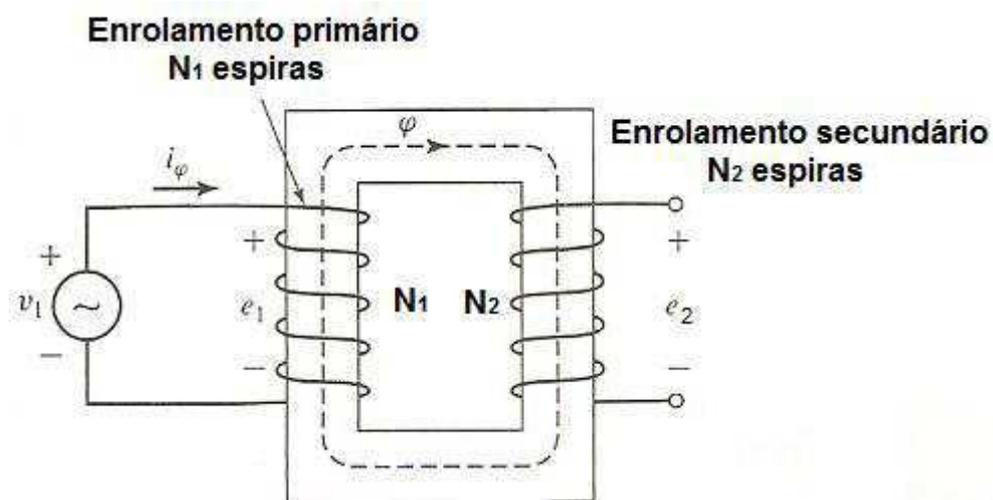


Figura 1- Transformador com secundário aberto (FITZGERALD, 2006).

A essência do funcionamento de um transformador é baseada na Lei de Faraday. De acordo com esta lei, basta apenas que haja um fluxo comum, variável no tempo, enlaçando dois enrolamentos para que ocorra a indução eletromagnética. Tal ação pode ocorrer entre enrolamentos acoplados pelo ar, no entanto, o acoplamento entre enrolamentos pode ser tornado muito mais eficiente usando-se um núcleo de material ferromagnético. Nesse caso, o fluxo em sua maior parte fica confinado a um caminho delimitado, de alta permeabilidade magnética, enlaçando os enrolamentos (FITZGERALD, 2006).

3.1.1 – Aspectos de construção de um transformador

Ao contrário da representação esquemática apresentada na Figura 1, não se deve supor que o número total de enrolamentos do primário é colocado em uma perna do núcleo ferromagnético e todas as espiras do enrolamento secundário são colocadas na outra perna. Tal arranjo acarreta uma quantidade excessiva de fluxo de dispersão, de forma que para uma dada fonte de tensão, o fluxo mútuo será correspondentemente menor. O procedimento usual na construção de um transformador é dividir as espiras do primário e do secundário. Isso mantém o fluxo de dispersão dentro de um pequeno percentual do fluxo mútuo. Evidentemente, uma redução ainda maior no fluxo de dispersão pode ser obtida por subdivisões adicionais e intercalando as espiras do primário e do secundário, mais isso implica uma elevação apreciável dos custos do conjunto (DEL TORO, 1994).

Os dois tipos principais de construção usados para transformadores monofásicos são o tipo núcleo envolvido e o tipo núcleo envolvente. No tipo núcleo envolvido, os enrolamentos são feitos envolvendo o ferro na forma indicada na Figura 2 (a). Na configuração típica, metade das espiras da bobina de baixa tensão é colocada em cada perna, próximas do ferro e separadas por uma camada adequada de isolante. Então, após outra camada de um isolante adequado, metade das espiras do enrolamento de alta tensão é colocada sobre a bobina de baixa tensão. O processo é repetido, na segunda perna. A construção tipo núcleo envolvido é a preferida nos transformadores de alta tensão, por facilitar a solução do problema de isolamento (DEL TORO, 1994).

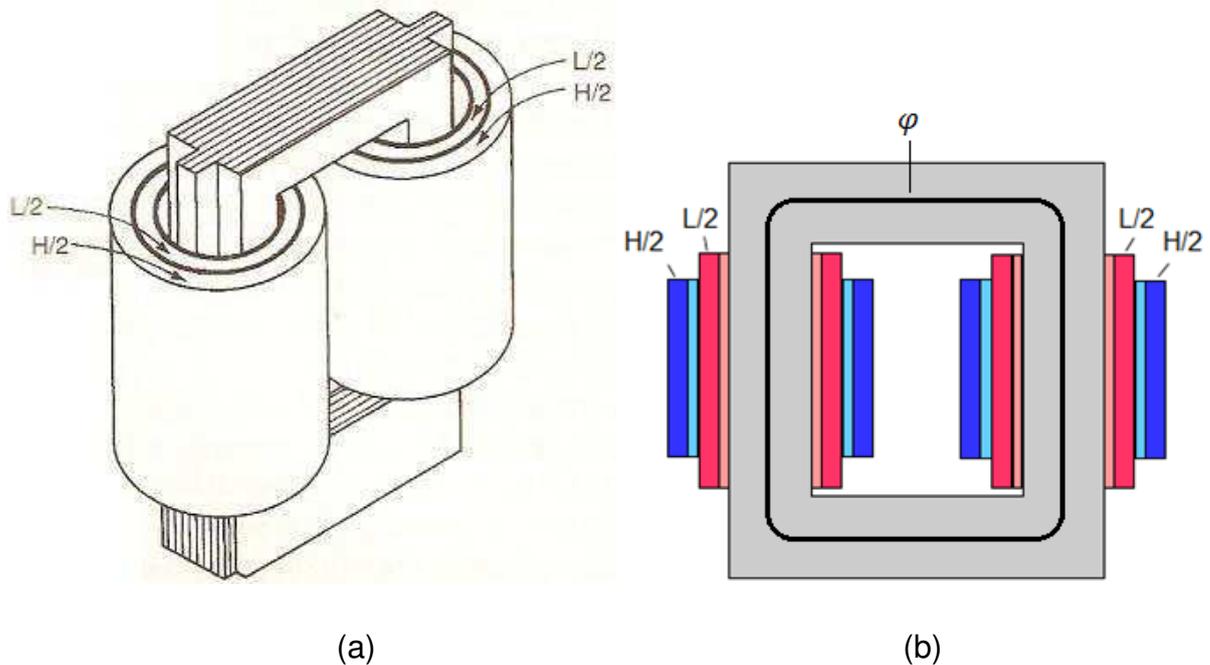


Figura 2 – (a) Aspectos da construção do transformador do tipo núcleo envolvido. H representa o número de espiras da bobina de alta tensão; L representa o número de espiras da bobina de baixa tensão (DEL TORO, 1994). (b) Diagrama em corte do transformador tipo envolvido (AGUIAR, 2007).

No transformador tipo núcleo envolvente, é o material ferromagnético que é colocado ao redor das bobinas, como visto na Figura 3 (a). As bobinas, nesta configuração, são, em geral, em uma forma plana, distintas das formas cilíndricas usadas no transformador de núcleo envolvido. Frequentemente o enrolamento de baixa tensão é dividido em três seções, com as duas seções externas com um quarto das espiras cada uma e a outra metade é intercalada entre as duas metades do enrolamento de alta tensão, como indicado no diagrama. A construção do tipo núcleo envolvente é a preferida para os transformadores de potência, nos quais circulam grandes correntes (DEL TORO, 1994).

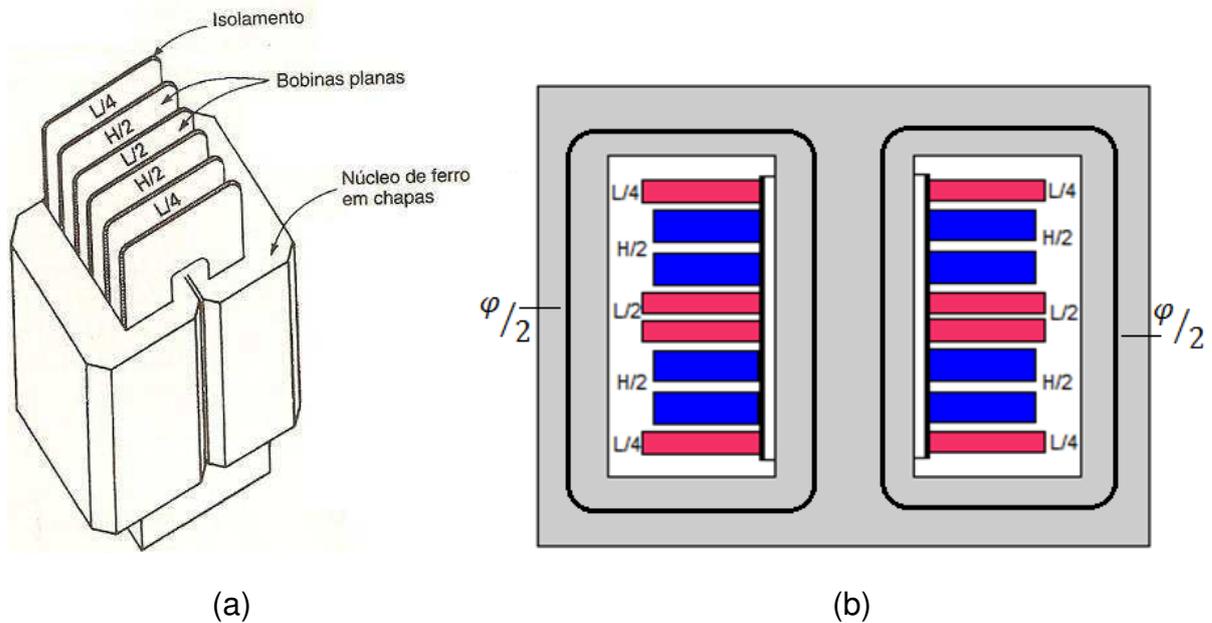


Figura 3 – (a) Aspectos da construção do transformador do tipo núcleo envolvente (DEL TORO, 1994). (b) Diagrama em corte do transformador tipo envolvente (AGUIAR, 2007).

Os transformadores de núcleo envolvente têm maior robustez mecânica e eficiência do que os de núcleo envolvido, porém são mais caros e de difícil fabricação, necessitando de tecnologia mais avançada em sua construção. A maior eficiência dos transformadores de núcleo envolvente se deve a um aumento na quantidade de material ferromagnético empregado em sua construção, e isso se dá porque o fluxo encontra dois caminhos paralelos internamente no núcleo, obtendo dessa forma o máximo de acoplamento magnético. Entretanto, como citado, necessita de tecnologia mais avançada em sua construção.

A montagem de transformadores de núcleo envolvente é muito utilizada em transformadores de pequena potência. Porém, para grandes transformadores esta montagem não é economicamente viável frente aos de núcleo envolvido, devido à complexidade de montagem dos enrolamentos e à economia de material na construção de transformadores trifásicos (AGUIAR, 2007).

3.1.2 – Partes constituintes de um transformador

O transformador é constituído de uma parte ativa, que compreende os enrolamentos e o núcleo magnético, ou seja, a parte funcional do equipamento, do isolamento e de um tanque.

a) Enrolamentos

Os condutores dos enrolamentos são feitos principalmente de cobre eletrolítico ou, em alguns casos, de alumínio, material elétrico de baixa resistividade, para formar bobinas cilíndricas dispostas coaxialmente nas colunas do núcleo em ordem crescente de tensão (AGUIAR, 2007), (ROXANA, 2001).

Nos transformadores industriais há várias maneiras de se disporem as bobinas a fim de se diminuir a dispersão magnética. Conforme a posição relativa em que são dispostas as bobinas de alta tensão (AT) e baixa tensão (BT) obtém-se os dois tipos de enrolamentos que são de bobinas concêntricas ou tubulares e de bobinas alternadas ou de discos (MARTIGNONI, 1991).

- Enrolamentos concêntricos ou tubulares

A construção dos enrolamentos concêntricos ou tubulares é feita dispendo sobre cada coluna os dois enrolamentos de alta e baixa tensão, concêntricos, separados entre si por meio de material isolante. Para maior segurança, perto da coluna, coloca-se sempre o enrolamento BT separado da mesma por meio de um tubo de material isolante. Os enrolamentos adquirem a forma vista na Figura 4 (a), na qual o enrolamento AT é dividido em várias bobinas sobrepostas e devidamente distanciadas, enquanto o enrolamento BT é geralmente constituído em forma de solenóide contínuo (MARTIGNONI, 1991).

Às vezes, porém, o enrolamento BT é subdividido em dois solenóides concêntricos, dispendo-se um destes próximo da coluna e o outro externamente ao enrolamento AT como pode ser visto na Figura 4 (b). Esta disposição diminui consideravelmente a dispersão (MARTIGNONI, 1991).

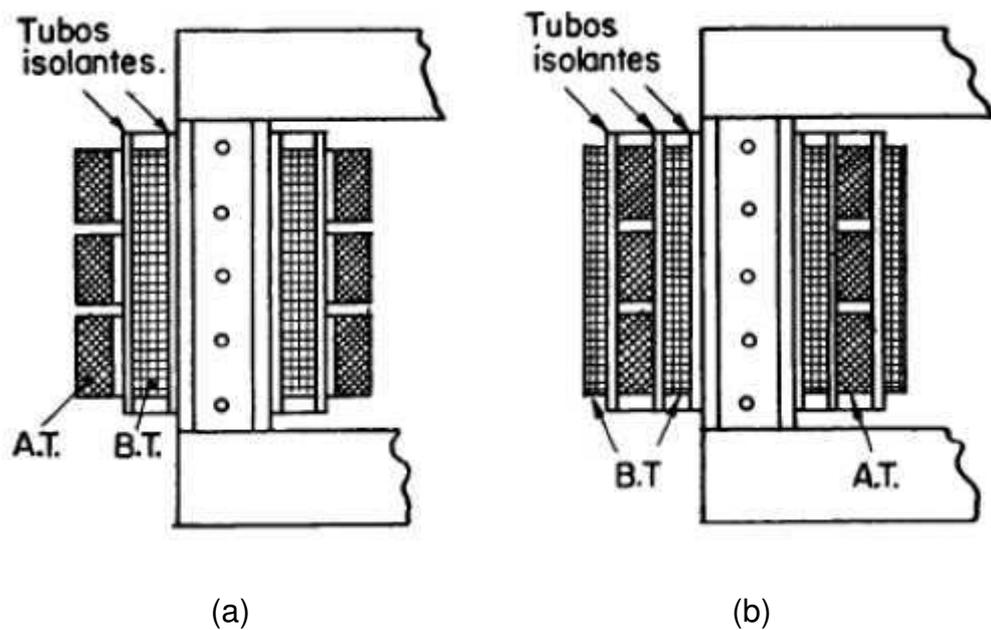


Figura 4 – Enrolamentos concêntricos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT). (a) BT (solenóide contínuo), AT (bobinas divididas). (b) BT (dois solenóides concêntricos, um externamente ao enrolamento AT) (MARTIGNONI, 1991).

Bobinas com condutores em paralelo, na direção radial, devem ter transposição, para minimizar as perdas adicionais e os esforços mecânicos provenientes de curtos-circuitos (ROXANA, 2001).

- Enrolamento com bobinas alternadas ou de discos

A construção dos enrolamentos com bobinas alternadas ou de discos é realizada executando-se ambos os enrolamentos AT e BT com várias bobinas de comprimento axial pequeno (discos) e sobrepondo-se as bobinas AT e BT alternadamente como são vistas na Figura 5. Para tornar mais fácil o isolamento contra a cabeça do núcleo, as bobinas são divididas de maneira que as extremas pertençam ao enrolamento BT. Para diminuir a dispersão, estas duas bobinas devem possuir metade da espessura das bobinas BT. O isolamento entre as bobinas sobrepostas é obtido com a interposição de coroas isolantes. O enrolamento com bobinas a discos é particularmente usado nos transformadores de núcleo envolvente (MARTIGNONI, 1991).

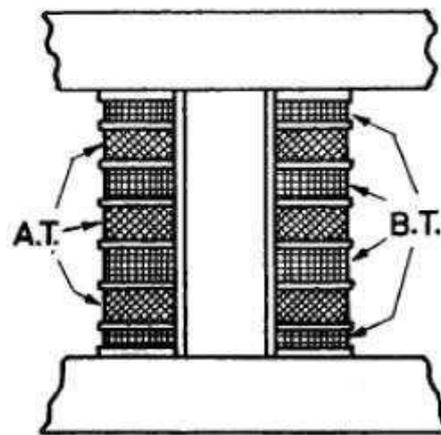


Figura 5 – Enrolamentos alternados AT e BT em disco (MARTIGNONI, 1991).

Na manufatura de transformadores monofásicos de distribuição, os condutores BT possuem geralmente seção retangular grande, pois apresentam tensões relativamente baixas e correntes muito intensas, e as espiras são isoladas por papel kraft e/ou camadas de algodão, sendo que por motivos econômicos, algumas não possuem isolamento. Os condutores AT possuem geralmente seção circular relativamente pequena, devido a tensões elevadas e circulação de correntes baixas, e as espiras são isoladas por verniz, onde a bitola, ou seja, a área da seção circular é geralmente indicada pelo sistema americano *American Wire Gauge (AWG)* (NUNES, 2011), (MARTIGNONI, 1991).



Figura 6 – Bobina de baixa tensão (BT) (NUNES, 2011).

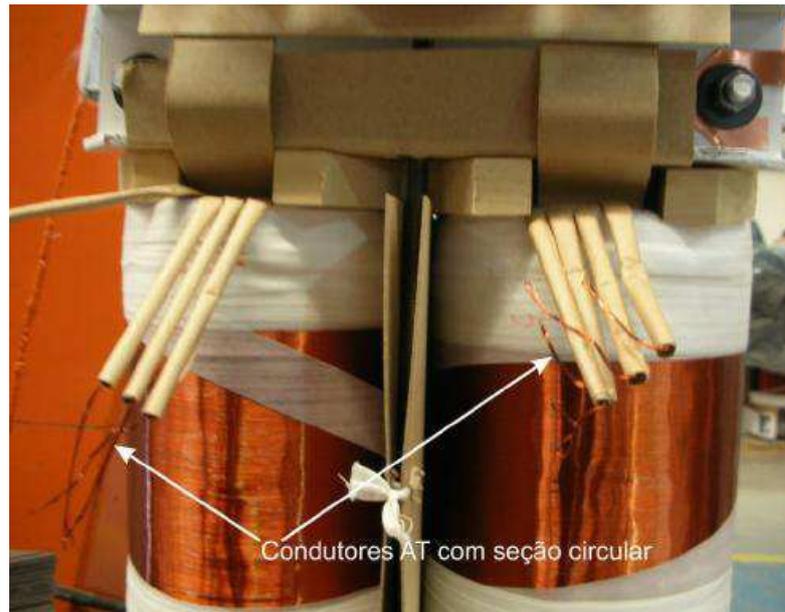


Figura 7 – Bobinas de alta tensão (AT) (NUNES, 2011).

b) Núcleo magnético

O núcleo magnético do transformador pode ser constituído de uma liga de aço-silício de grãos orientados, ou, como indicam aplicações recentes, de ligas amorfas, que são materiais ferromagnéticos que combinam grande permeabilidade magnética e resistência mecânica. Para reduzir as perdas provocadas pelo efeito Foucault, o núcleo deve ser laminado em chapas finas isoladas eletricamente entre si (AGUIAR, 2007).

Os materiais ferromagnéticos de liga de aço-silício de grãos orientados, utilizados na construção de núcleos de transformadores são sintetizados para formar materiais cristalinos que apresentam seus domínios magnéticos orientados paralelamente ao campo magnético, o que aumenta a sua permeabilidade magnética, permitindo alcançar altas densidades de fluxo com perdas reduzidas e baixas correntes de magnetização. As chapas são sustentadas por uma estrutura constituída de vigas metálicas, interligadas por tirantes, e por de fibra de vidro impregnados com resina (LUCIANO, 2010a), (ROXANA, 2001).

As ligas amorfas, utilizadas na construção de núcleos de transformadores, formam um grupo de materiais metálicos não-cristalinos, as quais se caracterizam por não possuírem, a longa distância, uma estrutura atômica ordenada.

Particularmente, os transformadores com núcleo de ligas amorfas, por apresentarem baixas perdas no núcleo, podem substituir os transformadores com núcleos de matérias ferromagnéticas cristalinos tradicionais (FeSi GO) em sistemas de distribuição de energia elétrica localizadas em zonas rurais ou em locais onde os transformadores operem por longos períodos em baixa carga (carregamentos inferiores a 10% de sua potência nominal) (LUCIANO, 2010a), (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO; BATISTA; CAMACHO, 2009).

O núcleo formado por liga amorfa é constituído por uma fita longa, contínua, com espessura média de 30 μm , bastante maleável e exigente no que se refere à ferramenta de corte (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO; BATISTA; CAMACHO, 2009).



Figura 8 – Núcleo de liga amorfa produzido industrialmente (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO; BATISTA; CAMACHO, 2009).

As perdas no núcleo, provocadas principalmente pelo efeito Foucault e pela histerese, também são uma fonte de calor que contribui com o aquecimento do transformador. Assim como nos enrolamentos, o núcleo deve possuir espaços por onde o fluido dielétrico possa circular e retirar o calor gerado (AGUIAR, 2007).

c) Isolamento

Os materiais isolantes (sólidos, líquidos e gasosos) têm dupla função: refrigerar e evitar a condução elétrica entre as bobinas, o núcleo e o tanque metálico dentro do qual é montado o conjunto (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO; BATISTA; CAMACHO, 2009).

Os condutores são envoltos por uma camada de material isolante à base de celulose (papel ou prespann) para criar o isolamento necessário. Praticamente toda a isolação do transformador dentro do tanque é feita utilizando materiais à base de celulose impregnada com fluido dielétrico, graças às suas excelentes características elétricas, mecânicas e térmicas (AGUIAR, 2007).

O papel isolante deve ter características elétricas, térmicas e mecânicas de acordo com o limite de elevação de temperatura do transformador (55 °C ou 65°C). Os condutores são enrolados em cilindros de prespann que proporcionam fixação mecânica e isolamento entre enrolamentos de fase e entre estes e o núcleo. Tiras de prespann, fixadas nesses cilindros, no sentido axial, formam canais de óleo que, além de contribuírem para o isolamento entre os enrolamentos de BT e AT, facilitam a refrigeração (ROXANA, 2001).



Figura 9 – Canal de óleo (NUNES, 2011).

Os condutores AT são isolados por verniz e por uma camada protetora adicional de verniz para isolamento de camadas. As bobinas AT e BT possuem, nas extremidades inferiores e superiores das bobinas, as cabeceiras, fitas de papel utilizadas para isolamentos entre a bobina AT e o núcleo, e entre as bobinas BT e AT (NUNES, 2011).



Figura 10 – Isolamento dos condutores AT (NUNES, 2011).



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Cabeceiras BT. (b) Cabeceiras AT (NUNES, 2011).

Barreiras isolantes adicionais (papel prespann) são, em geral, usadas entre enrolamentos de fases diferentes e entre enrolamentos, núcleo e o tanque. Além de suas funções isolantes, estas barreiras diminuem as espessuras dos canais de óleo, o que aumentam a rigidez dielétrica nestes canais (kV/mm). Sempre que possível, as barreiras de prespann devem coincidir com superfícies equipotenciais, para evitar, assim, o risco de descargas superficiais (ROXANA, 2001).

Nos transformadores, a imobilidade de suas partes componentes prejudica a dispersão do calor, que resulta das perdas no cobre e no ferro. Esta imobilidade, porém, permite o emprego de um meio refrigerante líquido, que é mais eficaz que o ar, o que é feito imergindo-se todo o transformador em uma caixa cheia de líquido apropriado. O líquido mais conveniente e universalmente empregado é o óleo mineral, fluido dielétrico que, além de apresentar uma elevada capacidade térmica e um excelente coeficiente de transmissão de calor, é também um ótimo isolante, que apresenta uma rigidez dielétrica quase cinco vezes maior que o ar. O poder isolante do óleo mineral permite reduzir consideravelmente o volume do transformador (MARTIGNONI, 1991).

Para que o óleo possa cumprir sua tarefa de isolante, deve ser isento de umidade e deve poder penetrar facilmente entre as bobinas a fim de impregnar os separadores. Por esta razão, usam-se como separadores: algodão, papel e prespann e excluem-se, pelo contrário, borracha e derivados (MARTIGNONI, 1991).

Para facilitar a circulação do fluido dielétrico e permitir que este retire o calor gerado pelo enrolamento, adicionam-se espaçadores entre as camadas de condutores com a função de manter este caminho de circulação e assegurar a rigidez mecânica do conjunto do enrolamento. Os espaçadores são feitos de cartão prensado ou de madeira seca (AGUIAR, 2007).

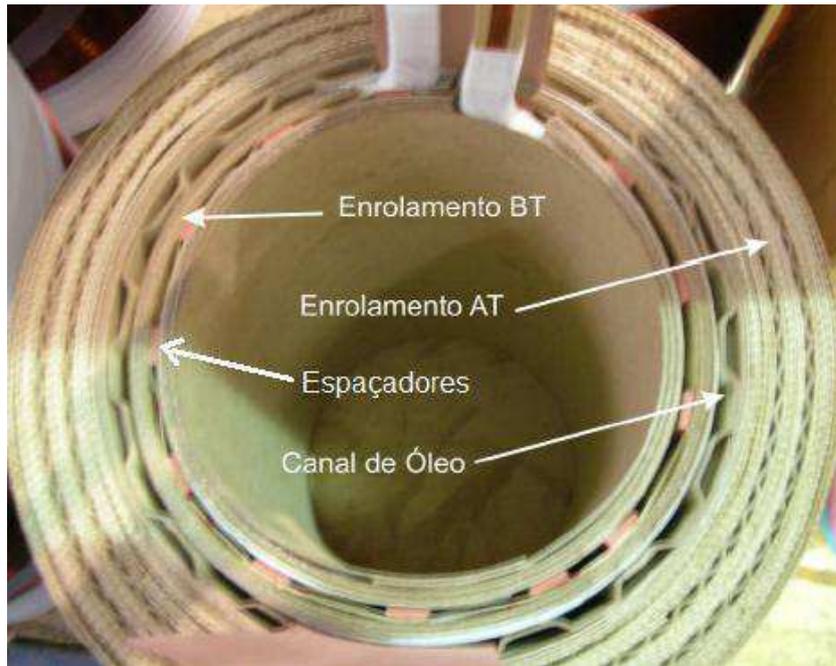


Figura 12 - Vista superior da bobina de um transformador de distribuição (NUNES, 2011).

d) Tanque

O tanque é constituído por uma chapa de aço e tem a função de confinar o fluido dielétrico e manter a parte ativa imersa, além de sustentar todos os outros componentes do transformador e manter a estanqueidade em seu interior, pois tanto o fluido quanto os outros materiais dielétricos são muito sensíveis ao contato com a umidade, poeira ou mesmo o ar atmosférico. A estanqueidade é importante também pelo fato de o fluido geralmente ser inflamável e um pequeno vazamento poderá expor o equipamento a incêndios (AGUIAR, 2007).

A chapa que constitui o tanque é moldada através de uma máquina e soldada dando, dando uma forma ao tanque. 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 (NUNES, 2011).



Figura 13 – Tanque do transformador pronto para ser soldada a parte inferior (NUNES, 2011).

3.1.3 – Outras características dos transformadores

a) Emprego

- Elevador de tensão ou corrente
- Redutor de tensão ou corrente
- Auxiliar de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção
- Transmissão de energia elétrica
- Distribuição de energia elétrica
- Eletrônica

b) Número de enrolamentos

- Dois ou mais enrolamentos
- Um enrolamento (autotransformador)

c) Número de fases

- Monofásico
- Polifásico

d) Tipos de resfriamento

- Resfriamento natural (com ar) – (SN)
- Resfriamento com ventilação forçada (SVF)
- Resfriamento por circulação natural do líquido isolante (LN)

- Resfriamento por circulação natural do líquido isolante e ventilação forçada sobre o tanque e radiadores (LN - VF)
- Refrigeração em óleo com serpentina de água interna (LN - ACF)
- Refrigeração em óleo com serpentina de água externa (LCF - ACF) (MARTIGNONI, 1991).

3.1.4 – Tipos de Transformadores

a) Transformador Abaixador

Transformador no qual a tensão do enrolamento primário é superior a do enrolamento secundário.

b) Transformador Elevador

Transformador no qual a tensão do enrolamento primário é inferior a do enrolamento secundário.

c) Transformador Monofásico

Transformador destinado a funcionar com corrente alternada monofásica.

d) Transformador Polifásico

Transformador destinado a funcionar com corrente alternada polifásica.

e) Banco de Transformadores

Conjunto de transformadores monofásicos interligados, de modo a formarem o equivalente de um transformador polifásico.

f) Transformador de Potência

Transformador de construção e características adequadas para empregos em sistemas de potência.

g) Transformador de Potencial

Transformador para instrumento utilizado em medição, controle ou proteção, que tem como objetivo, de uma parte proteger o operador no momento da medição

em alta tensão e, de outra, permitir a utilização de aparelhos de medição de calibres usuais.

h) Transformador de Corrente

Transformador para instrumento utilizado em medição, controle ou proteção, geralmente reduzindo o nível de corrente do circuito primário na linha de AT para valores mais baixos no secundário, que deve ser conectado a uma carga de baixíssima impedância, por exemplo, os amperímetros.

i) Transformador de Alimentação

O transformador de alimentação é usado em fontes, convertendo a tensão da rede em tensões necessárias ao funcionamento dos circuitos eletrônicos. Seu núcleo é feito com chapas de aço ao silício, que apresentam baixas perdas, em baixas frequências, por isto é muito eficiente. Às vezes, esses transformadores possuem blindagens, invólucros metálicos (ROXANA, 2001).

j) Transformador de Transmissão

Transformador de potência destinado a emprego em sistemas de transmissão de energia elétrica.

k) Transformador de Distribuição

Encontrado nos postes e entradas de força em alta tensão (industriais), os transformadores de distribuição são de elevada potência e projetados para ter alta eficiência (da ordem de 99%), de modo a minimizar o desperdício de energia e o calor gerado. Geralmente, os transformadores de distribuição possuem refrigeração a óleo, que circula pelo núcleo dentro de uma carapaça metálica com grande área de contato com o ar exterior. Seu núcleo pode ser de chapas de aço-silício ou de ligas amorfas, podendo ser monofásico ou trifásico (ROXANA, 2001).

l) Transformador para Subestação

Transformadores para subestações são equipamentos fabricados de forma adequada para serem instalados em subestações.

m) Autotransformador

Nos autotransformadores os enrolamentos primário e secundário coincidem parcialmente e sempre são bobinados numa mesma carcaça. Os acessos ao primário e ao secundário são coincidentes ou com as extremidades ou com pontos intermédios do enrolamento, sendo um dos terminais do primário sempre coincidente com um do secundário.

Os autotransformadores têm reatâncias de dispersão menores, perdas mais baixas, menores correntes de excitação e custam menos que os transformadores de dois enrolamentos, desde que as relações de tensões não sejam muito diferentes de 1:1 (FITZGERALD, 2006).

n) Transformador de Rádio – Frequência (RF)

Emprega-se em circuitos RF (acima de 30 kHz), no acoplamento entre etapas dos circuitos de rádio e TV. Sua potência em geral é baixa, e os enrolamentos têm poucas espiras. Usualmente, utiliza-se ferrite como material do núcleo do transformador de RF. A ferrite ou ferrite é um material sintético, composto de óxidos de ferro, níquel, zinco, cobalto e magnésio em pó, aglutinados por um plastificante. Este material se caracteriza por ser magneticamente mole e apresentar baixas perdas eletromagnéticas, mesmo em altas frequências (o que não acontece com chapas de aço-silício). Núcleos de ferrites costumam ter blindagem de alumínio, para dispersar interferências, inclusive de outras partes do circuito (ROXANA, 2001).

o) Transformador de áudio

Transformador de áudio (TA) é usado em aparelhos de som em certas configurações a transistor, no acoplamento entre etapas amplificadoras e saídas de autofalante. Geralmente, o TA é semelhante ao transformador de alimentação em forma e no núcleo de aço-silício, embora também se use o ferrite. Sua resposta de frequência dentro da faixa de áudio, 20 a 20 kHz, não é perfeitamente plana, mesmo usando materiais de alta qualidade no núcleo, o que limita seu uso (ROXANA, 2001).

p) Transformadores de Pulso

Transformadores de pulso são usados no acoplamento, isolando os circuitos de controle, de baixa tensão e potência, dos tiristores, chaves semicondutoras, além

de isolarem um tiristor de outro (vários secundários). Tradicionalmente, esses transformadores são confeccionados com núcleo de ferrite, e recentemente têm sido empregados núcleos de ligas metálicas obtidas pelo método de solidificação rápida (amorfas e nanocristalinas) (ROXANA, 2001).

3.1.5 – Transformador Ideal

Um transformador é considerado ideal quando se supõem que as resistências dos enrolamentos são desprezíveis, que todo o fluxo está confinado ao núcleo enlaçando ambos os enrolamentos (primário e secundário), isto é, o fluxo disperso é considerado desprezível, que não há perdas no núcleo, e que a permeabilidade do núcleo é tão alta que apenas uma força magnetomotriz (FMM) de excitação insignificante é requerida para criar o fluxo (FITZGERALD, 2006).

Considere um transformador com um enrolamento primário de N_1 espiras e um secundário de N_2 espiras, como visto na Figura 14.

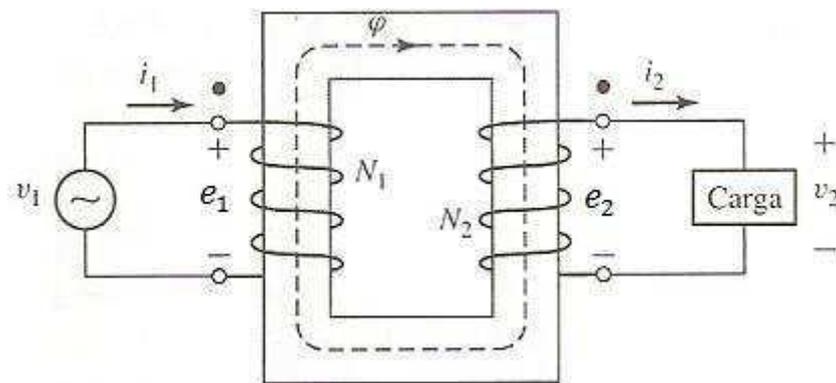


Figura 14 – Transformador ideal com carga (FITZGERALD, 2006).

Tomando como base a lei de Faraday/Lenz, quando uma tensão v_1 variável no tempo for aplicada aos terminais do primário, então o fluxo ϕ deve ser estabelecido no núcleo de modo que a força contra - eletromotriz (FCEM) e_1 seja igual à tensão aplicada. Assim,

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

O fluxo do núcleo também concatena o secundário produzindo uma força eletromotriz (FEM) induzida e_2 igual à tensão v_2 nos terminais do secundário, dadas por,

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

Da razão entre as expressões 1 e 2, tem-se

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

Logo, da expressão 3, deduz-se que um transformador ideal transforma tensões na razão direta das espiras de seus enrolamentos.

Com uma carga conectada ao secundário, uma corrente i_2 e uma FMM $N_2 i_2$ estarão presentes no secundário. Como se supõe que a permeabilidade do núcleo seja muito elevada e que o fluxo do núcleo seja estabelecido pela tensão aplicada ao primário, então o fluxo do núcleo não irá se alterar com a presença de uma carga no secundário, e assim a FMM líquida de excitação, que atua no núcleo, igual a $N_1 i_1 - N_2 i_2$, também não irá se alterar permanecendo desprezível (FITZGERALD, 2006).

Assim, tomando como base a Lei de Ampère:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (4)$$

Da equação 4, vê-se que uma FMM de compensação deve surgir no primário para cancelar a do secundário. Portanto,

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (5)$$

A condição de manter inalterada a FMM líquida é o meio pelo qual o primário “toma conhecimento” da presença de uma corrente de carga no secundário. Qualquer mudança na FMM que flui no secundário, resultante de uma carga, deve se fazer acompanhada de uma mudança correspondente na FMM do primário. Para

os sentidos de referência vistos na Figura 14, os valores de FMM de i_1 e de i_2 estão em sentidos opostos e, portanto, compensam-se. Assim, a FMM líquida que atua no núcleo é zero, em concordância com a suposição de que a corrente de excitação de um transformador ideal seja zero (FITZGERALD, 2006).

Da expressão 5,

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

Portanto, um transformador ideal transforma correntes na razão inversa das espiras de seus enrolamentos.

Das expressões 3 e 6, obtém,

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (7)$$

Ou seja, a potência instantânea de entrada do primário é igual à potência instantânea de saída do secundário, uma condição necessária porque todos os mecanismos dissipativos e de armazenamento de energia foram desconsiderados (FITZGERALD, 2006).

Em forma fasorial, as expressões 3 e 6 podem ser expressas como

$$\hat{V}_1 = \frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2 \quad \text{e} \quad \hat{V}_2 = \frac{N_2}{N_1} \hat{V}_1 \quad (8)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2 \quad \text{e} \quad \hat{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \hat{I}_1 \quad (9)$$

Dessas expressões, obtém,

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} \quad (10)$$

Observando que a impedância de carga Z_2 relaciona-se com a tensão e a corrente do secundário por:

$$Z_2 = \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} \quad (11)$$

Onde Z_2 é a impedância complexa da carga. Uma impedância no circuito do secundário pode ser substituída por uma impedância equivalente Z_1 , como apresentado na Figura 15, desde que:

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (12)$$

Desta forma, as impedâncias são transformadas proporcionalmente ao quadrado da relação de espiras. Do mesmo modo, as tensões e correntes podem ser referidas a um lado ou outro de um transformador utilizando as expressões 8 e 9 (FITZGERALD, 2006).

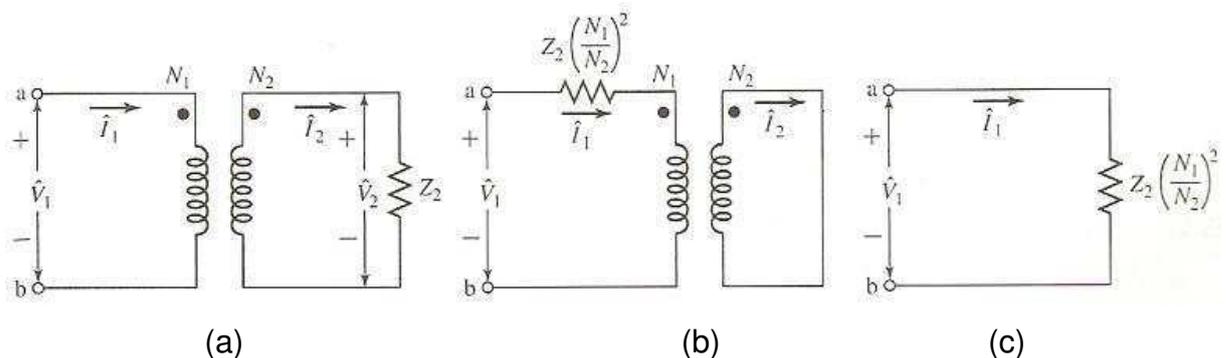


Figura 15 – Três circuitos idênticos nos terminais ab para um transformador ideal (FITZGERALD, 2006).

3.1.6 – Reatâncias no transformador e circuitos equivalentes

Um modelo mais completo de um transformador deve levar em consideração os efeitos das resistências dos enrolamentos, os fluxos dispersos e as correntes finitas de excitação devidas à permeabilidade finita (não-linear) do núcleo. O modelo que considera estes efeitos é o transformador real (FITZGERALD, 2006).

Para iniciar o desenvolvimento de um circuito equivalente de transformador, analisa-se primeiro o enrolamento primário. O fluxo total que concatena o enrolamento primário pode ser dividido em duas componentes: o fluxo mútuo

resultante, confinado essencialmente ao núcleo de material ferromagnético e produzido pelo efeito combinado das correntes de primário e de secundário, e o fluxo disperso de primário, que concatena apenas o primário. Essas componentes estão identificadas no transformador esquemático visto na Figura 16, que para efeito didático, os enrolamentos do primário e do secundário estão mostrados em pernas opostas do núcleo (FITZGERALD, 2006).

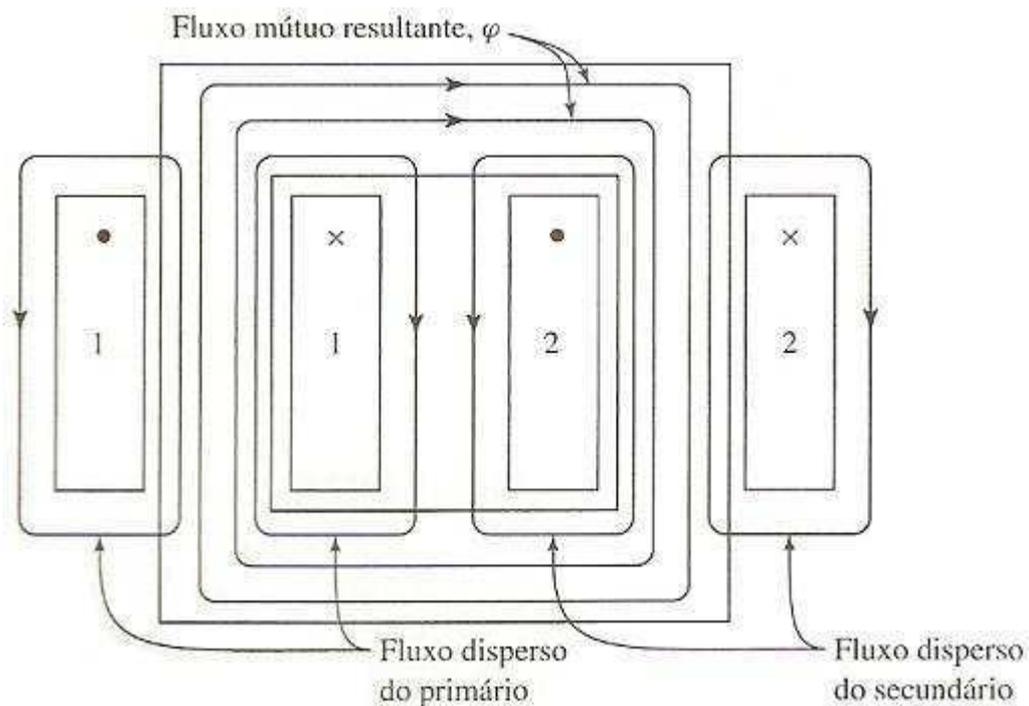


Figura 16 – Vista esquemática dos fluxos mútuo e disperso de um transformador (FITZGERALD, 2006).

No enrolamento primário, o fluxo disperso induz uma tensão que se soma àquela produzida pelo fluxo mútuo. Como a maior parte do caminho do fluxo disperso está no ar, esse fluxo e a tensão induzida por ele variam linearmente com a corrente \hat{I}_1 de primário. Portanto, pode ser representado por uma indutância de dispersão do primário L_{l_1} , igual ao fluxo de dispersão (FITZGERALD, 2006).

A correspondente reatância de dispersão de primário X_{l_1} é dada por:

$$X_{l_1} = 2\pi f L_{l_1} \quad (13)$$

Além disto, haverá uma queda de tensão na resistência do enrolamento R_1 do primário. Dessa forma, a tensão nos terminais do primário \hat{V}_1 consiste em três

componentes: a queda $\hat{I}_1 R_1$ na resistência do primário, a queda $\hat{I}_1 X_{l_1}$ oriunda do fluxo disperso no primário e a FEM \hat{E}_1 induzida no primário pelo fluxo mútuo resultante (FITZGERALD, 2006).

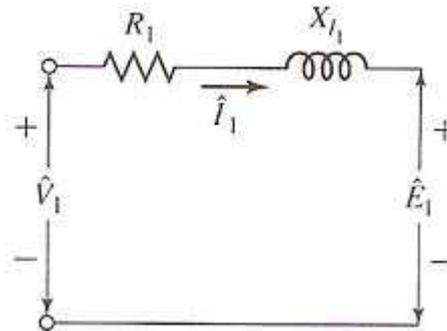


Figura 17 – Circuito equivalente do enrolamento primário (FITZGERALD, 2006).

A corrente do primário deve atender a duas condições do circuito magnético: produzir a FMM requerida para gerar o fluxo mútuo resultante, ou seja, magnetizar o núcleo, e contrabalançar o efeito da FMM do secundário que atua no sentido de desmagnetizar o núcleo. Esta corrente também tem a função de fornecer a corrente para a carga conectada ao secundário (FITZGERALD, 2006).

Desta forma é conveniente decompor a corrente do primário em duas componentes: uma de excitação e outra de carga.

A corrente de excitação é definida como uma corrente de primário adicional, não-senoidal pela influência não-linear do núcleo magnético, necessária para produzir o fluxo mútuo resultante. Se esta corrente for analisada por métodos baseados em séries de Fourier, constata-se que ela consiste em uma componente fundamental e uma série de harmônicas ímpares. A componente fundamental pode ser decomposta em duas componentes, uma em fase com a FCEM e a outra atrasada 90° em relação à FCEM. A componente em fase fornece a potência absorvida no núcleo pelas perdas por histerese e correntes parasitas, e é referida como sendo a componente de perdas no núcleo da corrente de excitação. Quando a componente de perdas no núcleo é subtraída da corrente de excitação, resulta na corrente de magnetização, que compreende uma componente atrasada 90° em relação à FCEM, junto com todas as harmônicas, sendo a harmônica principal a

terceira, que corresponde a cerca de 40% da corrente de excitação (FITZGERALD, 2006).

Devido a corrente de excitação ser pequena, cerca de 1 a 2% da corrente a plena carga em transformadores de potência típicos, especialmente em transformadores de grande porte, as suas peculiaridades geralmente não são levadas em consideração, exceto em problemas que tratam os efeitos das correntes harmônicas. Desta forma, a corrente de excitação pode ser representada por uma corrente senoidal equivalente, de mesmo valor eficaz e frequência, capaz de produzir a mesma potência média que a corrente de excitação real (FITZGERALD, 2006).

Na Figura 18, os fasores \hat{E}_1 , $\hat{\phi}$ e \hat{I}_φ , respectivamente, representam os valores eficazes da FEM induzida, do fluxo e da corrente de excitação senoidal equivalente, atrasada de um ângulo θ_c em relação à \hat{E}_1 . O valor das perdas no núcleo P_c é dado por:

$$P_c = E_1 I_\varphi \cos \theta_c \quad (14)$$

A componente \hat{I}_c , em fase com \hat{E}_1 , é a corrente das perdas no núcleo. A componente \hat{I}_m , em fase com o fluxo, representa a componente de magnetização atrasada 90° em relação à \hat{E}_1 .

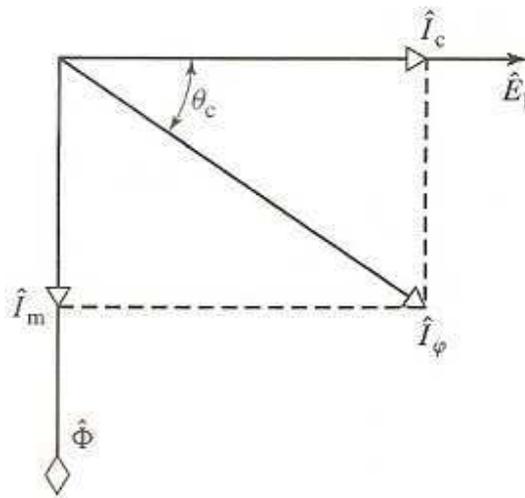


Figura 18 – Diagrama fasorial sem carga (FITZGERALD, 2006).

A componente de carga \hat{I}_2' é definida como sendo uma componente da corrente de primário que contrabalança exatamente a FMM da corrente de secundário \hat{I}_2 . Esta componente é igual à corrente de secundário referida ao primário, como no transformador ideal (FITZGERALD, 2006).

Na Figura 19, o ramo de derivação conectado a \hat{E}_1 é denominado ramo de excitação, por onde circula \hat{I}_ϕ e que compreende a impedância de magnetização Z_ϕ , combinação em paralelo da resistência de magnetização ou de perdas no núcleo (R_c) e da reatância de magnetização (X_m), sendo esta dada por:

$$X_m = 2\pi f L_m \quad (15)$$

Onde: L_m é a indutância de magnetização.

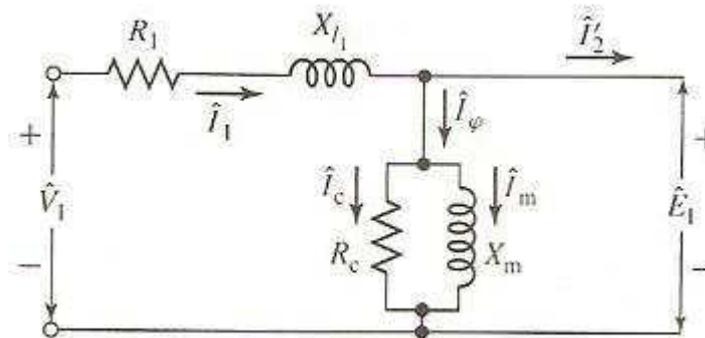


Figura 19 – Circuito equivalente com o ramo de excitação (FITZGERALD, 2006).

O fluxo mútuo resultante $\hat{\phi}$ induz uma FEM \hat{E}_2 no secundário. Como esse fluxo concatena ambos os enrolamentos, a razão entre as FEMs induzidas é igual à relação de espiras dos enrolamentos, tal como em um transformador ideal. Desta forma, as transformações de corrente e tensão podem ser incluídas introduzindo-se um transformador ideal, como pode ser visto na Figura 20 (FITZGERALD, 2006).

$$\frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

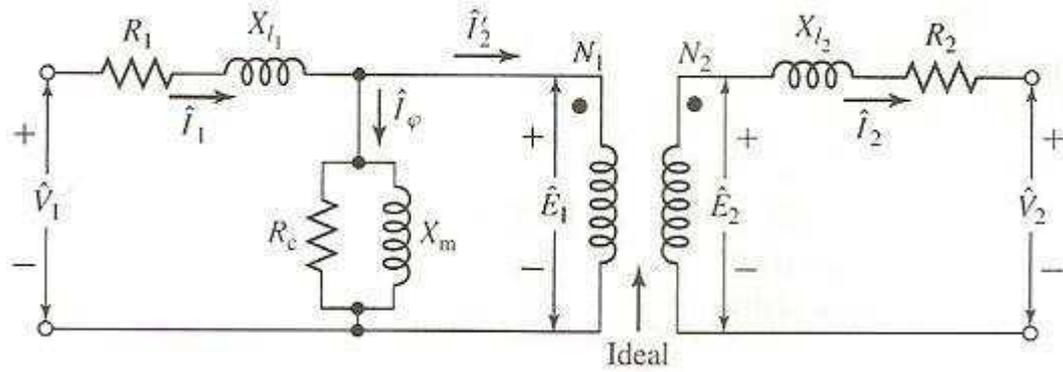


Figura 20 – Circuito equivalente do transformador real (FITZGERALD, 2006).

Entretanto, a FEM \hat{E}_2 não é a tensão presente nos terminais do secundário por causa da resistência R_2 do secundário e porque a corrente \hat{I}_2 do secundário cria um fluxo disperso no secundário (ver Figura 16). Entre a tensão nos terminais do secundário \hat{V}_2 e a tensão induzida \hat{E}_2 existe uma diferença dada pela queda de tensão devido à resistência de secundário R_2 e à reatância de dispersão do secundário X_{l2} , como visto à direita de \hat{E}_2 do circuito equivalente do transformador na Figura 20 (FITZGERALD, 2006).

Do circuito equivalente da Figura 20, pode-se ver que um transformador real é equivalente a um transformador ideal acrescido das impedâncias relativas aos circuitos elétricos e magnéticos. Referindo todas as grandezas ao primário, chega-se ao circuito visto na Figura 21, onde o transformador ideal é omitido.

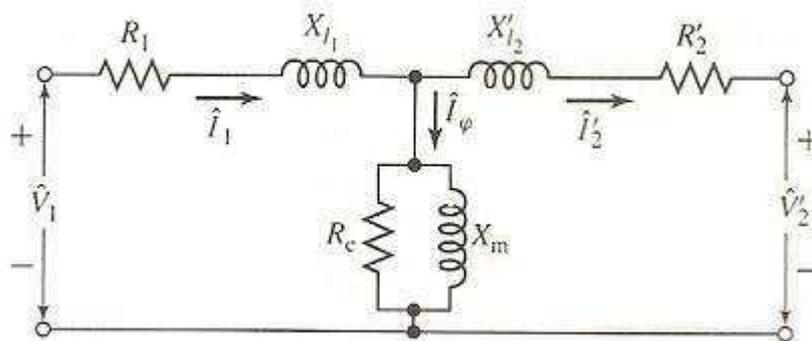


Figura 21 – Circuito equivalente T de um transformador (FITZGERALD, 2006).

3.1.7 – Ensaaios

Dois ensaios muito simples servem para determinar os parâmetros dos circuitos equivalentes de um transformador, que consistem em medir tensão, corrente e potência de entrada do primário, primeiro com o secundário em curto-circuito e após com o secundário em circuito aberto.

a) Ensaio de Curto-Circuito

O ensaio de curto-circuito é utilizado para encontrar a impedância equivalente em série $R_{eq} + jX_{eq}$, onde:

$$R_{eq} = R_1 + R_2' \quad (17)$$

$$X_{eq} = X_{l1} + X_{l2}' \quad (18)$$

Neste tipo de ensaio, por conveniência, o lado de alta tensão é tomado como sendo o primário. Mais para simplificar, considera-se que o curto-circuito seja aplicado ao secundário do transformador e a tensão ao primário, como visto na Figura 22, com a impedância do secundário referida ao lado do primário (FITZGERALD, 2006).

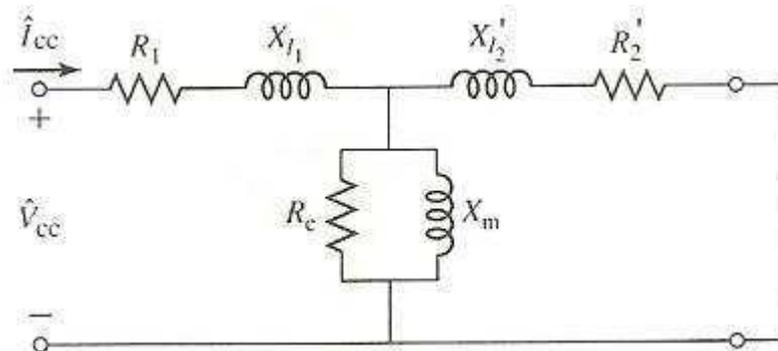


Figura 22 – Circuito equivalente completo com o secundário do transformador em curto-circuito (FITZGERALD, 2006).

Devido à impedância equivalente em série de um transformador típico ser relativamente baixa, uma tensão da ordem de 10 a 15% ou menos do valor nominal, aplicada ao primário, resulta na corrente nominal (FITZGERALD, 2006).

A impedância de curto-circuito Z_{CC} , olhando para o primário sob essas condições é:

$$Z_{CC} = R_1 + jX_{l1} + \frac{Z_\varphi(R_2' + jX_{l2}')}{Z_\varphi + R_2' + jX_{l2}'} \quad (19)$$

Como a impedância Z_φ do ramo de excitação é muito maior do que a impedância de dispersão do secundário, a impedância de curto-circuito pode ser aproximada por:

$$Z_{CC} \approx R_1 + jX_{l1} + R_2' + jX_{l2}' = R_{eq} + jX_{eq} \quad (20)$$

Esta aproximação é equivalente a reduzir o circuito equivalente T ao L , como pode ser visto na Figura 23.

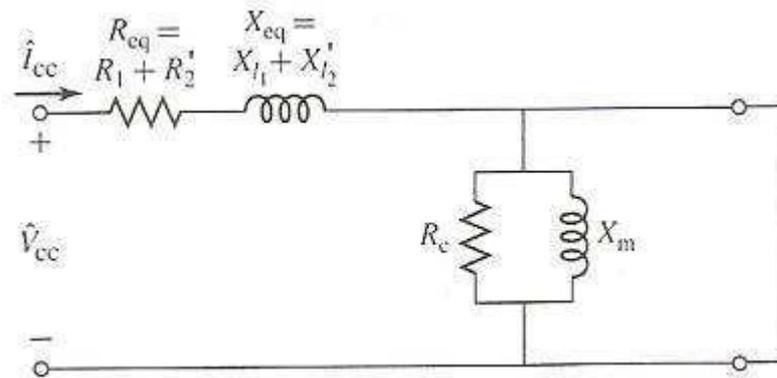


Figura 23 – Circuito equivalente L com o ramo de excitação no secundário do transformador (FITZGERALD, 2006).

A impedância vista na entrada desse circuito equivalente L é claramente $Z_{CC} = Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$, porque a corrente de excitação foi colocada diretamente em curto pelo curto-circuito do secundário (FITZGERALD, 2006).

A instrumentação tipicamente utilizada nesse ensaio mede os valores eficazes da tensão aplicada V_{CC} , da corrente de curto-circuito I_{CC} e da potência P_{CC} . Com estas três medidas, a resistência e a reatância equivalentes, referidas ao primário, são obtidas em módulo a partir de:

$$|Z_{eq}| = |Z_{CC}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (21)$$

$$R_{eq} = R_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (22)$$

$$X_{eq} = X_{CC} = \sqrt{|Z_{CC}|^2 - R_{CC}^2} \quad (23)$$

b) Ensaio de Circuito Aberto

O ensaio de circuito aberto ou a vazio é realizado com o secundário em aberto e a tensão nominal aplicada ao primário. Nestas condições, uma corrente de excitação de alguns poucos por cento da corrente de carga total é obtida. A tensão nominal é escolhida de modo a assegurar que a reatância de magnetização opere em um nível de fluxo próximo daquele que ocorre em condições normais de operação. Se o transformador for usado em alguma outra tensão, diferente da nominal, então o ensaio deve ser feito com aquela e não com a nominal. Por conveniência, o lado de baixa tensão é tomado usualmente como sendo o primário nesse ensaio (FITZGERALD, 2006).

Na Figura 24 pode ser visto o circuito equivalente, com a impedância do secundário do transformador referida ao lado primário, e o secundário em aberto. A impedância de circuito aberto Z_{ca} vista no primário sob essas condições é:

$$Z_{ca} = R_1 + jX_{l1} + Z_{\varphi} = R_1 + jX_{l1} + \frac{R_c(jX_m)}{R_c + jX_m} \quad (24)$$

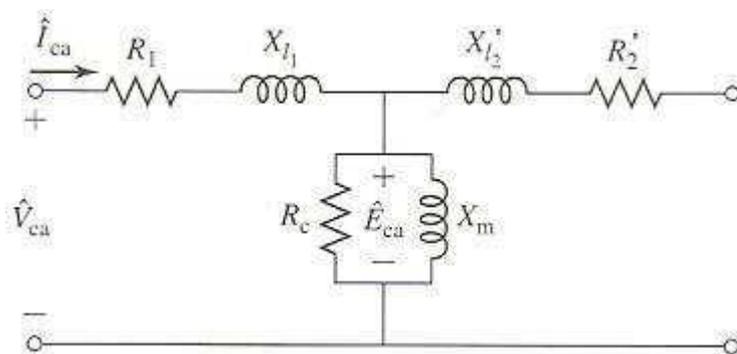


Figura 24 – Circuito equivalente completo com o secundário do transformador em aberto (FITZGERALD, 2006).

Como a impedância do ramo de excitação é bem elevada, a queda de tensão na impedância de dispersão do primário, causada pela corrente de excitação, é

normalmente desprezível, e a tensão aplicada ao primário \hat{V}_{ca} é quase igual à FEM \hat{E}_{ca} induzida pelo fluxo resultante no núcleo. Do mesmo modo, a perda $I_{ca}^2 R_1$ no primário, causada pela corrente de excitação, é desprezível, de modo que a potência de entrada P_{ca} é quase igual à perda no núcleo E_{ca}^2/R_c . Como resultado, é comum ignorar a impedância de dispersão do primário, e aproximar a impedância de circuito aberto como sendo igual à impedância de magnetização (FITZGERALD, 2006).

Assim:

$$Z_{ca} \approx Z_{\varphi} \approx \frac{R_c(jX_m)}{R_c + jX_m} \quad (25)$$

Esta aproximação é equivalente a reduzir o circuito equivalente *T* ao *L*, como pode ser visto na Figura 25. A impedância vista na entrada desse circuito equivalente é claramente Z_{φ} porque nenhuma corrente circula no secundário em aberto (FITZGERALD, 2006).

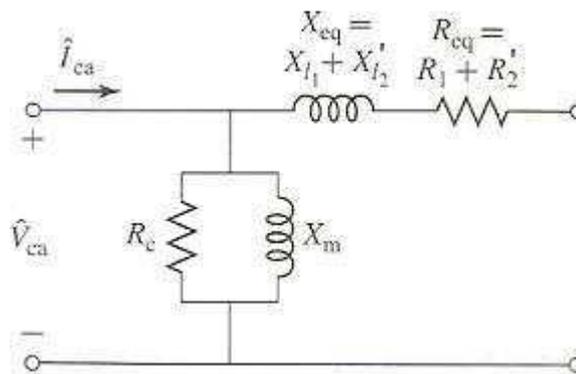


Figura 25 – Circuito equivalente *L* com o ramo de excitação no primário do transformador (FITZGERALD, 2006).

A instrumentação tipicamente utilizada nesse ensaio mede os valores eficazes da tensão aplicada V_{ca} , da corrente de circuito aberto I_{ca} e da potência P_{ca} . Com estas três medidas e desprezando a impedância de dispersão do primário, a resistência e a reatância de magnetização, referidas ao primário, são obtidas em módulo a partir de:

$$R_c = \frac{V_{ca}^2}{P_{ca}} \quad (26)$$

$$|Z_{\varphi}| = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} \quad (27)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{(1/|Z_{\varphi}|)^2 - (1/R_c)^2}} \quad (28)$$

3.1.8 – Materiais Ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos, tipicamente compostos de ferro e de ligas de ferro com cobalto, tungstênio, níquel, alumínio e outros metais, são os materiais magnéticos comumente utilizados e são de grande importância para a Engenharia Elétrica, por suas aplicações em núcleos de transformadores e máquinas elétricas. Estes materiais magneticamente moles se caracterizam por apresentarem suscetibilidade magnética (χ) elevada e variável, elevada permeabilidade magnética do meio material (μ) e, conseqüentemente elevada permeabilidade relativa (μ_r), características estas que expressam intrinsecamente a sua capacidade de ser mais susceptível à passagem do fluxo magnético (FITZGERALD, 2006), (LUCIANO, 2010a).

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (29)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} \quad (30)$$

Onde:

\vec{B} = indução magnética (weber / m²);

\vec{H} = intensidade de campo magnético (A / m);

μ_0 (permeabilidade do vácuo) = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Os materiais ferromagnéticos são compostos por um grande número de domínios, isto é, regiões nas quais os momentos magnéticos de todos os átomos estão em paralelo, dando origem a um momento magnético resultante naquele domínio. Em uma amostra não magnetizada do material, os momentos magnéticos estão orientados aleatoriamente e o fluxo magnético líquido resultante do material é zero, conforme visto na Figura 26 (FITZGERALD, 2006).

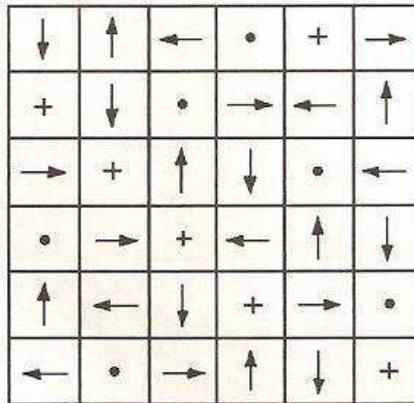


Figura 26 – Representação de um cristal ferromagnético não – magnetizado (DEL TORO, 1994).

Quando uma força magnetizante externa é aplicada a esse material não-magnetizado, os momentos dos domínios magnéticos tendem a se alinhar com o campo magnético aplicado, conforme visto na Figura 27. Como resultado, os momentos magnéticos dos domínios somam-se ao campo aplicado, produzindo um valor mais elevado de densidade de fluxo do que aquele que existiria devido apenas à força magnetizante. Assim, a permeabilidade efetiva (μ) é elevada em comparação com a permeabilidade do vácuo. À medida que a força magnetizante aumenta, esse comportamento continua até que todos os momentos magnéticos estejam alinhados com o campo aplicado. Nesse ponto, eles não podem mais contribuir para o aumento da densidade do fluxo magnético, e diz-se que o material está completamente saturado (FITZGERALD, 2006).

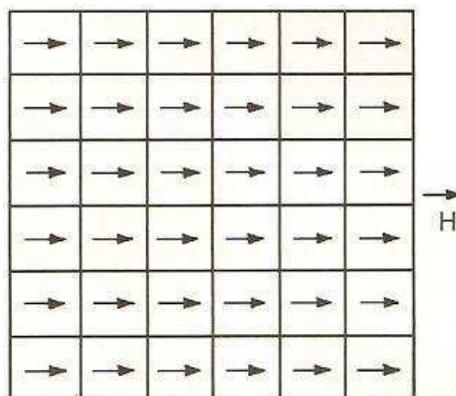


Figura 27 – Representação de um cristal ferromagnético completamente magnetizado pelo campo H (DEL TORO, 1994).

Grandes elevações de temperatura numa amostra de material ferromagnético magnetizado trazem uma redução na sua capacidade de magnetização. O aumento de temperatura reforça a agitação existente entre átomos até que, na temperatura de 750° C, a agitação é tão intensa que destrói o paralelismo existente entre os momentos magnéticos dos átomos vizinhos do domínio e, desta forma, faz com que ele perca sua propriedade magnética. A temperatura na qual isso ocorre é chamada de temperatura crítica ou temperatura de Curie (DEL TORO, 1994).

Para aplicações em núcleos de transformadores, utilizam-se materiais ferromagnéticos, pois estes apresentam: elevada permeabilidade magnética, que facilita o confinamento do fluxo magnético no núcleo, diminuindo os fluxos dispersos; resistividade elétrica elevada, o que diminui as perdas por correntes parasitas; baixa força coerciva. A maioria dos transformadores instalados nos sistemas elétricos nos dias atuais são fabricados com núcleos de ferro-silício (FeSi) de grãos orientados (GO), e em menor escala, de núcleos de ligas amorfas.

a) Ferro-silício (FeSi) de grãos orientados (GO)

O FeSi GO é utilizado em núcleos de transformadores devido apresentar direções preferenciais de magnetização, ao longo das quais as perdas no núcleo são baixas e a permeabilidade é alta. Este material apresenta estrutura cristalina, ou seja, seus átomos são dispostos em uma estrutura cristalina ordenada (conforme a Figura 28) e é dito como de grãos orientados devido à estrutura atômica dos cristais da liga FeSi ser cúbica de corpo centrado, no qual cada cubo tem um átomo em cada vértice, assim como outro em seu centro. No cubo, a aresta é o eixo mais fácil de ser magnetizado, a diagonal da face é um eixo mais difícil e a diagonal do cubo é o mais difícil de todos. Usando técnicas adequadas de fabricação, a maioria das arestas dos cubos dos cristais é alinhada na direção de laminação, tornando esta direção mais favorável à magnetização (FITZGERALD, 2006), (NUNES, 2011).

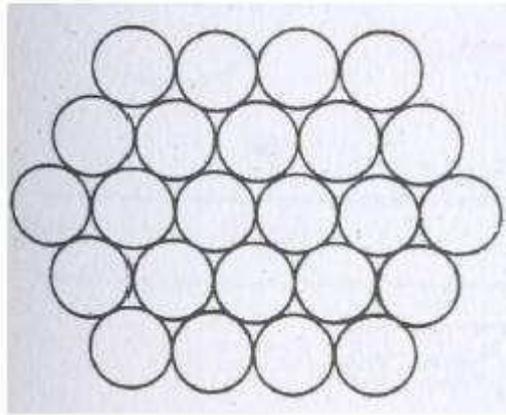


Figura 28 – Estrutura cristalina do FeSi (NUNES, 2011).

A adição de silício ao ferro diminui o envelhecimento da liga, praticamente anula a fadiga magnética do material, aumenta a resistividade elétrica e reduz as perdas magnéticas. Entretanto, acima de certos teores, o silício diminui a indução de saturação e torna a liga frágil e difícil de ser trabalhada (LUCIANO, 2010a).

Chapas de FeSi GO (vistas na Figura 29) são obtidas mediante processo de laminação a frio. O teor de silício nas chapas de GO varia na faixa de 3% a 3,5% e a resistividade se situa entre 10 a 47 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. As espessuras das chapas de FeSi GO empregadas em núcleos de transformadores de distribuição variam de 0,23 a 0,30 mm (LUCIANO; BATISTA; FREIRE; CASTRO; CAMACHO, 2009).



Figura 29 – Núcleo composto com lâminas de FeSi (NUNES, 2011).

b) Ligas amorfas

As ligas amorfas formam um grupo de materiais metálicos não - cristalinos, as quais se caracterizam por não possuírem, a longa distância, uma estrutura atômica ordenada. O princípio básico de obtenção destes materiais é o da solidificação rápida de metais, a partir de seu estado fundido. Nestes processos, as taxas de resfriamento devem ser elevadas o suficiente, na faixa de 10^4 a 10^8 K/s, de forma a inibir a cristalização. A solidificação ocorre de forma abrupta, sem que haja tempo para mudanças microestruturais. Assim, o material metálico obtido atinge o seu estado sólido, mantendo uma estrutura atômica desordenada semelhante aos líquidos e aos vidros, conforme visto na Figura 30 (LUCIANO, 2010a).

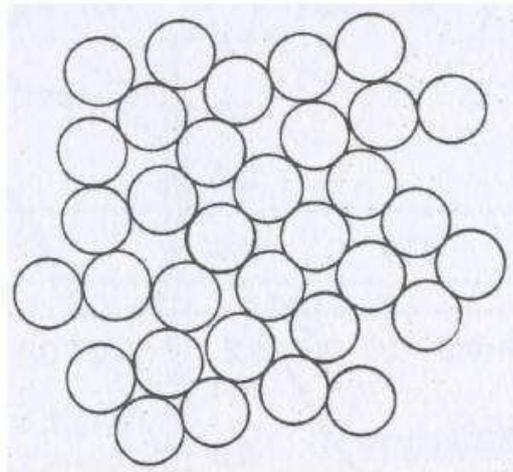


Figura 30 – Estrutura não – cristalina do metal amorfo (NUNES, 2011).

A fórmula geral definida para as ligas amorfas termicamente estáveis é a seguinte: $M_a Y_b Z_c$, em que: **M** é um ou mais metais do grupo constituído pelo ferro, níquel, cobalto, vanádio e cobre; **Y** representa elementos como o fósforo, boro e carbono; **Z** representa elementos como o alumínio, silício, antimônio, estanho, germânio, índio e berilo; e as letras **a**, **b** e **c** representam os percentuais atômicos, sendo a sua soma igual a 100 e suas faixas são de: 60 a 90, 10 a 30 e 0,1 a 15 respectivamente. Uma liga amorfa utilizada em núcleos de transformadores de baixa e de altas potências é a do sistema ternário ferro-boro-silício. Em transformadores monofásicos de baixa potência, os núcleos podem ser constituídos pela liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$, que vem apresentando ótimo desempenho (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO;

BATISTA; CAMACHO, 2009), (LUCIANO; BATISTA; FREIRE; CASTRO; CAMACHO, 2009).

A liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ possui resistividade elétrica entre 130 e 135 $\mu\Omega.cm$, cerca de três vezes maior do que a liga FeSi GO, o que diminui as perdas por correntes parasitas devido sua elevada resistividade elétrica. As fitas de liga amorfa geralmente variam entre 0,0025 e 0,035 mm de espessura (ver Figura 31), dificultando a obtenção de um núcleo compacto, a partir de uma fita longa, contínua, com espessura média de 30 μm , bastante maleável e exigente no que se refere à ferramenta de corte, dificuldades estas superadas nas linhas de montagem que dominam a tecnologia de fabricação de transformadores com núcleo de liga amorfa (LUCIANO; BATISTA; FREIRE; CASTRO; CAMACHO, 2009).



Figura 31 – Fita de liga amorfa (NUNES, 2011).

Por não apresentarem ordenação em suas estruturas atômicas a curta distância, as ligas amorfas apresentam força coerciva e área do laço de histerese mais reduzida quando comparada as ligas de FeSi GO (conforme a Figura 32), implicando em perdas por histerese mais baixas. As ligas amorfas apresentam indução de saturação (B_s) mais reduzida (1,56 T para $Fe_{78}B_{13}Si_9$, 60 Hz) quando comparada com a liga FeSi GO (1,85 T para o Fe-3,2%Si, 60 Hz) (LUCIANO; BATISTA; FREIRE; CASTRO; CAMACHO, 2009).

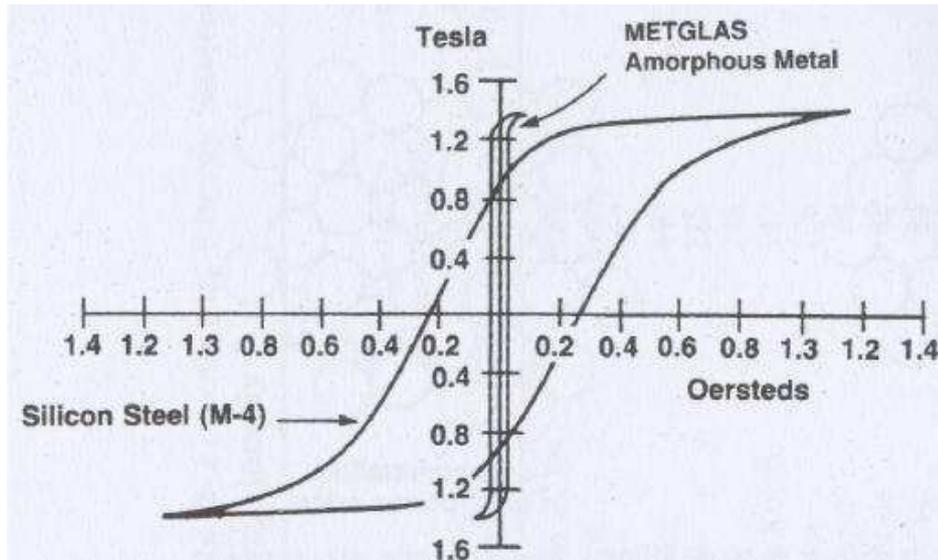


Figura 32 – Curva de magnetização do metal amorfo e do FeSi (NUNES, 2011).

3.1.9 – Perdas nos materiais ferromagnéticos

As perdas nos materiais ferromagnéticos são divididas em três componentes: perdas por histerese, perdas por correntes parasitas e, do ponto de vista da física do ferromagnetismo, as perdas anômalas, que somadas constituem as perdas totais (LUCIANO, 2010a).

a) Perdas por histerese

O processo de magnetização e desmagnetização de um material ferromagnético numa condição cíclica e simétrica envolve um armazenamento e uma liberação de energia que não é totalmente reversível. Quando o material é magnetizado durante cada meio ciclo, tem-se que a quantidade de energia armazenada no campo magnético excede a que é liberada na desmagnetização (DEL TORO, 1994).

A variação da densidade do fluxo (B) em função da intensidade do campo magnético (H) para um material ferromagnético numa condição cíclica gera o ciclo de histerese. Um ciclo de histerese isolado é visto na Figura 33. A direção das setas nessa curva indica o modo pelo qual B varia quando H varia de zero a um valor positivo máximo, passando por zero, a um valor negativo máximo e, de volta, a zero, completando um ciclo (DEL TORO, 1994).

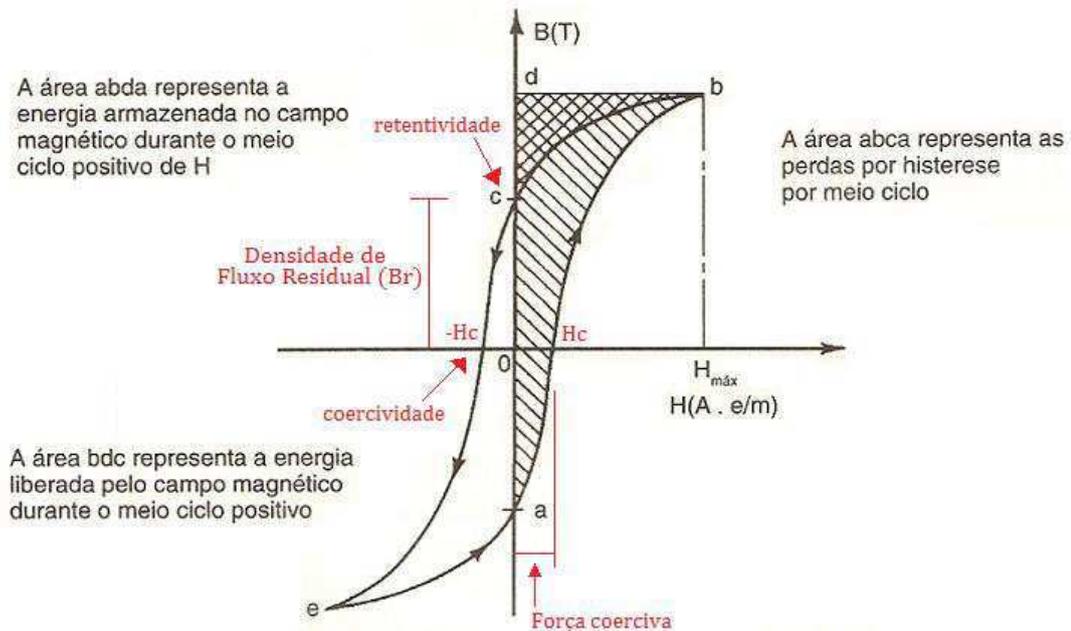


Figura 33 – Ciclo de Histerese e relações de energia por meio ciclo (DEL TORO, 1994).

A energia absorvida pelo campo quando H está aumentando no sentido positivo pode ser representada pela área $abdca$. Do mesmo modo, a energia liberada pelo campo quando H varia de $H_{máx}$ a zero pode ser representada pela área $bdcb$. A diferença entre essas duas densidades de energia representa a quantidade de energia que não é devolvida à fonte e que é dissipada como calor quando os domínios são reorganizados em resposta à intensidade do campo magnético variável. Essa dissipação de energia é denominada de perdas por histerese, como visto na Figura 33, para uma variação de meio ciclo de H . Da simetria, após a conclusão da variação de H no meio ciclo negativo, uma perda de energia igual ocorrerá e a área do ciclo completo de histerese representará a perda de energia total por metro cúbico (DEL TORO, 1994).

A perda de energia, por ciclo, é expressa matematicamente por:

$$w_h = (\text{área do ciclo de histerese}) \quad (\text{J/m}^3)/\text{ciclo} \quad (29)$$

Pode-se exprimir a perda por histerese dos materiais ferromagnéticos em watts da seguinte forma:

$$w_h = \frac{\text{energia}}{\text{volume x ciclos}} = \frac{\text{potência x segundos}}{\text{volume x ciclos}} = \frac{\text{potência}}{\text{volume x ciclos/segundos}} \quad (30)$$

Fazendo:

P_h = perdas de potência, em watts (W);

vol = volume total do material ferromagnético, em m³;

f = frequência da variação de H , em Hz.

A expressão (30) torna-se:

$$w_h = \frac{P_h}{vol \cdot f} \quad (31)$$

$$P_h = w_h \cdot vol \cdot f \quad (32)$$

Para evitar a necessidade de calcular a área do ciclo de histerese para computar as perdas por histerese, em watts, pela expressão (32), Steinmetz obteve uma fórmula empírica para w_h baseada em um grande número de medições para vários materiais ferromagnéticos (DEL TORO, 1994). Ele exprimiu as perdas de potência por histerese como:

$$P_h = vol \cdot f \cdot K_h \cdot B_m^n \quad (33)$$

na qual:

K_h = constante que depende do material;

B_m = densidade de fluxo máxima, em T;

n = dependendo do material empregado, se situa na faixa de $1,5 \leq n \leq 2,5$;

b) Perdas por correntes parasitas

Outras perdas importantes que ocorrem em materiais ferromagnéticos sujeitos a fluxos magnéticos variáveis no tempo são as perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault. Essas perdas de potências são associadas às correntes circulantes que existem em percursos fechados dentro do corpo de um material ferromagnético e causam uma perda indesejável por aquecimento quando ocorrido em núcleos de transformadores, pois estes devem transferir potência com

baixas perdas e caso grande parte da energia de entrada seja consumida no núcleo sob a forma de calor, o transformador terá um baixo rendimento (DEL TORO, 1994), (LUCIANO, 2010a).

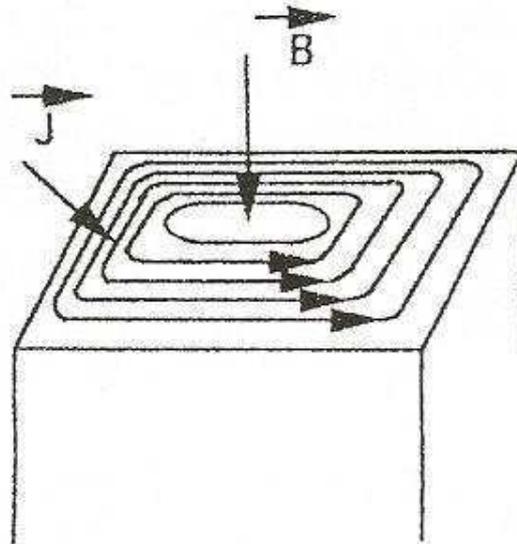


Figura 34 – Trajetória das correntes parasitas num núcleo de material condutor (LUCIANO, 2010a).

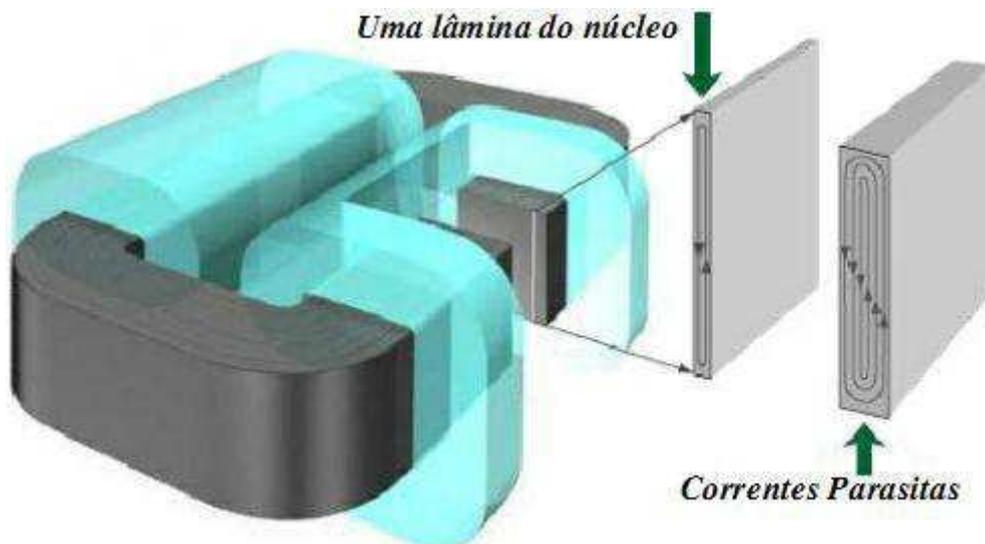


Figura 35 – Correntes parasitas nas lâminas do núcleo de um transformador.

Essas correntes circulantes são geradas pelas diferenças de potencial magnético existente por todo o corpo do material devido à ação do fluxo variável. Se o circuito magnético for composto de material ferromagnético sólido, a perda de potência resultante é significativa porque as correntes circulantes encontram relativamente pouca resistência. Na aplicação em núcleos de transformadores, para

aumentar de forma significativa à resistência encontrada por essas correntes parasitas, o circuito magnético é invariavelmente composto de lâminas finas ou fitas delgadas (como as ligas amorfas). Estas lâminas, isoladas eletricamente entre elas, impedem a formação de anéis de correntes induzidas, que se estabeleceriam no plano transversal do núcleo, conforme a Figura 36 (DEL TORO, 1994), (LUCIANO, 2010a).

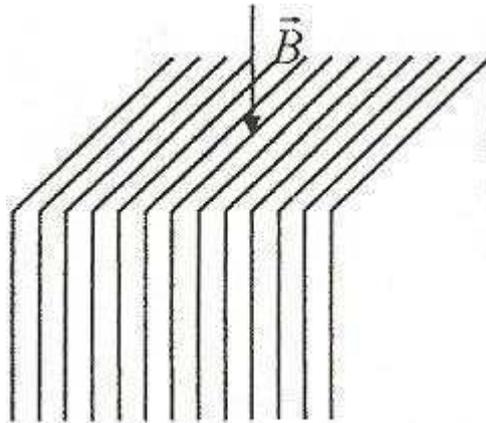


Figura 36 – Lâminas empilhadas de material ferromagnético (LUCIANO, 2010a).

Uma expressão empírica para as perdas de potência por correntes parasitas é:

$$P_e = vol. f^2 \cdot K_e \cdot B_m^2 \cdot \tau^2 \quad (34)$$

na qual:

K_e = constante que depende do material;

B_m = densidade de fluxo máxima, em T;

τ = espessura de laminação, em m;

f = frequência da variação de B , em Hz;

v = volume total do material, em m³.

Uma comparação entre as expressões (33) e (34) mostra que as perdas por correntes parasitas variam com o quadrado da frequência, ao passo que as perdas por histerese variam diretamente com a frequência.

c) Perdas anômalas

As perdas anômalas são atribuídas às correntes parasitas causadas pelos movimentos das paredes dos domínios magnéticos, também denominada paredes de Bloch, durante a magnetização. As paredes de Bloch são estruturas de spins situados na região de transição entre dois domínios diferentes. A velocidade da parede será proporcional à frequência do sinal aplicado, da indução magnética aplicada e da largura do domínio (d) no estado desmagnetizado, sob a condição que todas as respectivas paredes sejam móveis e que seu número seja constante durante o processo dinâmico de magnetização (LUCIANO, 2010a).

Com estas precondições, as perdas anômalas são proporcionais à frequência, ao quadrado da indução magnética e à largura da parede do domínio:

$$w_a \propto f \cdot B^2 \cdot d \quad (35)$$

As perdas anômalas não são mensuráveis fisicamente, sendo que para obtê-las, subtraímos das perdas totais as perdas por histerese e por correntes parasitas, conforme a representação gráfica da Figura 37.

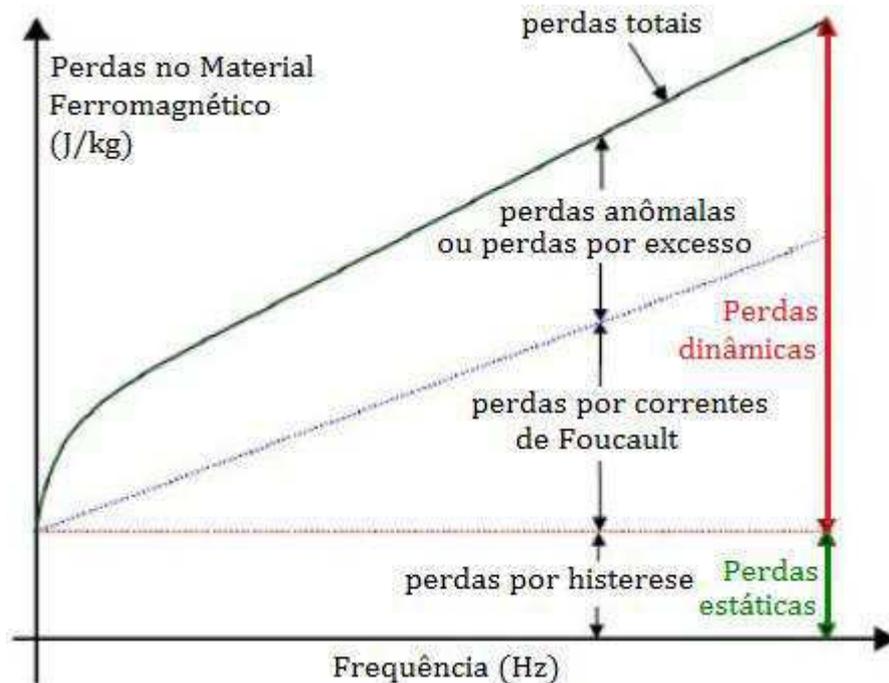


Figura 37 – Composição das três componentes de perdas em materiais ferromagnéticos (PIRES, 2008).

4 – ESTUDOS DE CASOS

Neste trabalho são apresentados dois estudos de casos nos quais são abordadas as perdas em transformadores monofásicos e trifásicos em redes de distribuição.

No primeiro é apresentada uma análise da viabilidade técnica/econômica da utilização de transformadores com núcleo de liga amorfa, à base de ferro-boro-silício, em redes rurais de distribuição de energia, classe 15 kV, em substituição aos transformadores monofásicos com núcleo de chapas convencionais de aço ao silício, com objetivo de obter a eficiência energética no uso de transformadores de distribuição monofásicos.

No segundo é analisado o desempenho comparativo de transformadores monofásicos e trifásicos com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de aço ao silício de grãos orientados (GO) na presença de cargas causadoras de harmônicos.

4.1 – Estudo de caso 1

Viabilidade técnica/econômica da utilização de transformadores com núcleo de liga amorfa, à base de ferro-boro-silício, em redes rurais de distribuição de energia, classe 15 kV, em substituição aos transformadores monofásicos com núcleo de chapas convencionais de aço ao silício, baseado no artigo publicado no I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, realizado em Brasília – DF, entre os dias 06 e 07 de novembro de 2001.

4.1.1 – Estudo de viabilidade técnica

As perdas de energia elétrica no sistema elétrico em todo o mundo são estimados em 1229 TWh/ano, ou cerca de 9,2% do total de energia elétrica produzida em todo mundo. Do total de perdas, os transformadores de distribuição de energia elétrica instalados em seis grandes economias do mundo (EUA, União Européia, Austrália, Japão, Índia e China), correspondem a cerca de 290 TWh/ano. No Brasil, as perdas dos transformadores de distribuição de energia elétrica podem ser estimadas em 4,7 TWh/ano, para um total de 2.950.000 transformadores instalados em 2007. Apenas as perdas em vazio podem ser estimadas em 3,6 TWh/ano (COUTO et al., 2010).

A redução das perdas em transformadores de distribuição é mais um campo a ser explorado em programas de conservação de energia. De acordo com dados divulgados pelo PROCEL – Programa de Conservação de Energia da ELETROBRÁS, verificou-se que de toda a energia elétrica gerada no Brasil, em 2005, 14% foi desperdiçada pelas perdas globais em transmissão e distribuição, e que 30% dessas perdas técnicas estariam concentradas nos núcleos dos transformadores (CAMPOS, 2006).

Sabe-se que quando um transformador está ligado ocorrem perdas de energia no material ferromagnético do núcleo, perdas essas que se manifestam sob a forma de calor e de ruído audível. Estas perdas estão intimamente ligadas à eficiência energética deste equipamento e buscar uma maneira de reduzi-las passa a ser uma tarefa de engenheiros eletricitas e pesquisadores da área de materiais.

Embora os transformadores de distribuição monofásicos que operam a plena carga apresentem eficiência, na maioria dos casos, superior a 99%, esses equipamentos perdem significativa quantidade de energia no processo de magnetização e desmagnetização do material do núcleo, sendo essas perdas mais preponderantes quando operam em baixa carga, resultando em baixa eficiência como os transformadores de distribuição utilizados em áreas rurais.

Quando os transformadores operam com baixa demanda, as perdas em carga são reduzidas quando comparadas às perdas em vazio. Portanto, nessas condições, os projetos de transformadores eficientes visam principalmente à redução das perdas em vazio, geralmente obtida pela modificação das dimensões do núcleo, resultando no aumento da quantidade de aço-silício empregada. Uma solução alternativa para a redução das perdas no núcleo consiste na utilização da tecnologia de núcleo de ligas amorfas, que proporcionam uma redução nas perdas em vazio nos transformadores que trabalham na maior parte do tempo com baixa carga.

As primeiras ligas amorfas foram obtidas pelo professor Pol Duwez e seus colaboradores, no Instituto de Tecnologia da Califórnia (USA), em 1959. Mas, a introdução destes materiais no mercado só veio a ocorrer em 1976, quando o primeiro transformador de distribuição com núcleo toroidal de material amorfo, projetado por Joseph Mas, foi construído no Laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA) (LUCIANO, 2010b).

Naquela oportunidade, o desempenho de um protótipo de transformador de 30 kVA, confeccionado com núcleo de material amorfo, foi comparado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao transformador com núcleo de material amorfo, particularmente no tocante às perdas em vazio e corrente de excitação: redução de 87,5% nas perdas do núcleo e redução da corrente de excitação de 2,5 A para 0,12 A (LUCIANO, 2010b).

Assim, dentro deste contexto, e diante da necessidade cada vez mais crescente de se economizar energia (conservação de energia) e preservar o meio ambiente, é que os transformadores com núcleo de material amorfo vêm

substituindo, em escala crescente, os transformadores tradicionais com núcleo de ferro-silício.

No Brasil, em particular, os primeiros estudos e ensaios experimentais com os transformadores com núcleo de liga amorfa tiveram sua origem no ambiente acadêmico na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no campus II da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), hoje Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), passando, em seguida, para a montagem em unidades industriais tais como: Construções Eletromecânicas S/A (CEMEC) (5 kVA, 10 kVA, 15 kVA e 25 kVA), Toshiba do Brasil (25 kVA) e Romagnole (10 kVA, 25 kVA e 75 kVA).

Motivado pelos resultados obtidos com os protótipos realizados no âmbito acadêmico, o professor Benedito Antonio Luciano, hoje lotado no Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da UFCG (DEE/CEEI/UFCG), apresentou à CEMEC, empresa brasileira fabricante de transformadores, a idéia de construir transformadores com núcleo de liga amorfa, em escala industrial, utilizando núcleos fornecidos pela empresa americana Allied Signal, proposta esta aceita pela CEMEC que, inicialmente, montou um lote de nove transformadores monofásicos com potência nominal de 15 kVA, 13800 V/220 V, 60 Hz, a serem instalados experimentalmente nos sistemas de distribuição de empresas concessionárias de energia elétrica do Nordeste brasileiro, a exemplo do protótipo instalado pela antiga Companhia Energética da Borborema – CELB, hoje pertencente ao grupo Energisa S/A, na zona rural do município de Massaranduba, na Paraíba (ver Figura 38). A opção pela instalação do transformador na zona rural se deu em função do baixo fator de carga nessa região, onde as perdas no núcleo são preponderantes sobre as perdas no cobre, por longos períodos.



Figura 38 – Transformador monofásico de distribuição (núcleo de liga amorfa) de 15 kVA 13800 V / 220 V instalado na zona rural de Massaranduba.

O arranjo interno dos protótipos de transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa montados pela CEMEC pode ser visto na Figura 39, transformador este de núcleo envolvente. Para a confecção dos núcleos dos protótipos, foram empregadas ligas de duas polegadas de largura, cujo aspecto é mostrado na Figura 31 (BINI et al., 1999).



Figura 39 - Arranjo interno do transformador produzido pela CEMEC (BINI et al., 1999).

Antes de ser instalado, o referido protótipo foi submetido a ensaios em vazio e de curto-circuito, realizados no Laboratório de Ensaio da CELB, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1
Ensaio comparativos entre transformadores de 15 kVA,
13800 V / 220 V, classe 15 kV.

Ensaio	Núcleo amorfo	Núcleo de FeSi GO	Valores garantidos pela NBR 5440
Circuito aberto (W)	14,7	84,0	85,0
Curto-circuito (W)	286,5	266,0	270,0
Perda Total (W)	301,2	350,0	355,0
Corrente de excitação (%)	0,28	2,90	3,0

Os resultados dos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Ensaio da CELB foram idênticos aos valores médios obtidos nos ensaios experimentais realizados no lote de nove transformadores montados pela CEMEC, ensaios esses que foram realizados de acordo com a NBR 5380 da ABNT.

Após permanecer em operação na zona rural por seis meses, o protótipo apresentado na Figura 40 foi submetido a novos ensaios, no laboratório de Alta Tensão da CELB e os seus resultados praticamente reproduziram os valores apresentados na Tabela 1, o que veio a confirmar o comportamento satisfatório do equipamento em condições de campo.



Figura 40 – Transformador monofásico de distribuição (núcleo de liga amorfa) de 15 kVA 13800 V / 220 V, classe 15 kV em ensaio no laboratório de Alta Tensão da CELB (CAVALCANTI; LUCIANO, 2001).

A partir dos resultados satisfatórios obtidos com o protótipo de 15 kVA, instalado na zona rural do município de Massaranduba, a CELB decidiu realizar um segundo estudo experimental e para tanto adquiriu junto a CEMEC vinte transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa nas potências de 5, 10, 15 e 25 kVA, para a instalação num de seus ramais de distribuição localizado na zona rural da cidade de Queimadas – PB em substituição dos transformadores convencionais com núcleo de FeSi GO, sendo o valor da tensão nominal do primário desse sistema de $(13800/\sqrt{3})$ V e secundária de 220 V. O objetivo desse estudo é realizar uma análise comparativa de desempenho, no tocante às perdas no núcleo, em relação aos transformadores monofásicos de idênticas potências nominais, fabricados com núcleo de chapas convencionais de aço ao silício.

Os resultados dos ensaios dos transformadores adquiridos pela CELB junto a CEMEC, realizados no laboratório desta, antes da entrega desses equipamentos, podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2

Resultados dos ensaios com transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa realizados na CEMEC. Tensões A.T. (kV): 7,97 a 7,28; B.T. (V): 220.

Potência (kVA)	Perdas no núcleo (W): mínimas e máximas	Perdas no cobre (W): mínimas e máximas	Corrente de excitação (%): mínimas e máximas
5	8 - 14	85 - 88	0,94 – 2,59
10	9 - 18	160 - 169	0,14 – 2,63
15	13 - 14	230 - 242	0,16 – 0,81
25	17 - 19	303 - 330	0,11 – 0,22

4.1.2 – Estudo de viabilidade econômica

Teoricamente, existem dois modos distintos de se avaliar a relação custo-benefício introduzida pela mudança dos núcleos de FeSi GO pela tecnologia com núcleo de material amorfo em transformadores. O primeiro considera a economia direta pela disponibilidade adicional do diferencial de potência em relação a um transformador convencional, durante o horário de ponta na curva de carga, somada à economia de investimento em geração de energia elétrica durante a vida útil do equipamento. O segundo modo considera a expressão convencional e

tradicionalmente utilizada nos processos de capitalização de perdas, adotada em muitos países (CAVALCANTI; LUCIANO, 2002):

$$C_T = P_a + A.P_n + B.P_c \quad (36)$$

na qual:

C_T = Custo total capitalizado;

P_a = Preço de aquisição do transformador;

A = Fator de perdas no núcleo;

P_n = Perdas no núcleo;

B = Fator de perdas no cobre;

P_c = Perdas no cobre.

Nesse caso são levados em consideração os custos da energia elétrica, inflação, taxas e outros fatores econômicos, combinando o custo inicial de aquisição do transformador com os custos de operação, ao longo de sua vida útil.

Na CELB, a fórmula adotada para a capitalização de perdas em transformadores monofásicos rurais é a seguinte:

$$C_p = 5458,07.P_{Fe} + 560,06.P_{Cu} \quad (37)$$

na qual:

C_p = Capitalização de perdas, em R\$;

P_{Fe} = Perdas em vazio, em kW;

P_{Cu} = Perdas em carga, em kW.

Tomando-se como exemplo prático o transformador monofásico de 15 kVA, e os resultados dos ensaios comparativos apresentados nas Tabelas 1 e 2, pode-se calcular a redução das perdas no núcleo decorrente da substituição do transformador convencional pelo transformador com núcleo de material amorfo:

$$\Delta Perdas = 84,0 - 14,0 = 70,0 W \quad (38)$$

Considerando o custo de US\$ 1000,00/kW para atender a demanda no horário de ponta na curva de carga, pode-se calcular o valor economizado, em dólares:

$$E_{Perdas} = 0,070kW \cdot \frac{US\$ 1000,00}{kW} = US\$ 70,00 \quad (39)$$

Por outro lado, considerando que, em média, a vida útil de um transformador é de 30 anos, e que ele opere por 18 horas fora do pico de demanda, ao longo dos 365 dias do ano, com um valor de US\$ 50,00/MWh necessários à construção de novas usinas, a economia total de energia elétrica pode ser calculada da acordo com o seguinte cálculo:

$$E_{MWh} = 30 \times 365 \times 18 \times (70 \times 10^{-6} MWh) \times 50,00 \frac{US\$}{MWh} = US\$ 689,85 \quad (40)$$

Como a aquisição dessa nova tecnologia teve um custo adicional, que no caso específico foi de aproximadamente US\$ 554,00 (transformador com núcleo amorfo \cong US\$ 815,00 e transformador convencional \cong US\$ 261,00), o retorno líquido para a concessionária, por unidade de transformador, ao longo da vida útil do equipamento, pode ser estimado em US\$ 135,85.

Outro cálculo importante, em termos de análise econômica, é o chamado tempo de retorno do investimento (T_r):

$$T_r = C_r / E_a \quad (41)$$

no qual:

C_r = Custo remanescente, em US\$;

E_a = Economia anual de energia, em US\$.

O custo remanescente é a diferença entre o valor do transformador convencional e a economia imediata relativa à redução da demanda no horário de ponta na curva de carga.

$$C_r = US\$(261,00 - 70,00) = US\$ 191,00 \quad (42)$$

A economia anual de energia pode ser calculada por:

$$E_a = 365 \times 18 \times (70 \times 10^{-6}) \times 50 = US\$ 22,99 \quad (43)$$

Portanto, o tempo de retorno do investimento T_r será de aproximadamente 8,3 anos, conforme visto na expressão (44), sendo que para este cálculo não foram considerados os custos de desconexão da unidade existente e da instalação da nova unidade:

$$T_r = \frac{US\$ 191,00}{US\$ 22,99} = 8,3 \text{ anos} \quad (44)$$

Desta forma, tomando como base os valores máximos das perdas no núcleo e das perdas no cobre, apresentados na Tabela 2, é apresentado, na Tabela 3, um quadro demonstrativo da comparação econômica entre transformadores monofásicos de distribuição de 15 kVA, Tensões A.T. (kV): 7,97 a 7,28; B.T. (V): 220, instalados pela CELB, num de seus ramais de distribuição localizado na zona rural da cidade de Queimadas-PB.

Tabela 3
Comparação econômica entre transformadores monofásicos de 15 kVA, 7967 V / 220 V, 60 Hz.

Dados Comparativos	Núcleo amorfo	Núcleo de FeSi GO
1. Perdas no núcleo (W)	14	84
2. Fator de perdas no núcleo (R\$/kW)	5.458,07	5.458,07
3. Perdas no cobre (W)	242	266
4. Fator de Perdas no Cobre (R\$/kW)	560,06	560,06
5. Preço de aquisição (R\$)	1.873,14	599,39
6. Custo das perdas no núcleo (R\$)	76,41	458,48
7. Custo das perdas no cobre (R\$)	135,53	148,97
8. Custo total (R\$)	2.085,08	1.206,84
9. Número de anos para recuperar o custo adicional do capital	8,3	-

Analisando os dados comparativos conforme visto na Tabela 3, percebe-se que o custo total do transformador com núcleo de FeSi é mais baixo. Entretanto, como o custo anual das perdas no transformador com núcleo de material amorfo é menor, e a vida útil desse equipamento é de 30 anos, o alto custo do capital inicial é compensado, favorecendo o retorno do investimento em 8,3 anos.

Atualmente, no Brasil são fabricados e comercializados transformadores de distribuição com núcleos de liga amorfa a preços equivalentes aos dos transformadores com núcleo de FeSi de grãos orientados (GO), devido as seguintes mudanças: aumento recente dos custos de energia elétrica; abastecimento pouco confiável e custo imprevisível de combustíveis fósseis; aumento dos custos das matérias-primas dos núcleos e condutores que constituem os transformadores de distribuição com núcleo de FeSi GO; aumento da indução magnética de saturação em ligas amorfas ($B_s = 1,65$ T) e a diminuição da força coerciva ($H_c \cong 1A/m$), resultando na redução no tamanho dos transformadores e do custo de sua obtenção, tornando os transformadores de distribuição que utilizam em seu núcleo ligas amorfas competitivos com relação aos de FeSi GO. Estas mudanças associadas a constante evolução nos estudos das ligas amorfas diminuem o tempo de retorno do investimento e o custo total (LUCIANO, 2010b), (STEINMETZ et al., 2010).

4.2 – Estudo de caso 2

Desempenho comparativo de transformadores monofásicos e trifásicos com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de aço ao silício de grãos orientados (GO) na presença de cargas causadoras de harmônicos, baseado nos artigos: “*Impact of amorphous metal based transformers on efficiency and quality of electric Power distribution*” (HASEGAWA; PRUES, 2001), publicado pelo IEEE; “*Advances in amorphous and nanostructured materials*” (HASEGAWA, 2004), publicado pelo “*Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*”; Eficiência energética associada aos transformadores com núcleo de liga amorfa (LUCIANO; FREIRE; INÁCIO; BATISTA; CAMACHO, 2009), publicado no Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (CBEE).

Os sistemas urbanos atuais de distribuição de energia elétrica são afetados pelo uso crescente de cargas não-lineares que introduzem componentes harmônicos, tais como: inversores de frequência, acionamentos tiristorizados, conversores eletrônicos de potência, acionadores de máquinas elétricas, microcomputadores, condicionadores de sinais, máquinas de solda, *no-breaks*, etc.

A taxa de distorção harmônica total (TDH) nos sistemas de distribuição de energia elétrica localizados nas zonas rurais é menor do que a TDH dos sistemas localizados na zona urbana devido às características de suas respectivas cargas, não-lineares em grande parte das instalações dos sistemas urbanos.

4.2.1 – Estudo comparativo de dois transformadores trifásicos de 500 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de ferro-silício GO.

Dois transformadores trifásicos de 500 kVA foram monitorados numa planta industrial, durante um final de semana, tendo fornos a arco como principais cargas elétricas. Tomando como referência a alimentação senoidal a 60 Hz e dados de catálogos, as perdas em vazio e as perdas em carga para o transformador com núcleo de liga amorfa que seriam, respectivamente, 160 W e 4484 W, foram cerca

de 200% superiores aos valores esperados. Já o aumento das perdas no transformador com núcleo de ferro-silício foi de 400% superiores. A explicação para esse aumento das perdas fundamenta-se no largo espectro de componentes harmônicos introduzidos na excitação dos transformadores pelos fornos a arcos.

4.2.2 – Estudo comparativo de dois transformadores trifásicos de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de ferro-silício GO laminado a frio.

Prosseguindo os estudos sob condições harmônicas, foram avaliados os desempenhos de dois transformadores de 250 kVA: um, com núcleo de liga amorfa, e outro com núcleo de ferro-silício GO laminado a frio. Os resultados, apresentados de forma resumida na Tabela 4, foram divulgados pela Associação de Pesquisa Elétrica e Desenvolvimento da Índia (ERDA), tomando como referência uma planta industrial dotada de vários dispositivos comandados por eletrônica de potência, como acionadores e controladores de velocidade de máquinas elétricas.

Tabela 4

Comparativo de perdas entre dois transformadores de 250 kVA, um com núcleo de liga amorfa e outro com núcleo de FeSi GO (HASEGAWA; PRUESS, 2001).

a) Sem distorção harmônica

Perdas (W)	Núcleo de liga amorfa	Núcleo de FeSi GO
Histerese	99	155
Correntes parasitas	33	311
Perdas totais no núcleo	132	466
Bobinas (carga média)	966	1084
Carregamento	55%	58%
Perdas totais	1098	1550

b) Com 26% de distorção harmônica total de corrente

Perdas (W)	Núcleo de liga amorfa	Núcleo de FeSi GO
Histerese	99	155
Correntes parasitas	74	698
Perdas totais no núcleo	173	853
Bobinas (carga média)	1553	1671
Carregamento	55%	58%
Perdas totais	1726	2524

c) Grau de distorção harmônica de corrente (relativo ao conteúdo harmônico)

Nº de Harmônico	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Conteúdo (%)	100	1	20	10	1	9	6	1	5

Analisando os valores apresentados na Tabela 4, verifica-se que tanto sob condições senoidais quanto sob condições harmônicas, o transformador com núcleo de liga amorfa apresenta menores perdas. Verifica-se também que a introdução de componentes harmônicos resulta no aumento das perdas totais e, por decorrência, um aumento da temperatura, o que reduz a vida útil do transformador.

4.2.3 – Estudo sobre os efeitos das distorções harmônicas em transformadores trifásicos de 100 kVA e 250 kVA instalados num sistema de distribuição de energia elétrica localizado na Índia.

Um exemplo de estudo sobre o efeito das distorções harmônicas em transformadores instalados num sistema de distribuição de energia elétrica localizado na Índia pode ser visto na Tabela 5, na qual as perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de FeSi GO são apresentadas, incluindo o efeito das distorções harmônicas totais. As perdas total e linear foram medidas com e sem distorção harmônica, respectivamente.

Tabela 5
Comparativo de perdas entre transformadores com núcleo de liga amorfa e transformadores com núcleo de FeSi GO (HASEGAWA, 2004).

a) Transformadores trifásicos de 100 kVA (zona rural).

Material do núcleo	Perda total (W)	Perda linear (W)	Perda adicional (W)	DHT de corrente (%)	DHT de tensão (%)
Liga amorfa	700	679	21	3,5	2,6
FeSi GO	1300	710	590	2,3	1,4

b) Transformadores trifásicos de 250 kVA (planta industrial).

Material do núcleo	Perda total (W)	Perda linear (W)	Perda adicional (W)	DHT de corrente (%)	DHT de tensão (%)
Liga amorfa	1726	1098	628	26	15
FeSi GO	2525	1550	975	26	15

Analisando os dados da Tabela 5, verifica-se que a distorção harmônica total depende do tipo de carga elétrica. Na zona rural, a taxa de distorção harmônica é menor que na planta industrial, porque na zona rural há um número menor de cargas causadoras de distorção nas formas de ondas de tensão e corrente. Nos dois casos, as perdas adicionais são ocasionadas pelo aumento das distorções harmônicas presentes nas linhas dos sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo que nos transformadores com núcleo de liga amorfa essas perdas são menores que nos transformadores com núcleo de FeSi GO.

A principal figura de mérito que diferencia os transformadores com núcleo de liga amorfa dos transformadores com núcleo de liga de FeSi GO é a redução das perdas no circuito magnético do núcleo: histerese, correntes parasitas e perdas anômalas. Em termos comparativos, sob condições senoidais, essa redução pode atingir a faixa de 65 a 80%, e sob condições harmônicas foi verificado que as perdas totais, também, são menores nos transformadores com núcleo de liga amorfa, conforme os exemplos apresentados nos estudos de casos.

5 – APLICAÇÕES DE LIGAS AMORFAS EM NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ELEVADA

Algumas aplicações requerem diferentes tipos e tamanhos de transformadores, que vão desde transformadores monofásicos a unidades trifásicas de alta tensão e elevada potência.

Em aplicações de transformadores com núcleo de liga amorfa, podem-se obter tais equipamentos com baixa potência aparente, como os transformadores monofásicos de 5 kVA utilizados no setor de distribuição de energia elétrica em zonas rurais, como em estudos recentes que desenvolveram transformadores trifásicos de distribuição de energia elétrica de 630 kVA, 10,5 kV / 0,4 kV, 50 Hz, com eficiência estimada em 98,5% (WANG et al., 2007).

Da Figura 41 pode-se ver a característica das perdas em carga e em vazio de um transformador de distribuição a seco de núcleo de liga amorfa de 630 kVA, onde observa-se que as perdas em carga são baixas em um regime típico de funcionamento, que normalmente não ultrapasse 20-25% da carga máxima. Neste intervalo, as perdas no núcleo são dominantes (STEINMETZ et al., 2010).

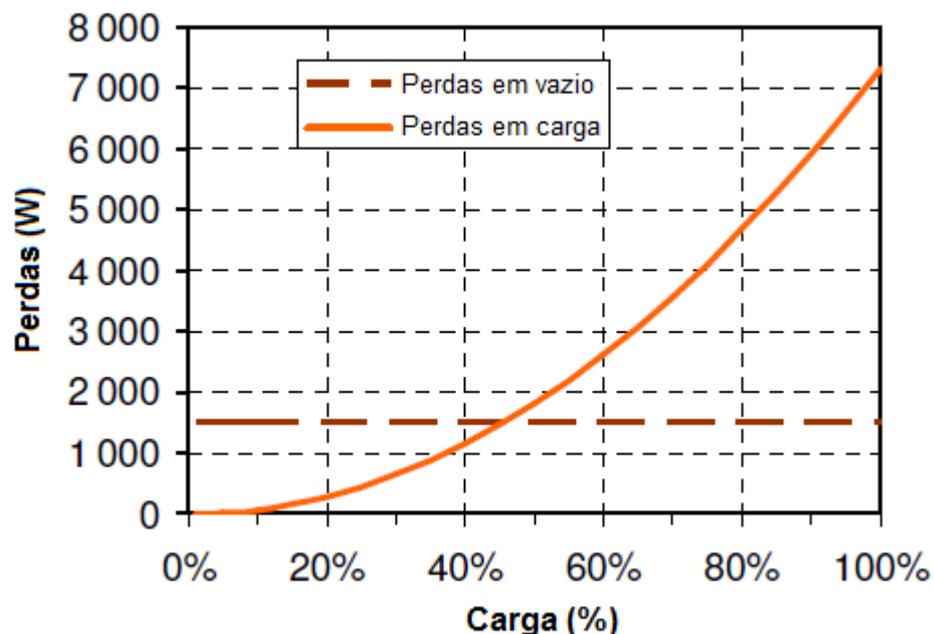


Figura 41 - Perdas versus porcentagem de carga de um transformador de distribuição a seco de núcleo de liga amorfa de 630 kVA (STEINMETZ et al., 2010).

6 - CONCLUSÕES

Neste TCC foi apresentado um estudo sobre as principais causas das perdas em transformadores de distribuição de energia elétrica, em zona rural e urbana. Adicionalmente, foram apresentadas e discutidas formas de mitigar tais perdas assim como uma análise da viabilidade técnica e econômica do emprego de ligas amorfas em substituição às tradicionais e consolidadas ligas de ferro-silício GO utilizadas nos núcleos destes transformadores, com foco na eficiência energética.

Ao fim deste estudo ficou evidenciado que:

- os transformadores monofásicos e trifásicos com núcleo de material ferromagnético de ligas amorfas apresentam uma redução de 65 a 80% nas perdas totais no núcleo, sob condições senoidais, quando comparados com as tradicionais ligas de FeSi GO, podendo substituí-las tanto em sistemas de distribuição de energia elétrica localizados em zonas rurais, que se caracterizam por operarem em baixa carga por longos períodos, quanto em aplicações em plantas industriais com cargas não-lineares (cargas causadoras de harmônicos) instaladas, operando em elevada carga por longos períodos;
- a diminuição nos custos de produção das ligas amorfas está levando à produção e comercialização de transformadores de núcleo de ligas amorfas a preços equivalentes aos dos transformadores com núcleo de FeSi GO, assegurando desta forma um retorno do investimento a curto prazo, fazendo com que as concessionárias brasileiras instalem cada vez mais esse tipo de material nos núcleos dos transformadores em seus sistemas de distribuição;
- resultados satisfatórios foram obtidos com transformadores trifásicos de distribuição de energia elétrica de potência elevada (630 kVA, 10,5 kV / 0,4 kV), chegando a 98,5% de eficiência estimada.

Com estes resultados, verifica-se que a substituição de transformadores com núcleos de materiais ferromagnéticos cristalinos tradicionais por transformadores com núcleo de ligas amorfas pode significar, simultaneamente, conservação de energia e conservação ambiental. Isto porque, além de trazer como benefício econômico a redução da necessidade de construção de novas usinas geradoras de

eletricidade, evitaria, no caso de usinas hidrelétricas, impactos ecológicos e sociais, e, no caso de usinas termelétricas, menor consumo e emissão de poluentes, devido à queima de combustíveis. Neste último caso, o benefício em termos de conservação do meio ambiente pode ser caracterizado pela a redução significativa das emissões de dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO_2), poluentes responsáveis pela chuva ácida e pelo efeito estufa.

7 – REFERÊNCIAS

1. AGUIAR, E. R. Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência. 2007. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5380 – Transformador de Potência. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5440 – Transformadores para redes aéreas de distribuição/Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
4. BINI, M. A.; MORAES, M.; CAMPOS, M. L. B.; DE SILOS, A. C.; SALOTTI, F. A.; LUCIANO, B. A. Estudo de aplicação experimental e viabilidade de utilização de transformadores de distribuição com núcleo amorfo. Anais do 1º Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica- CITENEL, ANEEL, p. 33- 37, 2001.
5. CAMPOS, M. L. B. Estudo de aplicação experimental e viabilidade de utilização de transformadores de distribuição com núcleo amorfo. 2006. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (EP/FEA/IEE/IFE) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
6. CAVALCANTI, L. F.; 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. In: Anais do I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia – CITENEL, ANEEL, p. 214-218, 2001.
7. CAVALCANTI, L. F.; LUCIANO, B. A. Estudo sobre transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa no sistema de distribuição rural da

- CELB. In: XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, p. 1-5, 2002.
8. COUTO, E. C.; FREITAS, A. G.; VILEGAS, E. A.; OLIVEIRA, P. S. Transformadores com núcleo de metal amorfo: uma solução viável para redução de perdas técnicas da distribuição. In: XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2010, São Paulo. Anais do SENDI, p. 1-10, 2010.
 9. DEL TORO, V. Fundamentos de máquinas elétricas. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil Ltda., 1994. 550 p.
 10. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. Máquinas elétricas. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.
 11. HASEGAWA, R. Advances in amorphous and nanostructured materials. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 6, Nº. 2, p. 503-510, 2004.
 12. HASEGAWA, R.; PRUESS, D. C. Impact of amorphous metal based transformers on efficiency and quality of electric power distribution. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver*, Vol. 3, p. 1820-1823, 2001.
 13. LUCIANO, B. A.; BATISTA, T. C.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B.; 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. In: VIII Semetro, 2009, João Pessoa, p. 1-5, 2009.
 14. LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; INACIO, R. C.; BATISTA, T. C.; CAMACHO, M. A. G. Eficiência energética associada aos transformadores com núcleo de liga amorfa. In: III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009, Belém. Anais do CBEE 2009, p. 1-6, 2009.
 15. LUCIANO, B. A. Fundamentos de circuitos magnéticos e transformadores. Campina Grande: DEE/CEEI/UFCG, 2010a. 158p.
 16. LUCIANO, B. A. Transformadores com núcleo de liga amorfa: eficiência energética e o meio ambiente. Conselho Nacional das Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa – CONFAP, Brasília, 10 mar. 2010b. Disponível em: <<http://www.confap.org.br/artigo.php?artigo=12>>. Acesso em: 29 maio 2012.
 17. MARTIGNONI, A. Transformadores. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991. 307 p.

18. NUNES, A. A. Uma contribuição para projetos de transformadores monofásicos de média tensão. 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
19. PIRES, W. L. Estudo do comportamento das perdas no ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência. 2008. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
20. ROXANA, F. Estudo das perdas em transformadores de distribuição localizados na zona rural. 2001. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.
21. STEINMETZ, T.; CRANGANU-CRETU, B.; SMAJIC, J. Investigations of no-load and load losses in amorphous core dry-type transformers. XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM, Rome, p. 1-6, 2010.
22. WANG, Y.; ZHAO, X.; HAN, J.; LI, H.; GUAN, Y.; BAO, Q.; XIAO, L.; LIN, L.; XU, X.; SONG, N.; ZHANG, F. Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, Nº. 2, p. 1-4, 2007.