



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Iara Cristina Martins de Sousa

**TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL
COMPOSTO POR LIGA DE FeSi E LIGA NANOCRISTALINA:
FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Campina Grande – PB
Dezembro de 2019

Iara Cristina Martins de Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso

TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL COMPOSTO POR LIGA DE FeSi E LIGA NANOCRISTALINA: FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Campina Grande – PB

Dezembro de 2019

Iara Cristina Martins de Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso

TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL COMPOSTO POR LIGA DE FeSi E LIGA NANOCRISTALINA: FUNDAMENTAÇÃO ANALÍTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: Campina Grande - PB, 09 / 12 / 19

Benedito Antonio Luciano, UFCG

Professor Orientador

Célio Anésio da Silva, UFCG

Professor Avaliador

Campina Grande – PB

Dezembro de 2019

Dedico este trabalho a Deus, que me deu forças diariamente nesta árdua jornada. E acima de tudo agradeço a meus pais e irmão por todo o apoio incondicional.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”

Nikola Tesla

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus e a Nossa Senhora por toda interseção e força ao longo de toda essa jornada de formação, sem as suas presenças em minha vida não seria possível concluir essa etapa.

A minha mãe Maria das Graças e meu pai Clovis, sou eternamente grata, pois não mediram esforços para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, abdicando de várias coisas para me permitir seguir meus sonhos. Todos os momentos de apoio diante dos obstáculos que enfrentei mostram o quanto sou abençoada por possuí-los como pais.

Ao meu irmão Cássio Levi, por todos os momentos de descontração e de apoio ao longo de todos estes anos e as minhas tias, em especial Gilvanisa, Nalva e Gerlane por também não medirem esforços para me apoiar.

Não poderia deixar de agradecer ao professor Benedito Antonio Luciano, por toda a paciência e ajuda em todas as etapas da construção deste trabalho. Certamente sem seu conhecimento, orientações e contribuições seria uma jornada bem mais árdua.

Deixo também meus agradecimentos aos meus amigos – Matheus, Maura, Laís, Jeovana, Shênia e tantos outros – adquiridos ao longo do curso e da vida. Um obrigado em especial para Melissa, Karen, Nathalia e Fernanda, vocês fizeram mais leves alguns dos momentos mais difíceis pelos quais passei, sou muito grata por tudo meninas.

Por fim, a toda minha família e todos que contribuíram de forma direta ou indireta que não foram citados, explicitamente, mas sem os quais não seria possível concluir essa etapa final.

Resumo

Os Transformadores de Corrente (TC) são classificados como Transformadores para Instrumentos (TI), fabricados especialmente para serem empregados em sistemas elétricos, com a finalidade de medição, controle ou proteção. Nos estudos analíticos sobre estes instrumentos, a base teórica está embasada nas leis fundamentais do eletromagnetismo derivadas das equações de Maxwell e nos circuitos magnéticos equivalentes obtidos a partir das forças magnetomotrizes, relutâncias e os fluxos magnéticos. Neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foram utilizadas simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos que resultou na obtenção da distribuição de indução magnética no interior do núcleo toroidal. A partir destas simulações foi possível verificar que a indução magnética se distribui de maneira não uniforme na direção radial do núcleo. Assim, neste trabalho são apresentados estudos analíticos e simulações computacionais de TC com núcleo toroidal de material magneticamente mole com FeSi e liga nanocristalina e um núcleo composto com a união dos dois materiais.

Palavras-chave: Transformador de Corrente, Núcleo Toroidal, Núcleo Misto.

Abstract

Current Transformers (CT) are Instrument Transformers (IT), specially manufactured for the use in electrical systems with the purpose of measurement, control or protection. In the analytical studies of these instruments, the theoretical foundation is based on the fundamental laws of electromagnetism derived from Maxwell's equations and on the equivalent magnetic circuits obtained from the magnetomotive forces, reluctances and magnetic fluxes. In this work are used computational simulations based on the finite element method to obtaining the magnetic induction distribution inside the toroidal core. From these simulations, it was possible to verify that the magnetic induction is distributed in an unequal way in the radial direction of the toroidal core. Thus, in this work are presented analytical studies and computational simulations of CT with toroidal core of magnetically soft material with FeSi and nanocrystalline alloy and a composite core with the union of these two materials.

Keywords: Current Transformer, Toroidal Core, Mixed Core.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação de um transformador de corrente	4
Figura 2 – Modelo de um TC com núcleo toroidal	5
Figura 3 – Circuito magnético equivalente do sensor de corrente sem entreferro	7
Figura 4 – Circuito magnético equivalente do sensor de corrente com entreferro	7
Figura 5 – Circuito elétrico de um transformador de corrente com todos os parâmetros refletidos ao primário	9
Figura 6 - Representação fasorial do TC	10
Figura 7 – Curva de magnetização de materiais ferromagnéticos em núcleos de TC para medição e proteção.....	12
Figura 8 – Paralelogramos de exatidão.....	12
Figura 9 – Perdas magnéticas em um material ferromagnético	15
Figura 10 – Curva de magnetização	16
Figura 11 – Estrutura laminada do núcleo ferromagnético	17
Figura 12 – Laminação com volume $\pi r^2 l$	20
Figura 13 – Estrutura cristalina de FeSi com Fe (vermelho, esfera maior) e Si (azul, esfera menor).....	22
Figura 14 – Curva de histerese para Ferro puro e Hypersil	22
Figura 15 – Relação entre campo coercivo e tamanho do grão	23
Figura 16 – Transformador de corrente com núcleo misto	28
Figura 17 – Laço B versus H para dois núcleos mistos, um composto pela liga de FeSi e a liga Metglas e outro composto pela liga de FeSi e a liga nanocristalina FINEMET®.....	28
Figura 18 – Distribuição da densidade de fluxo magnético para os núcleos: FeSi e Núcleo misto com liga de FeSi e liga nanocristalina.	29
Figura 19 – Núcleos mistos: Axial e Radial	30
Figura 20 – Composição e montagem do núcleo misto e curva de histerese	30
Figura 21 – Dimensões do toroide simulado no FEMM.....	33
Figura 22 – Curva de magnetização inicial da liga FINEMET® excitada a 5 Hz.....	34
Figura 23 – Distribuição da indução de magnetizações no interior de $\frac{1}{4}$: FINEMET® e Aço M-47	35
Figura 24 – Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$: 20% FINEMET® e 80% Aço M-47, 40% FINEMET® e 60% Aço M-47, 50% FINEMET® e 50% Aço M-47.	37

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Analogia de Hopkinson	6
Tabela 2 – Variáveis que compõem o circuito magnético equivalente	8
Tabela 3 – Comparação entre diferentes tipos de liga	24
Tabela 4 – Comparação entre erros de fase de diferentes tipos de liga	27
Tabela 5 – Erro de ângulo de fase para TC com núcleo misto e de FeSi	29
Tabela 6 – Etapas e subetapas da utilização do MEF	32
Tabela 7 – Valores de indução magnéticas obtidos nas simulações	38

Lista de Símbolos e Siglas

a	Espessura do núcleo magnético toroidal
A	Potencial vetor magnético
A_{ar}	Área da seção transversal na região do entreferro
A_{geo}	Área geométrica do núcleo magnético
A_{mag}	Área magnética do núcleo magnético
β	Ângulo de fase do TC
B	Intensidade de indução magnética
B_{max}	Intensidade máxima de indução magnética
B_r	Indução magnética residual
\vec{B}	Vetor indução magnética
e	Comprimento do entreferro
\vec{E}	Vetor campo elétrico
ε_c	Erro de relação
ε_0	Permissividade elétrica do ar
$\mathcal{F}1$	Força magnetomotriz
$\mathcal{F}2$	Força contramagnetomotriz
ϕ	Fluxo magnético
ϕ_1	Fluxo magnético devido à força magnetomotriz
ϕ_2	Fluxo magnético devido à força contramagnetomotriz
h	Altura do núcleo magnético toroidal
H	Intensidade de campo magnético
H_c	Força coerciva
i_1	Representação temporal da corrente elétrica no primário
i_2	Representação temporal da corrente elétrica no secundário
I_0	Corrente elétrica eficaz de magnetização
I_1	Corrente elétrica eficaz no primário
I_2	Corrente elétrica eficaz no secundário
I_p	Corrente do primário do TC

I_s	Corrente do secundário do TC
J	Densidade de corrente elétrica
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica
k	Fator de correção referente à distribuição da tensão induzida nas lâminas do núcleo magnético
K_c	Relação nominal de transformação de um TC
K_r	Relação real de transformação de um TC
k_e	Fator de empilhamento do núcleo magnético laminado
l	Comprimento médio do caminho magnético no interior do toroidal
λ	Fluxo magnético concatenado
μ	Permeabilidade magnética
μ_0	Permeabilidade magnética do ar
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
M	Magnetização
n	Número de lâminas do núcleo magnético
n_p	Número de espiras do enrolamento primário
n_s	Número de espiras do enrolamento secundário
N	Relação de espiras entre primário e secundário
∇	Operador nabla
P_{total}	Perdas totais no núcleo do TC
$P_{parasitas}$	Perdas por corrente parasita no núcleo do TC
$P_{histerese}$	Perdas por histerese no núcleo do TC
$P_{adicionais}$	Perdas adicionais no núcleo do TC
p_{media}	Perda média no núcleo do TC
ρ	Resistividade elétrica do condutor do enrolamento secundário
\mathcal{R}	Relutância do núcleo magnético
\mathcal{R}_{ar}	Relutância do ar
\mathcal{R}_{d1}	Relutância de dispersão do primário
\mathcal{R}_{d2}	Relutância de dispersão do secundário
\mathcal{R}_{eq}	Relutância equivalente do circuito magnético
R_1	Resistência de dispersão do enrolamento primário
R'_2	Resistência de dispersão do enrolamento secundário refletido ao primário

R_p	Resistência de do ramo de magnetização
t	Tempo
v	Tensão induzida ao longo da trajetória de corrente induzida em uma lâmina do núcleo magnético
Vol_{nucleo}	Volume do núcleo magnético
χ	Susceptibilidade magnética
X_m	Reatância de magnetização do núcleo
X_1	Reatância de dispersão do primário
X'_2	Reatância de dispersão do secundário refletida ao primário
Z_c	Impedância da carga acoplada ao secundário refletida ao primário do TC
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
FCR	Fator de Correção da Relação
GNO	Grãos Não Orientados
GO	Grãos Orientados
MEF	Método do Elementos Finitos
TC	Transformador de Corrente
TI	Transformador para Instrumento

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organização do Trabalho	2
2. Fundamentação Teórica.....	3
2.1. Transformadores de Corrente	3
2.2. Transformadores de Corrente	3
2.2.1. Leis de Faraday e Lei de Ampère	4
2.2.2. Características Magnéticas de um TC com Núcleo Toroidal.....	5
2.2.3. Circuito Magnético Equivalente	6
2.2.4. Características Elétricas	9
2.2.5. Erro de Relação e de Ângulo de Fase	11
2.2.6. Especificações e Classes de Exatidão de um TC.....	12
2.2.7. Características Contrutivas	14
2.3. Perdas Magnéticas.....	15
2.3.1. Perdas por Histerese	16
2.3.2. Perdas por Corrente Parasita.....	17
2.4. Materiais Magnéticos	20
2.5. Materiais Magneticamente Moles.....	21
2.5.1. Ligas de Ferro-Silício.....	21
2.5.2. Ligas Amorfas	23
2.5.3. Ligas Nanocristalinas	23
3. Revisão Bibliográfica	25
3.1. Transformadores de Corrente	25
3.1.1. Núcleos de Ferro-Silício	25
3.1.2. Núcleos de Material Amorfo	25
3.1.3. Núcleos de Ligas Nanocristalinas	26
3.2. Núcleo Toroidal de FeSi e Liga Nanocristalina	27
4. Metodologia	31
4.1. Método do Elementos Finitos	31
4.2. Modelo Utilizado para Simulação	32

5. Resultados e Discursões	34
5.1. Simulações Computacionais Baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF)	34
5.2. Simulação do Núcleo Misto	36
6. Conclusão	40
7. Referências.....	41
• Apêndice A	47
• Apêndice B	47

1. Introdução

1.1. Motivação

Os Transformadores para Instrumentos (TI) desempenham um papel importante nos sistemas elétricos e dentre estes equipamentos se destacam os Transformadores de Corrente (TC).

Os TC podem ser empregados em sistemas de controle, medição e proteção. Dependendo da aplicação os erros de relação e de fase podem ser influenciados pela forma como esses equipamentos são projetados e fabricados, assim como pelo tipo de material ferromagnético empregado no núcleo. Neste contexto, fica caracterizada a principal motivação deste trabalho.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Apresentar um trabalho monográfico de conclusão de curso sobre a influência dos materiais magneticamente moles no desempenho e nas classes de exatidão dos Transformadores de Corrente para fins de medição e proteção.

1.2.2. Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica, objetivando estabelecer o estado da arte sobre o tema do TC;
- Apresentar os resultados dos estudos analíticos sobre o princípio de funcionamento do TC;
- Estabelecer o circuito magnético equivalente (CME) para um TC com núcleo misto e, a partir do CME, derivar o circuito elétrico equivalente;
- Realizar e apresentar os resultados de simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos, conforme apresentado por David Meeker no programa FEMM [1].

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 1 a introdução com motivação e objetivos, no capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos que servem como base entender o funcionamento dos TC, no capítulo 3 tem-se à revisão bibliográfica sobre estes instrumentos, no capítulo 4 são apresentados os métodos utilizados para a realização das simulações com núcleos toroidais e no capítulo 5 são ilustrados os resultados obtidos na execução dos testes computacionais com um núcleo composto de liga de ferro-silício e liga nanocristalina.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Transformadores para Instrumento

Com a finalidade de controlar e proteger sistemas elétricos é necessário que informações como os valores de corrente e tensão sejam conhecidas. Com a impossibilidade de instrumentos que meçam diretamente essas grandezas, torna-se necessário o uso de TI para que seja possível obter valores de tensão e corrente que se adaptem aos instrumentos disponíveis. No caso da medida de tensão utiliza-se os transformadores de potencial (TP) e para corrente, tem-se os transformadores de corrente (TC).

2.2. Transformadores de Corrente

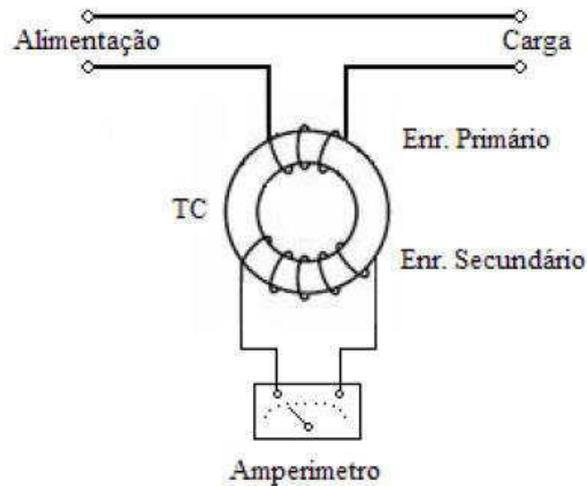
Os TC são classificados como TI, fabricados especialmente para serem empregados em sistemas elétricos, com a finalidade de medição, controle ou proteção.

Estes transformadores, em sua forma mais simples, possuem um enrolamento primário, geralmente de poucas espiras, e um enrolamento secundário, como está ilustrado na Figura 1, no qual a corrente nominal do primário é transformada, na maioria dos casos, para valores entre 1 e 5 A.

O TC é considerado um “reduzidor de corrente”, pois as correntes que circulam no seu primário são convertidas em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação de transformação.

O princípio de funcionamento dos TC, assim como dos transformadores convencionais, está fundamentado nas leis de Ampère e Faraday/Lenz e nas relações constitutivas que envolvem os materiais elétricos e magnéticos entre circuitos acoplados eletromagneticamente.

Figura 1: Representação de um transformador de corrente.



Fonte: Adaptado de [2].

2.2.1. Lei de Faraday e Lei de Ampère

Duas das leis fundamentais presentes nas equações de Maxwell são:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday/Lenz}) \quad (2)$$

Da relação apresentada em (1), pode-se obter a densidade de fluxo magnético (\vec{B}) que circula por um determinado caminho. Esta indução magnética pode ser obtida por meio da densidade da corrente elétrica ou pela variação temporal do campo elétrico (\vec{E}).

Descrita em sua forma diferencial, a equação (2), representa a lei de Faraday aplicada em um caminho fixo [3]. Esta relação diz respeito à variação da densidade do fluxo magnético que pode induzir a formação de um campo elétrico circulante (rotacional), ocasionando uma diferença de potencial e uma corrente elétrica se o meio for condutor. O sinal negativo indica que a corrente induzida produz um campo magnético em oposição à variação que a originou, conforme a lei de Lenz.

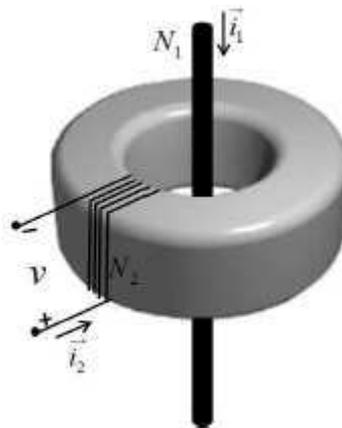
Em conjunto com lei de Gauss para o magnetismo, as leis de Ampère e Faraday/Lenz descrevem todos os fenômenos eletromagnéticos conhecidos.

2.2.2. Características Magnéticas de um TC com Núcleo Toroidal

A ilustração do modelo de um TC com núcleo toroidal pode ser visto na Figura 2. A corrente i_1 é a do primário e i_2 a corrente do secundário, ambas variando com forma de onda senoidal, no tempo. Pela Lei de Ampère, apresentada na expressão (1), a corrente elétrica i_1 origina o vetor indução magnética, B . [4]

A direção e o sentido desses vetores podem ser obtidos por meio da regra da mão direita. A corrente elétrica i_1 é representada na Lei de Ampère por meio da densidade de corrente J . À indução magnética, B , está associado um fluxo magnético, que atravessa a área da seção transversal do núcleo magnético, conhecida como área magnética, A_{mag} . [4]

Figura 2: Ilustração do modelo de um TC com núcleo toroidal.



Fonte: Adaptado de [4]

Devido a presença de um fluxo que varia no tempo, existe uma tensão induzida, v , nos terminais do secundário do transformador.

Esta tensão pode ser escrita como:

$$v = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

Sabendo que o fluxo concatenado $\lambda = N\phi$, em que ϕ é o fluxo magnético e N é o número de espiras, tem-se:

$$v = -N \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

2.2.3. Circuito Magnético Equivalente

O conceito de circuitos magnéticos pode ser estabelecido de maneira análoga ao utilizado em circuitos elétricos [4]. Com a finalidade de facilitar a determinação das equações associadas aos circuitos magnéticos, a analogia de Hopkinson consiste na substituição de elementos do circuito magnético por elementos de circuitos elétricos.

Na Tabela 1 é apresentada, de forma resumida, a analogia de Hopkinson.

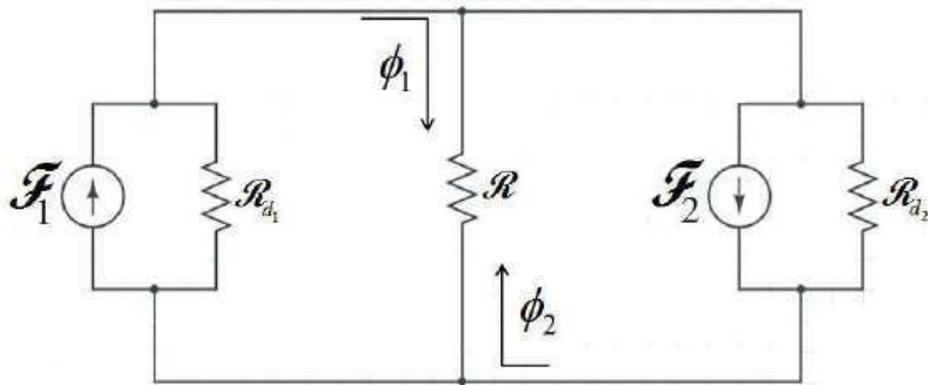
Tabela 1: Analogia de Hopkinson.

Elementos de circuitos magnéticos	Elementos de circuitos elétricos
Permeabilidade magnética (μ)	Condutividade elétrica (σ)
Intensidade de campo magnético (H)	Intensidade de campo elétrico (E)
Indução ou densidade de fluxo magnético (B)	Densidade de corrente elétrica (J)
Força magnetomotriz (\mathcal{F})	Força eletromotriz (V)
Relutância (\mathcal{R})	Resistência (R)
Fluxo magnético (λ)	Corrente elétrica (I)
$\mathcal{F} = \mathcal{R}\phi$	$V = RI$
$\Sigma \phi = 0$	$\Sigma I = 0$
$\Sigma \mathcal{F} - \Sigma (\mathcal{R}\phi) = 0$	$\Sigma V - \Sigma (RI) = 0$

Fonte: Adaptado de [4].

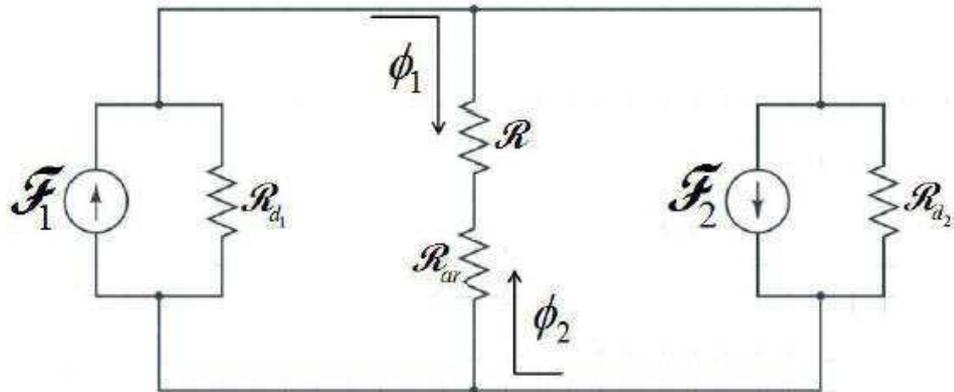
Os circuitos magnéticos análogos aos circuitos elétricos de um TC sem entreferro e com entreferro estão ilustrados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica sem entreferro.



Fonte: Adaptado de [4].

Figura 4: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica com entreferro.



Fonte: Adaptado de [4].

Na Tabela 2 estão listadas as variáveis que compõem os circuitos magnéticos equivalentes, com seus respectivos significados.

Tabela 2: Variáveis que compõem o circuito magnético equivalente.

\mathcal{F}_1	Força magnetomotriz de excitação produzida pelo primário
\mathcal{F}_2	Força contramagnetomotriz ou de reação de armadura do secundário
ϕ_1	Fluxo magnético de excitação produzido pelo primário
ϕ_2	Fluxo magnético de reação de armadura produzido pelo secundário
\mathcal{R}_{d_1}	Relutância de dispersão no enrolamento primário
\mathcal{R}_{d_2}	Relutância de dispersão no enrolamento secundário
\mathcal{R}	Relutância do núcleo magnético de material ferromagnético
\mathcal{R}_{ar}	Relutância do entreferro

Fonte: Elaboração própria.

Considerando \mathcal{R} e \mathcal{R}_{ar} muito menores que \mathcal{R}_{d_1} e \mathcal{R}_{d_2} , nota-se que quase todo o fluxo magnético passa pelo núcleo, para o caso de um TC sem entreferro e totalmente pelo conjunto núcleo/entreferro, para o caso de um TC com entreferro. Portanto, as relutâncias equivalentes dos circuitos magnéticos, com entreferro e sem entreferro, podem ser calculadas a partir das equações (5) e (6), respectivamente.

$$\mathcal{R}_{eq} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_{mag}} \quad (5)$$

$$\mathcal{R}_{eq} = \frac{l-e}{\mu_0 \mu_r A_{mag}} + \frac{e}{\mu_0 A_{ar}} \quad (6)$$

Sendo A_{ar} e A_{mag} , equações (7) e (8), as áreas de seção transversal atravessadas de forma perpendicular pelo campo magnético no entreferro e no material utilizado no núcleo; e a espessura do entreferro; l o comprimento médio do caminho magnético; μ_0 e μ_r as permeabilidades magnética do ar e do meio magnético, respectivamente.

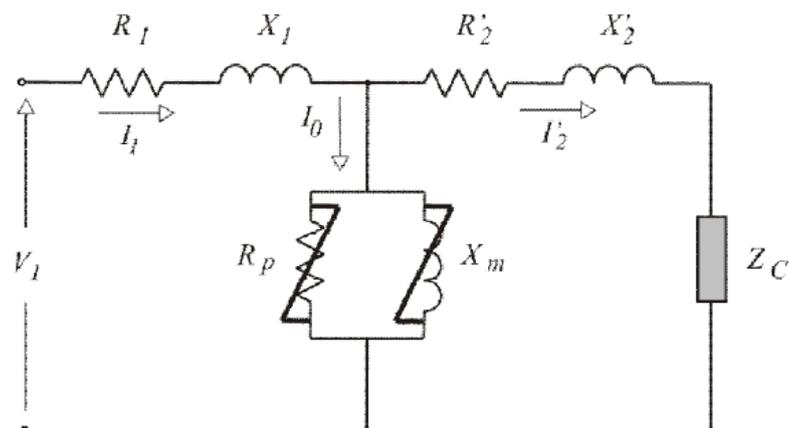
$$A_{mag} = ah \quad (7)$$

$$A_{ar} = (a + e)(h + e) \quad (8)$$

2.2.4. Características Elétricas

Na Figura 5 é representado o circuito elétrico equivalente de um TC com núcleo refletido ao primário. A corrente I_1 do primário, I_2 a corrente do secundário, R_1 e X_1 a resistência e a reatância de dispersão dos enrolamentos primários, R'_2 e X'_2 a resistência e a reatância de dispersão dos enrolamentos secundários, I_0 a corrente de excitação, R_p e X_m representam a resistência e a reatância que compõem o ramo de magnetização, responsáveis pelas perdas ôhmicas associadas ao núcleo e a magnetização do núcleo, respectivamente. Z_c representa a impedância refletida ao primário do circuito elétrico equivalente.

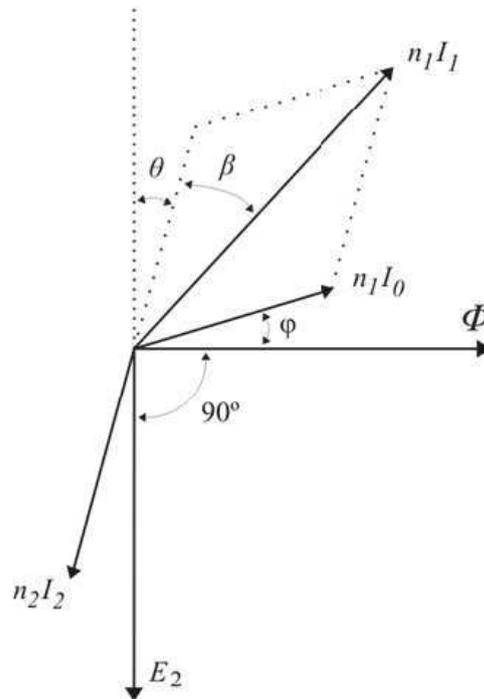
Figura 5: Circuito elétrico equivalente de um transformador de corrente com todos os parâmetros refletidos ao primário.



Fonte: Adaptado de [2].

Na Figura 6 pode ser visto o diagrama fatorial do TC.

Figura 6: Representação fasorial do TC.



Fonte: Adaptado de [2]

Como pode ser observado na Figura 6, o inverso do fasor da corrente do secundário está defasado de um ângulo β com relação à corrente do primário. Assim, quando se refletir no secundário o que se passa no primário, dois erros relacionados a medição passam a existir: os erros de relação e de fase.

O TC ideal seria aquele no qual a corrente do primário pudesse ser estimada sem erro através do conhecimento da corrente do secundário [5]. No que diz respeito à defasagem de um transformador ideal, a corrente do primário é defasada de 180° em relação à corrente do secundário.

Porém, observando-se o diagrama fasorial da Figura 6, fica evidente que isso não ocorre. Nos transformadores reais o ramo magnetizante é representativo dos materiais ferromagnéticos, e estes são responsáveis pelas perdas no núcleo decorrentes da corrente de excitação, gerando estes erros de medição.

2.2.5. Erros de Relação e Ângulo de Fase

Das relações de transformação que caracterizam um TC, a relação nominal (K_c) representa a relação entre as correntes primária e secundária para a qual o instrumento foi dimensionado e pode ser obtido a partir da equação (9), e a relação real (K_r), refere-se à relação entre as correntes primária e secundária que são obtidas realizando ensaios em laboratório.

$$K_c = \frac{I_P}{I_S} \cong \frac{n_P}{n_S} \quad (9)$$

A partir das diferenças entre as relações nominal e real do TC, passa a existir o erro de relação. Estas diferenças entre as relações ocorrem por causa da reatância de dispersão e da influência do material empregado na composição do núcleo do TC, já o erro de ângulo de fase β do TC é o ângulo pelo qual I_2 deixa de estar defasado de 180° em relação a I_1 .

O erro de relação pode ser obtido a partir da equação (10) e o erro de ângulo de fase da equação (11):

$$\varepsilon_c = \frac{K_c \cdot |\vec{I}_2| - |\vec{I}_1|}{|\vec{I}_1|} = \frac{I_0}{I_1} \cdot \text{sen}(\alpha + \delta) \quad (10)$$

$$\beta = \frac{|\vec{I}_0|}{|\vec{I}_1|} \cdot \text{cos}(\alpha + \delta) \quad (11)$$

Para que seja possível obter a relação de transformação verdadeira do TC é necessário multiplicar por um fator de correção de relação, ou FCR. Este fator deve multiplicar a relação nominal do transformador, e pode ser calculado a partir da equação (12).

$$\text{FCR} = \frac{K_r}{K_c} \quad (12)$$

Tendo em vista que os TC são utilizados tanto para medição quanto para proteção de sistemas elétricos, os erros de ângulo de fase e de relação precisam ser considerados quando se deseja determinar a classe de exatidão e também quando se trata de TC destinados à medição para fins de faturamento.

2.2.6. Especificações e Classes de Exatidão de um TC

Os TC podem ser classificados de acordo com a sua classe de exatidão. Esta classe é o limite de erro, garantido pelo fabricante do instrumento, que se pode cometer em qualquer medida efetuada pelo mesmo.

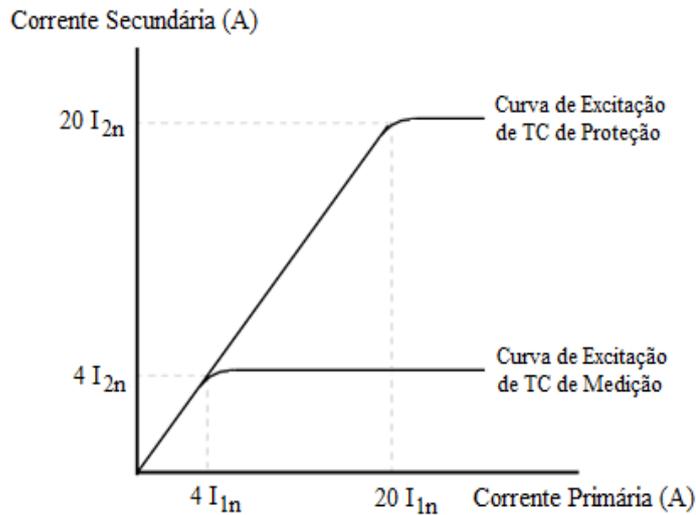
Embora todos os TC tenham o mesmo princípio de funcionamento, é necessário se considerar as características de projeto que diferenciam os TC de proteção dos de medição [2]. Os TC para medição nunca devem ser utilizados para proteção e vice-versa, pois possuem classes de exatidão e núcleos ferromagnéticos com características diferentes.

As classes de exatidão nos TC para medição têm valores menores que 0,3 podendo ser usados para medições em laboratório e em TC padrão, iguais a 0,3 para medição com finalidade de faturamento e valores 0,6 ou 1,2 para alimentação de relés, de instrumentos de controle como wattímetros e voltímetros e medição de energia sem fins de faturamento. Os erros de relação e de fase devem ser considerados em TC usados para medição.

Os TC utilizados para proteção possuem classes de exatidão 2,5 e 10, e apenas o erro de relação precisa ser considerado. De acordo com a ABNT [6] [7], considera-se que um TC de proteção está dentro de sua classe de exatidão, em condições especificadas, quando o seu erro se mantém dentro dos 10%, para valores de corrente até 20 vezes a corrente nominal.

Na figura 7, pode-se ver as curvas de magnetização de materiais ferromagnéticos empregados em núcleos de TC para proteção e para medição.

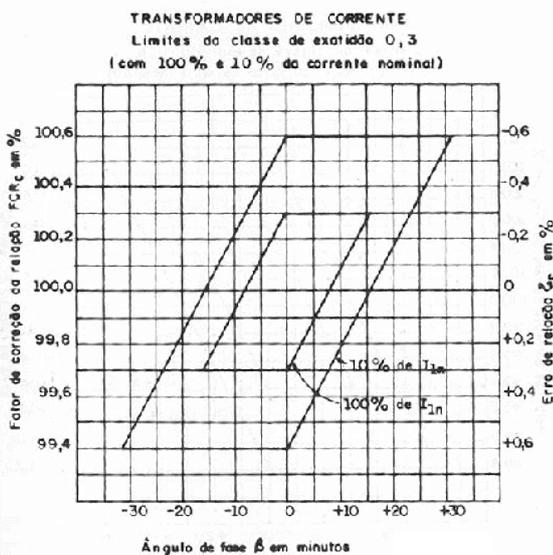
Figura 7: Curvas de magnetização de materiais ferromagnéticos empregados em núcleos de TC de proteção e de medição.



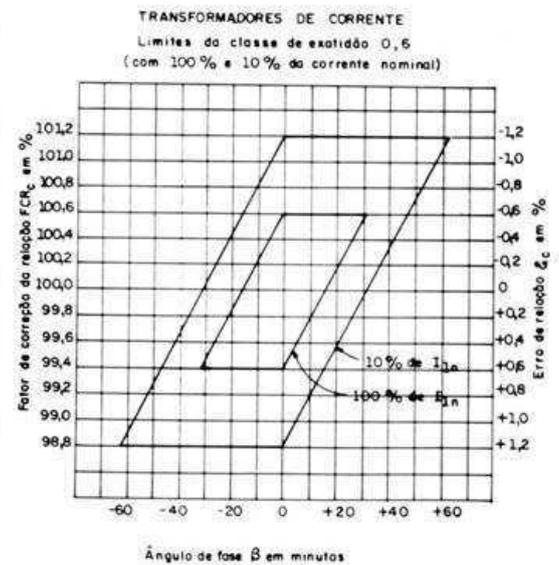
Fonte: Adaptado de [8].

Para fins de medição, um TC está dentro de sua classe de exatidão, sob condições especificadas, quando o valor calculado para o erro de relação ϵ_c ou pelo FCR e pelo ângulo de fase β estiver dentro do “paralelogramo de exatidão”. Na Figura 8, estão ilustrados os paralelogramos de exatidão referentes às classes de exatidão 0,3, 0,6 e 1,2, respectivamente.

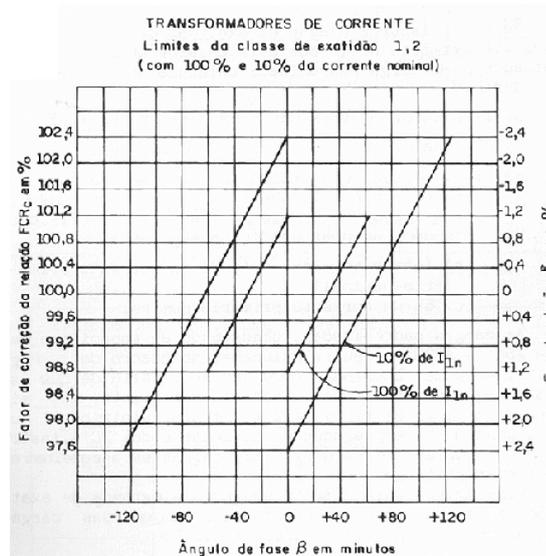
Figura 8: Paralelogramo de exatidão (a) 0,3, (b) 0,6 e (c) 1,2.



(a)



(b)



Fonte: Adaptado de [8].

2.2.7. Características Construtivas

Conforme a necessidade de uso, os TC empregados em sistemas elétricos podem ser de vários tipos: barra, enrolado, janela, bucha, núcleo dividido, com vários enrolamentos, com vários núcleos secundários ou derivação no secundário. E estes podem ser utilizados tanto em baixa, média ou alta tensão.

Os instrumentos utilizados para alta tensão possuem bucha de porcelana vitrificada com saias, estando presente nos terminais de entrada e saída da corrente primária e construídos em tanque metálico com óleo mineral. O enrolamento primário é blindado eletrostaticamente, para que seja possível uniformizar o campo elétrico.

Os TC de média tensão, desde que sejam utilizados em instalações abrigadas, geralmente são encapsulados com resina epóxi. Também são encontrados TC para uso interno, construídos em tanque metálico com óleo mineral e provido de uma bucha de porcelana vitrificada comum aos terminais de entrada e saída de corrente primária. Os TC fabricados em epóxi são normalmente descartáveis depois de um defeito interno, não sendo possível sua recuperação [2].

Semelhantes aos TC de media tensão, os instrumentos destinados à baixa tensão geralmente possuem o núcleo e os enrolamentos primário e secundário encapsulado em resina epóxi submetida a polimerização, esse processo faz com que a resina endureça permanentemente ao redor dos enrolamentos, tornado o TC um sistema compacto.

2.3. Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas associadas aos núcleos de transformadores compostos por materiais ferromagnéticos podem ser divididas em três tipos, segundo a relação (13) [9]-[11].

$$P_{total} = P_{parasitas} + P_{histerese} + P_{adicionais} \quad (13)$$

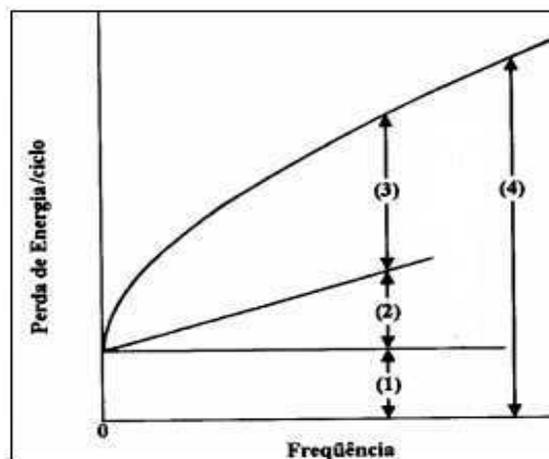
Sabe-se que as perdas magnéticas ocorram simultaneamente, e para efeito de análise elas são divididas em perdas por histerese, perdas por correntes de Foucault e perdas por dispersão das correntes parasitas no núcleo através de materiais metálicos empregados na montagem eletromecânica, como grampos e parafusos [12].

As perdas por correntes parasitas, ou correntes de Foucault, são resultado das correntes induzidas que circulam no material ferromagnético quando a densidade de fluxo magnético sofre alteração.

As perdas por histerese estão relacionadas ao laço *B versus H* para cada ciclo do fluxo magnético. E as perdas adicionais são o resultado das perdas totais menos as perdas por histerese e por correntes parasitas.

Na Figura 9 são apresentadas curvas características das perdas em função da frequência do campo magnetizante.

Figura 9: Perdas magnéticas em um material ferromagnético.



Fonte: Adaptado de [13].

Sendo:

1 – Perdas por histerese; 2 – Perdas por corrente parasita; 3 – Perdas adicionais;

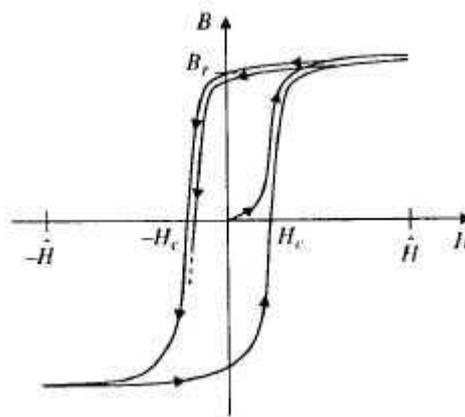
4 – Perdas totais (1+2+3).

2.3.1. Perdas por Histerese

As perdas histeréticas são atribuídas às descontinuidades elementares das paredes dos domínios magnéticos, ou seja, à própria existência dos domínios magnéticos [2]. Este problema acontece por causa da influência dos parâmetros microestruturais dos materiais magnéticos.

Conforme se pode observar na Figura 10, quando os materiais magnéticos são expostos a um campo magnético, à medida que esse campo vai aumentando, a indução também aumenta até atingir a saturação. Deste ponto, se o campo magnético for extinto, a indução vai diminuir até um valor denominado indução residual, B_r .

Figura 10: Curva de magnetização.



Fonte: Adaptado de [14]

O campo coercivo H_C é o valor do campo magnético necessário para vencer a magnetização espontânea e/ou previamente magnetizada da região em questão [2]. Segundo a equação de Herpin [15], as perdas por histerese podem ser modeladas a partir do campo magnético coercivo global (14).

$$H_C = \sqrt{\bar{H}_{ci}^2} \quad (14)$$

O laço B versus H , Figura 8, representa as perdas por histerese que são independentes da frequência e apenas estão relacionadas ao valor máximo da indução magnética.

2.3.2. Perdas por Corrente Parasita

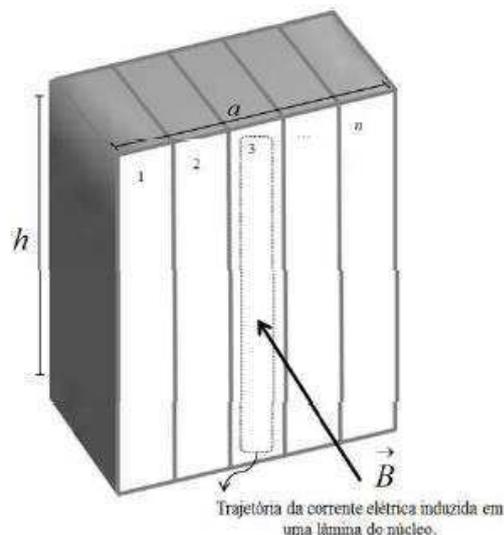
Quando, por exemplo, o núcleo ferromagnético de um transformador ou indutor constituído por chapas justapostas e isoladas eletricamente umas das outras é percorrido por um fluxo magnético variante no tempo, correntes de Foucault, ou correntes parasitas, são induzidas em cada chapa.

A intensidade destas correntes é função da frequência do campo magnetizante, o que resulta em maiores perdas quanto maior for a frequência do ciclo, pois as estruturas aquecem devido ao efeito Joule.

As perdas por correntes parasitas podem ser reduzidas mediante o processo de laminação do núcleo ferromagnético e do aumento da resistividade elétrica do material [15]. A adição de materiais com características semicondutoras, como silício e a utilização de chapas, fitas ou lâminas para construção do núcleo, contribuem para a redução dessas perdas.

Na Figura 11 pode-se ver uma estrutura laminada do núcleo magnético submetido a uma indução magnética B e composto por n lâminas.

Figura 11: Estrutura laminada do núcleo magnético.



Fonte: Adaptado de [4].

As laminações são isoladas eletricamente, impedindo a formação de anéis de corrente induzida, que circulariam no plano de seção transversal do núcleo. Por serem isolados, geralmente com verniz, verifica-se que a área magnética do núcleo, A_{mag} , não corresponde exatamente a área geométrica, dada por (15), da seção transversal do núcleo.

$$A_{geo} = ah \quad (15)$$

Assim, deve-se considerar o fator de empilhamento, k_e , dado pela equação (16), que representa a parcela real de material magnético que compõe o núcleo. Assim, A_{mag} passa a ser obtido a partir da relação (17).

$$k_e = \frac{A_{mag}}{A_{geo}} \quad (16)$$

$$A_{mag} = k_e A_{geo} \quad (17)$$

O fluxo magnético em cada laminação pode ser calculado segundo a equação (18), em que B é o módulo da indução magnética; n é o número de lâminas do núcleo; h e a são, respectivamente, altura e espessura do núcleo magnético.

$$\phi = \frac{BA_{mag}}{n} \quad (18)$$

A partir do valor do fluxo magnético obtido em (18), pode-se calcular a tensão induzida ao longo da trajetória percorrida pela corrente induzida, como representado em (19). A resistência elétrica da trajetória pode ser calculada pela equação (20) [16].

$$v = \frac{d\phi}{dt} = \frac{A_{mag}}{n} \frac{dB}{dt} \quad (19)$$

$$R = k\rho \frac{2h}{al/2n} \quad (20)$$

No cálculo da resistência elétrica, l é o comprimento do caminho magnético médio, k é uma constante introduzida para levar em conta o fato de as trajetórias no interior das laminações terem menor tensão induzida do que nas proximidades da superfície [16].

Para o cálculo das perdas ativas, em watts, de uma laminação quando B varia no tempo é usada a equação (21). As perdas ativas em um núcleo com n laminações podem ser obtidas por (22). A forma normalizada das perdas em um núcleo ferromagnético em relação ao volume do núcleo, em W/m^3 , é dada por (23).

$$p = \frac{v^2}{R} = \frac{la}{4k\rho hn} \frac{k_e^2 h^2 a^2}{n^2} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 \quad (21)$$

$$p_{nucleo} = \frac{a^2 k_e^2}{4k\rho n^2} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 (lah) \quad (22)$$

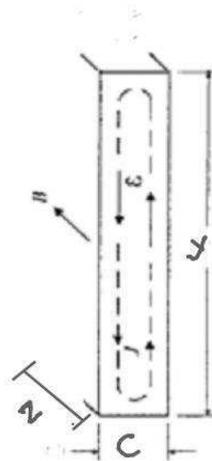
$$\frac{p_{nucleo}}{Vol_{nucleo}} = \frac{a^2 k_e^2}{4k\rho n^2} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 \quad (23)$$

As perdas por correntes parasitas em uma laminação, também podem ser calculadas a partir da lei de Faraday/Lenz (2). Sabendo que o rotacional do campo elétrico, \vec{E} , é igual à variação temporal da indução magnética e que a densidade de fluxo frequentemente varia de forma senoidal (24), a perda de energia por unidade de volume pode ser encontrada pela integração, em um período, do comprimento de uma laminação, conforme a equação (25) [17]. Assim, o valor médio das perdas, em W/m^3 , é dado por (26). Na Figura 12, pode-se observar uma laminação com volume cyz .

$$B = B_{max} \text{sen} \omega t \quad (24)$$

$$p_{medio} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{c^2 \omega^2 B_{max}^2}{12\rho} \cos \omega t \, d\omega t \quad (25)$$

$$p_{medio} = \frac{c^2 \omega^2 B_{max}^2}{12\rho} \quad (26)$$

Figura 12: Laminação com volume cyz .

Fonte: Adaptado de [18].

2.4. Materiais Magnéticos

Todos os meios possuem propriedades magnéticas. Logo, na presença de um campo magnético H [A/m] ocorrem dois efeitos chamados indução magnética B [T], e a magnetização M [19].

Como os vetores indução magnética e campo magnético são dispostos em paralelo, é possível obter o valor da magnetização a partir do campo magnético e da susceptibilidade magnética χ . A relação está representada em (27).

$$M = \chi \cdot H \quad (27)$$

Sabe-se que os efeitos de um campo magnético produzido por uma corrente mais a magnetização do material resulta na indução magnética, conforme mostrado na expressão (28). Podendo esta expressão ser tratada na forma vetorial ou de modo mais simples pela resultante média dos efeitos das grandezas como escalares [2].

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi) \cdot H \quad (28)$$

Características como a permeabilidade do meio material, na equação (29) e a permeabilidade relativa, na equação (30) e (31) são importantes para a classificação dos materiais do ponto de vista magnético.

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (29)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (30)$$

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (31)$$

2.5. Materiais Magneticamente Moles

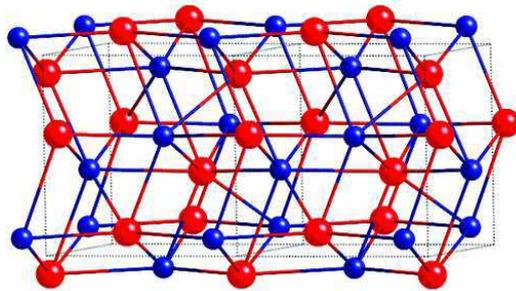
Os materiais ferromagnéticos têm papel importante na confecção dos dispositivos eletromagnéticos, pois são responsáveis pela ordenação das linhas de fluxo nos circuitos magnéticos e podem determinar a eficiência, o custo e o tamanho dos dispositivos [20].

Os materiais magneticamente moles, como as ligas de FeSi, ligas amorfas e ligas nanocristalinas, são amplamente utilizados na engenharia elétrica por possuírem características como a facilidade de magnetização e desmagnetização. A baixa intensidade do campo magnético, H , necessária para que ocorram essa magnetização e desmagnetização, ocasiona uma curva de magnetização B versus H estreita, acarretando em pequenas perdas magnéticas e uma força coerciva de valor moderado. No Apêndice A, são listados alguns fornecedores e fabricantes destes tipos de materiais.

2.5.1. Ligas de Ferro-Silício

As ligas metálicas, com exceção das ligas amorfas, possuem estruturas atômicas cristalinas. Estas estruturas possuem átomos agrupados ordenadamente e esta característica está presente nas três dimensões. Pode-se observar na Figura 13, uma estrutura cubica de corpo centrado (CCC) de uma liga de FeSi, na qual os átomos são posicionados no centro e em cada vértice do cubo.

Figura 13: Estrutura cristalina de FeSi com Fe (vermelho, esfera maior) e Si (azul, esfera menor).



Fonte: Adaptado de [21]

Nas estruturas cristalinas podem existir ou não uma direção de passagem preferencial, quando este fenômeno ocorre, o material é denominado anisotrópico, como, por exemplo, aqueles formados por grãos orientados (GO).

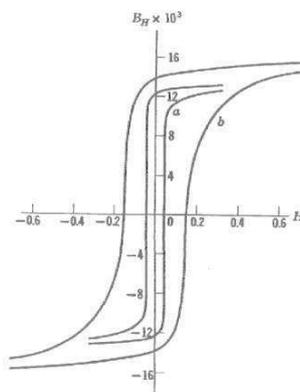
Caso o material não possua uma direção preferencial ele é denominado isotrópico, como ocorre nos materiais magnéticos de grãos não orientados (GNO).

A junção do Fe e do Si para a formação da liga FeSi e as características a elas associadas tem por objetivo obter certas propriedades magnéticas, dentre elas tem-se o aumento da resistividade, redução das perdas por histerese e do envelhecimento do material.

Atualmente, uma das ligas mais utilizadas de forma comercial possui 3% de Si, conhecida pelo nome de Hypersil.

Na Figura 14 são apresentadas as curvas de histerese obtidas para Fe puro e para um $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ de grão orientado [22].

Figura 14: Curvas de histerese para Fe puro (a) e $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ - Hypersil (b).



Fonte: Adaptado de [22].

2.5.2. Ligas Amorphas

Diferentemente dos materiais cristalinos, nas ligas amorfas os átomos estão distribuídos por arranjos aleatórios e sem simetria [23].

As estruturas amorfas possuem propriedades de estruturas vítreas, podendo ser compostos por elementos metálicos, que possuem ligações metálicas com alta resistividade elétrica e fácil magnetização. Adicionalmente, esses materiais apresentam maior resistência à oxidação e são bastante dúcteis [24].

Por estas propriedades as ligas amorfas foram amplamente utilizadas em núcleos de transformadores nos Estados Unidos e no Japão [25], onde esta tendência foi iniciada e posteriormente difundida para o resto do mundo.

A resistividade elétrica dos materiais amorfos está relacionada com a desordem de seus átomos, por isso, as estruturas vítreas se comparadas as estruturas cristalinas, tem elevada resistividade elétrica, variando entre 80 e 420 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, e pouco dependem da temperatura.

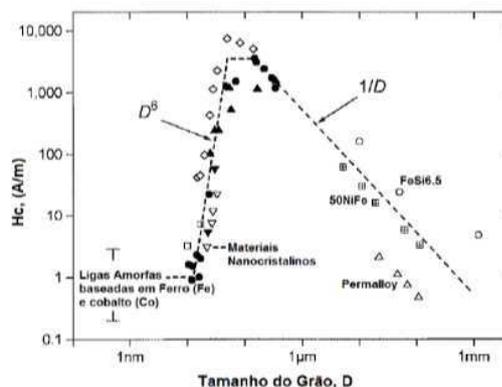
2.5.3. Ligas Nanocristalinas

O desenvolvimento de pesquisas acerca das ligas nanocristalinas aconteceu por causa de suas características magnéticas, dentre elas: alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coerciva e baixas perdas por histerese.

As ligas nanocristalinas podem ser obtidas quando o tamanho do grão é reduzido a uma escala nanométrica. Esta redução é o ponto chave para as características dos materiais magneticamente moles na citada liga [26].

Na Figura 15 é apresentada a relação entre o campo coercivo e o tamanho do grão, para diferentes tipos de materiais.

Figura 15: Relação entre o campo coercivo e o tamanho do grão.



Fonte: Adaptado de [27].

Comercialmente, uma das ligas nanocristalinas mais conhecidas são as ligas FINEMET® e ligas do sistema Fe-Cu-Nb-Si-B. Nas ligas nanocristalinas os grãos são compostos de solução sólida e seu diâmetro é de cerca de 10 nm [28].

A comparação entre ligas nanocristalinas, ligas de FeSi e a liga amorfa $F_{78}Si_9B_{13}$ é ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre diferentes tipos de liga.

Composição	B (T)	H_c (A/m)	μ_e (1 kHz)	ρ ($\mu\Omega$ m)
$Fe_{85}Si_2B_8P_4Cu_1$ (Nanocristalina)	1,82	5,8	27000	0,736
$Fe_{93,5}Si_{1,1}B_{1,7}P_{2,4}Cu_{1,3}$ (Nanocristalina)	1,85	2,8	24000	0,670
$Fe_{86}Si_1B_8P_4Cu_1$ (Nanocristalina)	1,23	0,5	150000	1,15
$Fe_{94,1}Si_{0,6}B_{1,7}P_{2,4}Cu_{1,2}$ (Nanocristalina)	1,51	26	720	0,572
$Fe_{73,5}Si_{13,5}B_9Nb_3Cu_1$ (Nanocristalina)	1,92	7,8	6100	0,478
Fe3% Si de grãos não orientados	1,49	2,6	10600	1,35
Fe3% Si de grãos orientados				
$Fe_{78}Si_9B_{13}$ (Amorfa)				

Fonte: Adaptado de [29].

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, algumas das composições químicas das ligas nanocristalinas tem densidade de saturação aproximada da liga de FeSi com grãos orientados, entretanto, essas ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética relativa maior e menor força coerciva [2].

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Transformadores de Corrente

3.1.1. Núcleos de Ferro-Silício

Os primeiros estudos realizados sobre as propriedades eletromagnéticas das ligas de FeSi (Ferro-Silício) foram feitos no início do século XX, por Hadfield *et al.* A partir destes estudos foram desenvolvidas estruturas de aço de grão não orientado (GNO), estas estruturas cristalinas permitiam a passagem desordenada do fluxo magnético (anisotropia) [30].

Foi no decênio de 1934, que Norman Goss apresentou o método de produção de chapas de aço silício de grãos orientados (GO), possibilitando que o fluxo magnético tivesse uma direção preferencial de passagem nas estruturas cristalinas. Estas novas chapas apresentavam perdas magnéticas inferiores às dos aços silício GNO. A partir disso as ligas de FeSi passaram a ser utilizadas para construção de núcleos de TC [30]-[32].

Segundo Guerra, em sua maioria, os núcleos de TC apresentam forma toroidal, sendo constituídos por uma tira inteiriça de liga FeSi de grãos orientados, enrolada de modo helicoidal [33].

3.1.2. Núcleos de Material Amorfo

O desenvolvimento das ligas amorfas com finalidade de aplicação em núcleos de transformadores teve início em 1975, mas a introdução no mercado destes materiais só aconteceu efetivamente em 1976 [34].

Atualmente, os metais amorfos são bastante utilizados em diversas ligas à base de Fe, Ni e Co. Os processos mais comumente utilizados na obtenção dessas ligas são “Melt spinning” e “Planar flow casting”. Esses processos são baseados no princípio de solidificação rápida, no qual o metal fundido ou liga é ejetado sobre uma roda girante de cobre de alta condutividade térmica, possibilitando a produção de fitas [35]-[37].

Esses metais amorfo apresentam propriedades importantes, podendo ser aplicadas em núcleos de transformadores de corrente, o que levou a solicitação de patentes, como é o caso de [38], em 2004, com um transformador de corrente amorfo com núcleo ferromagnético.

3.1.3. Núcleos de Ligas Nanocristalinas

Em 1988, pesquisadores da empresa japonesa Hitachi Metals [39] propuseram uma nova classe de materiais ferromagnéticos denominadas ligas nanocristalinas.

Para obter-se as estruturas nanocristalinas, Yoshizawa e seus colaboradores utilizaram, inicialmente, fitas de ligas amorfas de composição Fe-Si-B-M (M = Cu, Nb, Mo, W, Ta), obtidas pelo método de solidificação rápida [40]. Comercialmente, a liga recebeu o nome de FINEMET®.

Inoue *et al.* também obtiveram uma estrutura nanocristalina, a liga $F_{88}Zr_7B_4Cu_1$, que recebeu o nome de NANOPERM®. Essa liga apresenta características magneticamente moles semelhantes e bastante interessantes como: baixas forças coercivas (0,6 a 2,5 A/m), elevados valores de permeabilidade magnética relativa (até 200.000) e valores de indução de saturação magnética inferiores a 1,2 e 1,35 T [40].

Em 1996, foram realizados por [41], os primeiros experimentos com TC de núcleo nanocristalino. Em seus estudos, os pesquisadores compararam três materiais: liga nanocristalina, liga amorfa e a liga Permalloy.

Com os resultados obtidos, eles concluíram que o TC constituído de uma liga nanocristalina (Vitroperm 500F) apresentou uma menor dependência do erro de ângulo de fase, β , com a variação da intensidade de corrente no primário, quando comparada com a liga amorfa (VITROKOV 8116) e a liga Permalloy (Py76Cu).

A partir de 2002, no Brasil, foram relatados por [42] estudos analíticos sobre TC com núcleo de liga nanocristalina. Em 2005, eles apresentaram estudos analíticos e computacionais, sobre a viabilidade das ligas nanocristalinas em núcleos de TC [43]. Em 2006, apresentaram os resultados experimentais obtidos a partir de dois protótipos de TC: um com núcleo da liga nanocristalina FINEMET® FT-3M F6045G e outro com uma liga aço ao silício GO E-004, as dimensões do núcleo toroidal de liga nanocristalina estão dispostas no Apêndice B. Nos TC com núcleo

nanocristalino os erros de fase foram menores, conforme pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Comparação entre os erros de fase de diferentes tipos de liga.

Carga: 2,5 VA			Carga: 5,0 VA		
Ângulo de fase (minutos)			Ângulo de fase (minutos)		
% I_2	FeSi	Nanocristalino	% I_2	FeSi	Nanocristalino
10	8,5	2,2	10	10,5	2,8
25	6,6	1,9	25	7,8	2,2
50	5,3	1,5	50	6,0	1,6
75	4,6	1,4	75	5,0	1,2
100	4,0	1,3	100	4,2	1,3
120	3,7	1,3	120	3,7	0,9

Fonte: Adaptado de [44].

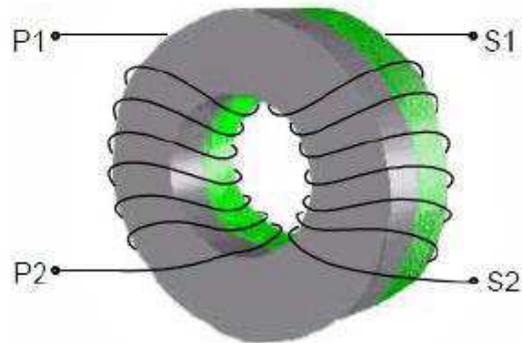
Em 2009, [45] iniciou um processo de patente para núcleos magnéticos para transformadores de corrente. Foram apresentadas várias composições de materiais, dentre eles as ligas nanocristalinas, que podem ser utilizados como núcleo de transformadores de corrente.

3.2. Núcleo Toroidal Misto de FeSi e Liga Nanocristalina

Em 2007, foram apresentados por [46] estudos e alguns resultados sobre o uso de núcleos mistos com liga nanocristalina em transformadores de corrente, conforme ilustrado na Figura 16.

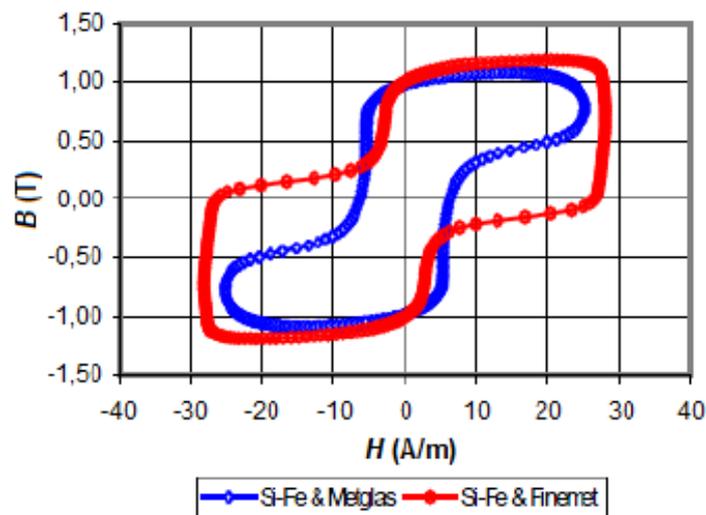
Nos resultados, pode-se ver as caracterizações magnéticas de dois núcleos mistos, um composto pelas ligas FeSi e Metglas e outro composto pela liga de FeSi e a liga nanocristalina, Figura 17. Foi comprovado que os de erros de ângulo de fase ficaram dentro dos limites estabelecidos para a classe de exatidão de 0,1.

Figura 16: Transformador de corrente de núcleo misto.



Fonte: Adaptado de [46].

Figura 17: Laço B versus H para dois núcleos mistos, um composto pela liga de FeSi e a liga Metglas e outro composto pela liga de FeSi e a liga nanocristalina FINEMET®.



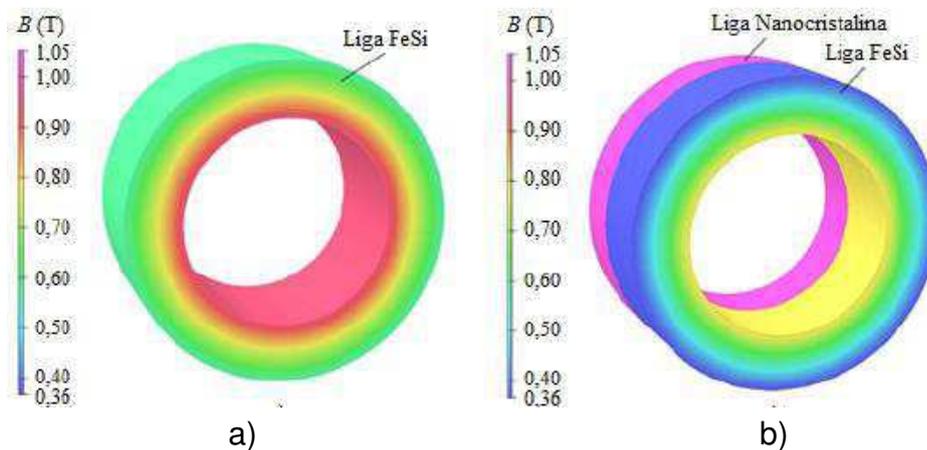
Fonte: Adaptado de [46].

Em 2010, foram apresentados por [47] novas pesquisas sobre núcleos mistos de FeSi e liga nanocristalina. Elas apresentaram uma simulação computacional mostrando a dispersão do fluxo magnético no interior do toroide, conforme mostrado na Figura 18.

Na Figura 18a com núcleo de FeSi, é perceptível que o fluxo é mais intenso próximo do raio interno. Já na Figura 18b, com núcleo misto, percebe-se uma menor densidade de saturação se comparada com o núcleo de aço silício, para uma

corrente no primário de 200 A o núcleo de liga nanocristalina se encontra saturado, diferentemente do núcleo de aço ao silício.

Figura 18: Distribuição da densidade de fluxo magnético para os núcleos: a) FeSi b) Núcleo misto com liga de FeSi e liga nanocristalina.



Fonte: Adaptado de [47].

Os erros de ângulo de fase para o núcleo de FeSi e para o núcleo misto podem ser vistos na Tabela 5. Para uma corrente até 20% da corrente nominal, o núcleo misto apresenta menores erros de fase, quando comparado com o núcleo de FeSi.

Tabela 5: Erro de ângulo de fase para TC com núcleo misto e núcleo de FeSi.

Material do Núcleo	Erro de Ângulo de fase (minutos)		
	1% I_n	5% I_n	20% I_n
FeSi	89	19	10
Núcleo Misto	28	12	2

Fonte: Adaptado de [47].

No ano de 2013, foram publicados por [48] outros resultados obtidos nas simulações feitas com o núcleo misto, foram analisadas a influência da disposição dos núcleos, axial ou radial. Os resultados obtidos foram aproximados para os dois tipos de disposição. Na figura 19, pode-se observar os modelos usados nos ensaios.

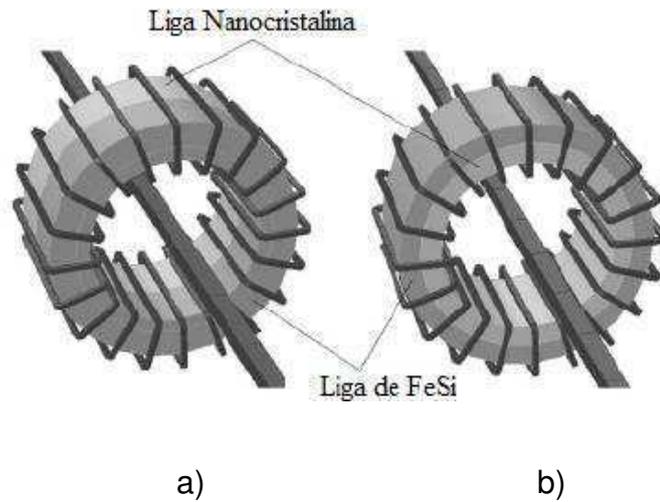


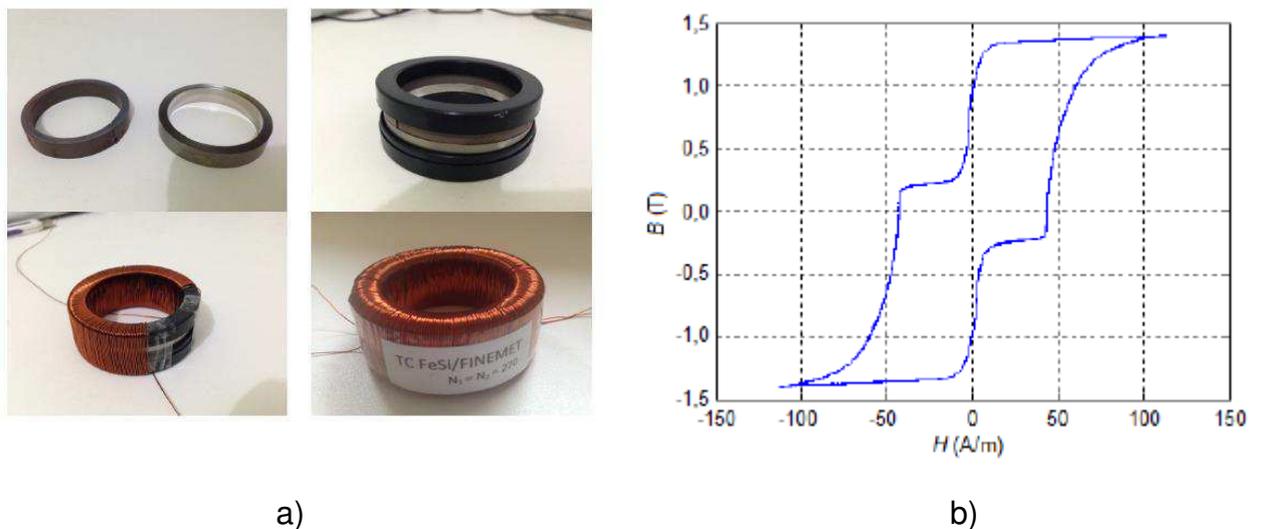
Figura 19: Núcleos mistos: a) Axial b) Radial.

Fonte: Adaptado de [48].

Em 2014, [2] apresentou sua tese intitulada: Transformadores de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina Utilizados para Serviços de Medição e Proteção em Sistemas Elétricos. Nela, foram apresentadas análises sobre a influência de componentes harmônicas e da carga conectada ao secundário no erro de fase de TC com núcleo de liga nanocristalina e núcleos mistos de FeSi e da liga FINEMET®.

A composição, montagem e curva de histerese do núcleo misto podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20: a) Composição e montagem do núcleo misto b) Curva de histerese.



Fonte: Adaptado de [2].

4. Metodologia

Com a finalidade de embasar teoricamente o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso (TCC), foram realizados estudos teóricos e analíticos sobre o tema escolhido.

Para tanto, foram estudadas as características construtivas, especificações, classes de exatidão e modelo baseado no circuito magnético equivalente de um TC, sendo este último para os casos com e sem entreferro. As perdas associadas às características construtivas também foram analisadas, incluindo expressões para perdas ativas.

As características de diferentes materiais magneticamente moles também foram estudadas, para que assim se pudesse escolher o que melhor se adéqua a composição do núcleo de um TC.

Na sequência do desenvolvimento do trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre TC, mais precisamente os tipos de materiais magneticamente moles empregados nos núcleos toroidais e núcleos toroidais compostos de FeSi e liga nanocristalina, mostrando quais as principais características dessa junção para compor o núcleo de um TC.

Ainda foram realizadas simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos (MEF) com a finalidade de obter da distribuição da indução magnética no interior do núcleo do TC.

4.1. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um método que possibilita resolver problemas que envolvem equações diferenciais complexas. Para tal, particiona-se a geometria em numerosas e pequenas regiões (triângulos), nas quais a solução é aproximada por funções simples de resolver. Em cada triângulo, a solução é aproximada pela interpolação linear dos valores em cada vértice do triângulo. Quanto maior o número de partições, mais exata é a solução [4].

Para obter-se o valor de indução magnética o cálculo é feito utilizando-se a equação (32), com o produto vetorial do rotacional e do vetor potencial magnético.

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (32)$$

Na atualidade existem várias ferramentas computacionais baseadas no MEF e no método das diferenças finitas, que podem obter as representações das induções magnéticas no interior do núcleo de um TC. A ferramenta escolhida para as simulações deste trabalho foi o módulo magnetostático para a análise de problemas bidimensionais FEMM [1].

As etapas para a realização dessas simulações estão dispostas na Tabela 6. São apresentadas as etapas de pré-processamento, processamento e de pós processamento associadas ao método dos elementos finitos.

Tabela 6: Etapas e Subetapas da utilização do MEF.

Etapas	Subetapas
Pré-Processamento	Formulação geométrica do problema; Formulação analítica do problema, partindo das equações de Maxwell; Definição do domínio do estudo, condições de contorno e tipo de simetria; Geração automática da malha dos elementos finitos feita pelo programa.
Processamento	Resolução de problemas.
Pós Processamento	Análise da distribuição das linhas de indução magnética no domínio do estudo.

Fonte: Elaboração própria.

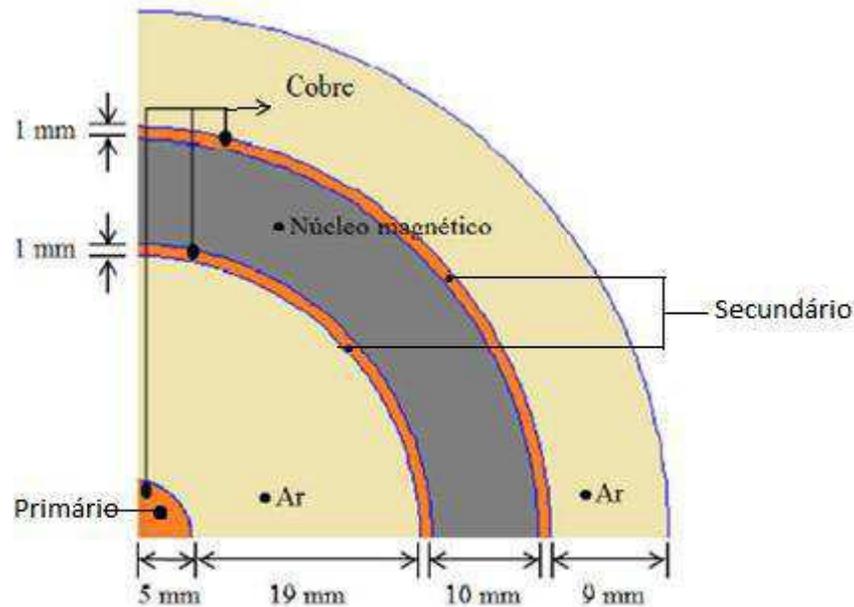
4.2. Modelo Utilizado para Simulação

Sabendo-se que o núcleo toroidal admite aximetria geométrica, a determinação bidimensional da indução pode ser efetuada usando componentes

cilíndricas e a simulação computacional pode ser feita tomando como domínio de estudo $\frac{1}{4}$ da região circular [4].

Baseado nas dimensões e no modelo propostos por [4], pode-se ver na Figura 21 as informações sobre as dimensões do elemento simulado.

Figura 21: Dimensões do toroide simulado no FEMM.



Fonte: Adaptado de [4].

Algumas alterações precisaram ser feitas neste modelo para poder simular um núcleo toroidal misto. Segundo [47], os valores de fluxo magnético se assemelham bastante para as disposições radiais e axiais no toroide. Assim, a disposição das ligas no núcleo foi feita de forma radial, por causa das limitações do FEMM [1], que só simula situações bidimensionais. Para que fosse possível simular com a disposição axial seria necessário a utilização de um *software* como o COMSOL, que permite situações tridimensionais.

Para realização das simulações, as condições de fronteira precisaram ser determinadas. Dentre as condições de fronteira de Neumann e de Dirichlet, a utilizada foi a de Dirichlet, na qual o potencial vetor magnético, \mathbf{A} , é nulo ao longo de toda a fronteira delimitada. Esta fronteira serve para impedir o fluxo de dispersão que se propaga pelo ar quando existe indução magnética.

5. Resultados e Discursões

5.1. Simulações Computacionais Baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF)

Para realização das simulações foi preciso adicionar alguns elementos ao *software*, como as propriedades do Cobre e da liga nanocristalina FINEMET®.

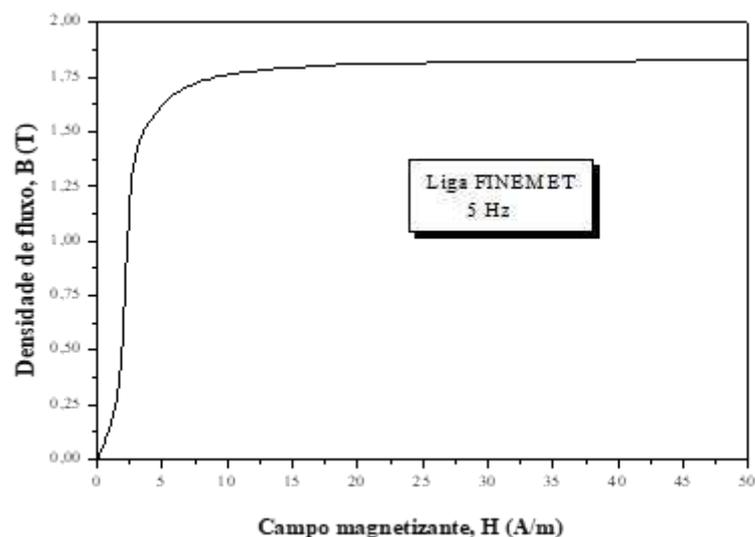
Nos enrolamentos do TC utilizou-se Cobre, com condutividade de 58 MS/m. Considerou-se, também, a corrente do primário igual a 400 A, 80 espiras no enrolamento do secundário e a corrente elétrica do secundário igual a 5 A para o TC em curto circuito no secundário. As densidades de corrente do primário e do secundário foram adotadas como sendo, respectivamente, 1 A/mm², 3,5 A/mm² [4].

Na determinação do problema, considerou-se que a corrente elétrica é negativa e flui na direção perpendicular ao plano de estudo. Assim, a densidade de corrente elétrica J da bobina do enrolamento secundário foi considerada positiva no lado interno do núcleo (corrente saindo) e negativa (corrente entrando) na região externa do toroide [4].

Nas simulações realizadas utilizou-se no núcleo toroidal os materiais ferromagnéticos FINEMET® ($F_{73,5}Si_{13}B_9Cu_1$) e o Aço M-47 (já disponível na biblioteca do *software*).

A curva de magnetização inicial da liga FINEMET®, em regime quase estático, obtida experimentalmente, é apresentada na Figura 22.

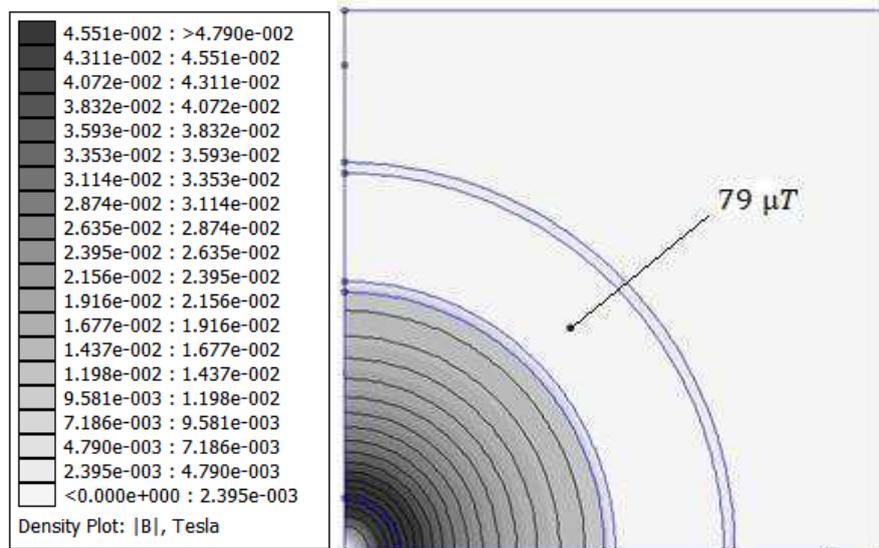
Figura 22: Curva de magnetização inicial da liga FINEMET excitada a 5 Hz.



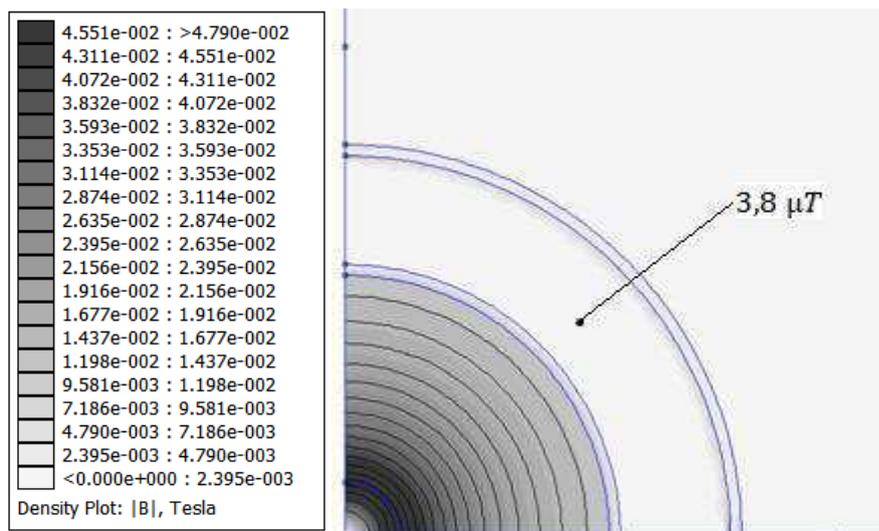
Fonte: Adaptado de [4].

Após os ajustes necessários para as simulações, adotando para a liga FINEMET® a permeabilidade relativa $\mu_r = 150000$ e a condutividade de 62,5 MS/m, foi possível obter a distribuição de indução magnética, no interior do núcleo com os dois tipos de material ferromagnético. Os resultados estão ilustrados na Figura 23.

Figura 23: Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$ (a) Aço M-47 (b) FINEMET®.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 23 é possível observar que o módulo da indução magnética aumenta radialmente. Isto ocorre em decorrência das propriedades condutoras do material que compõe o enrolamento primário. Logo, pode-se verificar que existe um acúmulo de cargas na região do entorno do condutor, acarretando em um aumento da intensidade da indução magnética nessa direção.

Para efeito de simplificação fez-se a relutância do ar muito elevada, em comparação com o material que compõe o núcleo, fazendo com que a área posterior ao núcleo magnético tenha valores de indução magnética próximos a zero. Pode-se verificar também que $|B|$ é da ordem de mT na região entre o condutor e o enrolamento secundário. Este comportamento de decaimento do módulo da indução magnética nas regiões citadas está de acordo com a Lei de Ampère, pois a intensidade da indução magnética decai com o inverso da distância da força magnetomotriz resultante.

Na região onde está localizado o núcleo ferromagnético o valor de indução magnética é na ordem de μT e isto ocorre pela existência de uma força desmagnetizante denominada efeito de reação de armadura.

Pode-se verificar que a indução magnética no interior do núcleo varia para os dois casos. Utilizando um ponto base do interior do núcleo dos dois materiais obteve-se os valores: $79 \mu T$ para o Aço M-47 e $3,8 \mu T$ para a liga FINEMET®.

Assim, pode-se verificar que a liga nanocristalina tem uma indução magnética, no interior do núcleo, bem menor que a liga de Aço silício.

5.2. Simulação do Núcleo Misto

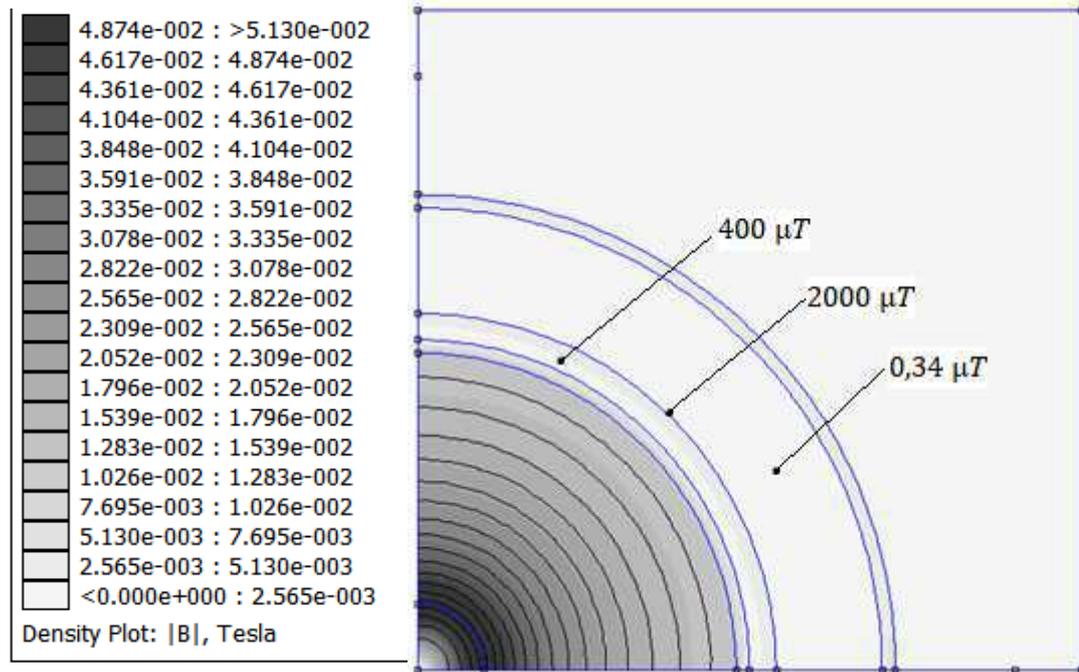
Para uma análise mais ampla do comportamento da distribuição de indução magnética no núcleo composto por duas ligas ferromagnéticas, foram utilizadas diferentes proporções dos materiais.

Com base nas dimensões do núcleo magnético propostas por [4], foram simulados três casos:

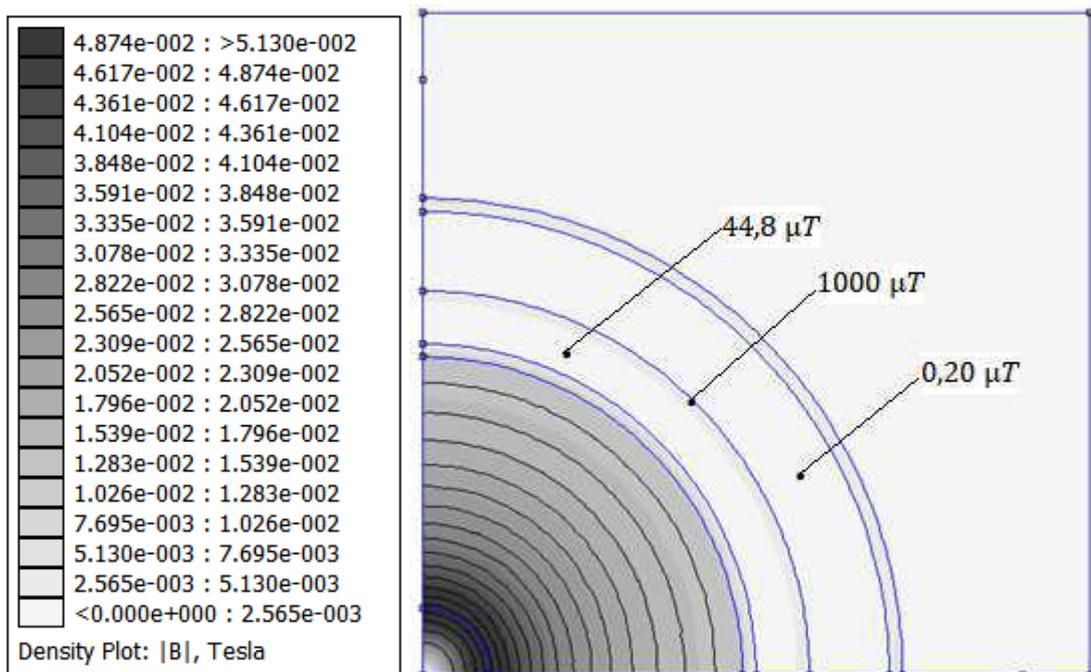
- 20% FINEMET® e 80% Aço M-47;
- 40% FINEMET® e 60% Aço M-47;
- 50% FINEMET® e 50% Aço M-47;

A liga nanocristalina foi utilizada mais próxima ao enrolamento primário, pois dispõe de maior permeabilidade magnética. Com isso, foi possível obter a distribuição de indução magnética, no interior do núcleo, com a junção dos dois tipos de materiais ferromagnéticos. Os resultados estão ilustrados na Figura 24.

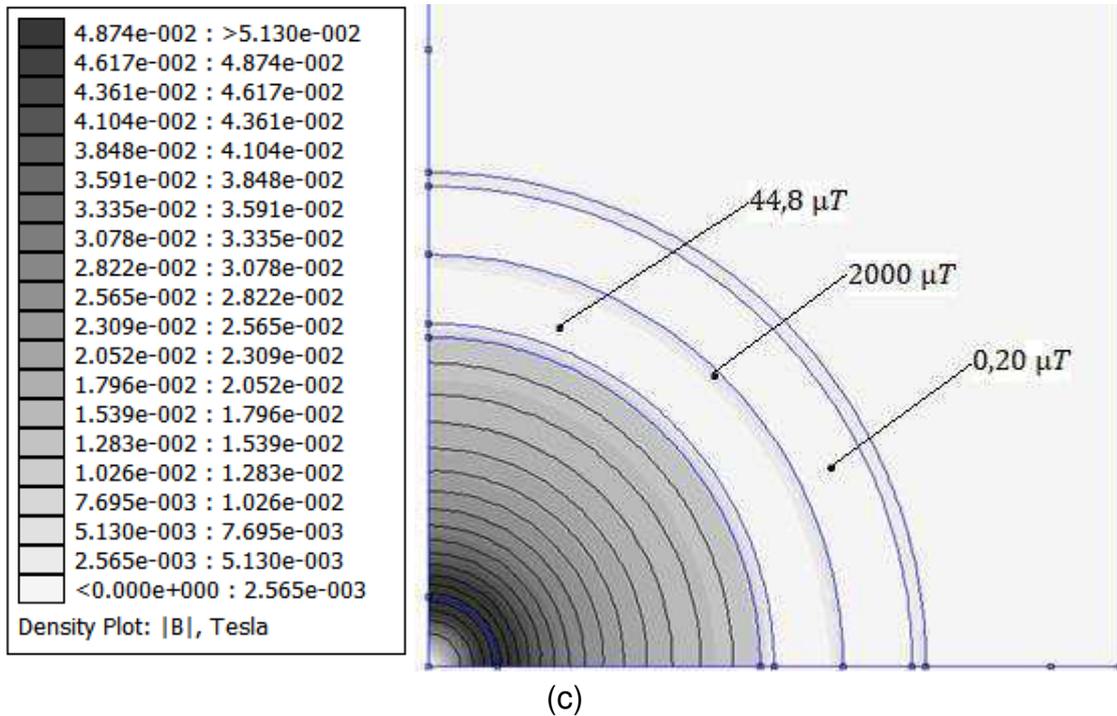
Figura 24: Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$ (a) 20% FINEMET® e 80% Aço M-47 (b) 40% FINEMET® e 60% Aço M-47 (c) 50% FINEMET® e 50% Aço M-47.



(a)



(b)



Fonte: Elaboração Própria.

Foram coletados dados de indução magnética dos dois materiais empregados no núcleo misto. Tomando um ponto em comum em todas as simulações, obteve-se valores diferentes para cada disposição. Estes valores podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7: Valores de indução magnética obtidos nas simulações.

Material/Porcentagem	$ B $ (μT)		
	Interior de Núcleo		Junção
	FINEMET®	M-47	
20% FINEMET® /80% Aço M-47	400	0,34	2000
40% FINEMET® /60% Aço M-47	4,08	0,20	1000
50% FINEMET® /50% Aço M-47	44,8	0,20	2000

Fonte: Elaboração própria.

Com os dados da Tabela 7, pode-se constatar que a liga FINEMET® apresentou valores de indução magnética mais elevados no núcleo misto do que quando utilizado sem a junção com o Aço M-47. Contudo, os valores de indução magnética do Aço M-47 diminuíram consideravelmente.

Os valores de indução magnética na junção são altos, como era esperado, pois existe a união de dois materiais com características diferentes e entre eles vai existir um entreferro. Com a presença do entreferro vai existir ar entre as ligas e isso introduz ao sistema uma maior linearidade.

Sabe-se que a liga nanocristalina satura mais rapidamente que o Aço Silício, como pode-se ver na Figura 22. A corrente suportada pela liga FINEMET® é relativamente baixa, tornando-a pouco eficiente para aplicações que demandam correntes mais elevadas.

Assim, este efeito de aumento da indução magnética da liga nanocristalina em um núcleo misto com Aço Silício, pode ser útil caso se deseje utilizar este material para projetos com correntes mais elevadas, pois a liga FINEMET® vai suportar valores maiores de corrente antes de chegar na saturação.

6. Conclusão

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) foram apresentados alguns estudos analíticos e computacionais referentes aos transformadores de corrente (TC) com núcleos toroidais, tomando como base comparativa a influência do material ferromagnético empregado no núcleo, particularmente no que diz respeito ao erro de fase (ângulo de fase).

Nos estudos analíticos e teóricos foram utilizados conceitos vistos na graduação de engenharia elétrica em disciplinas como Eletromagnetismo, Conversão Eletromecânica, Técnicas de Medição, dentre outras. Foram usadas algumas das equações de Maxwell, as propriedades eletromagnéticas dos materiais magneticamente moles e os circuitos magnéticos e elétricos equivalentes,

Para efeito de simulações computacionais empregou-se o método dos elementos finitos, conforme apresentado por David Meeker no programa FEMM [1]. Adicionalmente, foram apresentados comentários sobre o emprego de outros pacotes computacionais de cálculo de campos eletromagnéticos 2D e 3D.

Essas simulações foram feitas no domínio da magnetostática, utilizando dados referentes aos materiais condutores primários e secundários (condutividade e densidade de corrente elétrica) e aos materiais magneticamente moles empregados nos núcleos (ligas de ferro-silício e a liga nanocristalina FINEMET®).

O emprego do programa de cálculo de campo possibilitou a visualização das linhas de densidade de fluxo magnético (indução magnética) no interior do núcleo, ratificando o efeito desmagnetizante da corrente elétrica do secundário, conforme previsto pela lei de Lenz.

Esse efeito desmagnetizante nos permite perceber que o núcleo não estará submetido ao efeito da saturação magnética, e varia conforme o material utilizado. Para o caso do núcleo composto, em cada caso simulado obteve-se valores diferentes.

Em termos comparativos, percebeu-se que a liga nanocristalina foi aquela que melhor contribuiu para a redução do ângulo de fase.

7. Referências

- [1] MEEKER, D. “*Finite Element Method Magnetic (FEMM) user’s manual – version 4.2*”. 2018.
- [2] BATISTA, T.C. “*Transformadores de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina Utilizados para Serviços de Medição e Proteção em Sistemas Elétricos*,” Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. 2014.
- [3] HAYT, W. H.; BUCK, J. A. “Eletromagnetismo,” Bookman, 8ed. 2013.
- [4] SILVA, T. L. V. N. “*Transformador de Corrente com Núcleo toroidal para Recuperação de Energia Eletromagnética*.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande. 2016.
- [5] SCHETTINO, B. M. “*Uma proposta para detecção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos núcleos dos transformadores de corrente utilizados em circuitos de proteção*,”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora. 2012.
- [6] *NBR 6856*. Transformador de Corrente - Especificação. Associação de Normas Técnicas: ABNT, Rio de Janeiro, 1990.
- [7] *NBR 6821*. Transformador de Corrente - Método de Ensaio. Associação de Normas Técnicas: ABNT, 1992.
- [8] SOLON, M. F. “*Medição de Energia Elétrica*”. 2ª Edição. Recife: Ed. UFPE, 1980.
- [9] BERTOTTI, G. “*General properties of power losses in soft ferromagnetic materials*”. IEEE Transactions on Magnetics, v. 40, n. 1, p. 621-630, 1988.
- [10] LIN, D. et al. “*A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis*”. IEEE Transactions on Magnetics, v. 40, n. 2, p. 1318-1321, 2004.
- [11] MATSUSHITA, N.; KIM, D.; ABE, M. “*High-flux density and low-core losses attained for ferrite/permalloy composite core*”. IEEE Transactions on Magnetics, v. 42, n. 10, p. 2824-2826, 2006.
- [12] LUCIANO, B. A. et al. “*Medições das perdas e da corrente de excitação em transformadores monofásicos de baixa potência com núcleo de liga amorfa: antes e depois do processo de oxidação*,” VIII Semetro. João Pessoa, PB, Brazil, June 17 – 19, 2009.
- [13] CASTRO, N. A. et al. “*Pó de Ferro Microencapsulado: Efeito do Tratamento Térmico de Recozimento na Redução das Perdas Magnéticas*”. 2002. São Paulo.

- [14] SLEMON, G. R. “*Electrical Machines and Drivers*,” Addison-Wesley, 1992.
- [15] BATISTELA, N. J. “*Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício*”. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.
- [16] SLEMON, G. R. “*Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas*,” 1st ed. São Paulo: LTC, 1974.
- [17] SLEMON, G. R.; A. Straughen, “*Electrical Machines*,” Addison-Wesley, 1980.
- [18] SLEMON, G. R. “*Electrical Machines and Drivers*,” Addison-Wesley, 1992.
- [19] LUCIANO, B. A. “*Fundamentos de Circuitos Magnéticos e Transformadores*,” Apostila – Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 2012.
- [20] BATISTELA, N. J. *et al.* “*Caracterização magnética de lâminas de aço silício e avaliação das perdas no ferro sob vários regimes de indução*,”. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2000.
- [21] SALES, B. C.; *et al.* “*Thermoelectric properties of Co-, Ir-, and Os-doped FeSi alloys: Evidence for strong electron-phonon coupling*,” Physical Review B. 2011.
- [22] SINNECKER, P. J. “*Matérias Magnéticas Doces e Matérias Magnéticas Amorfas*,” Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2000.
- [23] PIROTA, K. R. “*Magnetoimpedância Gigante em Materiais Ferromagnéticos Amorfos: Uma Breve Introdução*,” Revista Physicae 1. 2000.
- [24] CASTRO, W. B; LUCIANO, B. A. “*Vidros Metálicos: uma nova classe de materiais*”. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.4.2. 2009.
- [25] HASEGAWA, R. “*Application of rapidly solidified metals in the USA and Japan*”. Bern: Technische Rundschau, 1991, 8 p.
- [26] YOSHIZAWA, Y. “*Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-Based alloys. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*”, v. 1, p. 51-62,1999.
- [27] STAUDT, T. “*Estudo de Transformadores de Corrente Utilizados em Instrumentação*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.
- [28] YOSHIZAWA, Y.; OGUMA S.; YAMAMUCHI, K. “*New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure*”. J. Appl. Phys., vol. 64, p. 6044-6046, 1988.

- [29] MAKINO, A. *et al.* “Low core losses and magnetic properties of Fe₈₅-86Si₁₋₂B₈P₄Cu₁ nanocrystalline alloys with high B for power applications (invited).” *Journal of Applied Physics*, v. 109, 2011.
- [30] BINI, M. A. *et al.* “Estudo de aplicação experimental e viabilidade de utilização de transformadores de distribuição com núcleo amorfo.” In: I CITENEL, 2001, Brasília. CD ROM. Brasília: ANEEL, 2001
- [31] HOMRICH, R. P. “Transformadores de corrente utilizando metal amorfo”. Porto Alegre, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.
- [32] LUCIANO, B. A. “Estudo de aplicações de liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência”. Campina Grande. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- [33] GUERRA, F. C. “Modelos de transformador de corrente para estudos em baixas frequências”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande,
- [34] LUCIANO, B. A., CASTRO, W. B. “Transformadores de Distribuição de Energia Elétrica com Núcleo de Metal Amorfo,” *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6.1 (2011) 01-05. 2010.
- [35] GILMAN, J.J. “Metallic Glasses”. *Phys. Today*, 28(5): 46-53, 1975.
- [36] FU, H.M. *et al.*, “*Scripta Materialia*” 44 (2006) 147-150.
- [37] CASTRO, W. B; LUCIANO, B. A. “Vidros Metálicos: uma nova classe de materiais”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.4.2 (2009) 20-25.
- [38] MARTIS *et al.* Current transformer having na amorphous Fe-based core. US 2003/0151483 A1, 14 agosto 2003.
- [39] YOSHIZAWA, Y.; OGUMA S.; YAMAMUCHI, K. “New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure”. *J. Appl. Phys.*, vol. 64, p. 6044-6046, 1988.
- [40] CASTRO, W. B; LUCIANO, B. A. “Ligas nanocristalinas: histórico, desenvolvimento e aplicações eletroeletrônicas”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.7.1 (2012) 43 – 47
- [41] DRAXLER, K.; STYBLFKOVFI, R. “Use of nanocrystalline materials for current transformer construction. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*”, p. 447-448, 1996.

- [42] LUCIANO, B. A.; GUIMARÃES, M. K. A.; CASTRO, W. B. "Some design considerations on industrial applications of amorphous and nanocrystalline alloys. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*", v. 14, p. 133-138, 2002.
- [43] LUCIANO, B. A. et al. "Nanocrystalline Material in Toroidal Cores for Current Transformer: Analytical Study and Computational Simulations. *Materials Research*". v. 8, p. 395-400. 2005.
- [44] LUCIANO, B. A. et al. "Transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina". *IEEE Latin American Transactions*". v. 4, n. 3, p. 160-164, 2006.
- [45] YOSHIZAWA, Y. Magnetic core for current transformer, current transformer and watt-hour meter. US 2009/0184705 A1, 23 julho 2009.
- [46] KWICZALA, J.; KASPERCZYK, B. "Composite Cores in Current Transformers. *16th International Conference on Composite Materials*". Kyoto, 2007. 1-5.
- [47] LESNIEWSKA, E. E.; RAJCHERT, R. "Application of the Field-Circuit Method for the Computation of Measurement Properties of Current Transformers With Cores Consisting of Different Magnetic Materials". *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 46, p. 3778-3782, 2010.
- [48] LESNIEWSKA, E. E.; RAJCHERT, R. "3D Field-Circuit Analysis of Measurement Properties of Current Transformers with Axially and Radially Connected Cores Made of Different Magnetic Materials. *Progress In Electromagnetics Research*". M, v. 28, p. 1-13, 2013.

● Apêndice A

Alguns fabricantes e fornecedores de núcleos de materiais magneticamente moles

IMAG: empresa especializada na fabricação e comercialização de ferritas de MnZn com alta permeabilidade e baixas perdas magnéticas para utilização em núcleos de impedância. Endereço eletrônico: <http://www.imag.ind.br>;

MAGMATEC: empresa sediada em Cachoeirinha – RS, fornecedora de núcleos de ferrite MnZn em diversos tamanhos e formatos para aplicações até 2 MHz. Endereço eletrônico: <http://www.magmattec.com.br/>;

SONTAG: A empresa Sontag se dedica, desde 1956, à produção de materiais magnéticos, tais como núcleos de ferrita tipos "Manganês-Zinco - MnZn" e "Níquel – Zinco - NiZn". Endereço

THORTON: empresa sediada em Nova Vinhedo – SP. E-mail: Endereço eletrônico: <http://www.thornton.com.br/>;

TOROID DO BRASIL: empresa sediada em São José dos Pinhais – PR, desde 1994. Endereço eletrônico: <https://www.toroid.com.br>.

VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG: empresa alemã, fabricante de ligas amorfas e ligas nanocristalinas. Representantes no Brasil: Ammon & Rizos do Brasil Ltda. Jose Eduardo Molina. Calçada das Palmas, 20 - Alphaville Comercial. Barueri - SP, 06453-04 Brazil, Phone: +55 11 4688-1960. Email: [jmolina\(at\)ammonrizos.com.br](mailto:jmolina@ammonrizos.com.br).

HITACHI METALS LTDA: empresa japonesa, fabricante de ligas amorfas e ligas nanocristalinas. Endereço eletrônico: https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/infr/en/p0_1.html.

FERROXCUB: empresa internacional fabricante de núcleos de ferrita de diferentes configurações geométricas: Endereço eletrônico: <https://www.ferroxcube.com/en-global/home/index>.

APERAN: empresa internacional fabricante da liga nanocristalina NANOPHY. Endereço eletrônico: <https://www.aperam.com/brazil#topics-navigation>.

Alguns fabricantes de Transformadores de Corrente

BALTEAU: Distrito Industrial de Itajubá – MG
(<http://www.balteau.com.br/balteau/pb/>);

ARTECHE: Espanha, México, Argentina e Brasil (<https://www.artech.com/pt/>);

SEED'EL: Mogi-Guaçu, São Paulo - SP (www.seedel.com.br);

BRASFORMER: Estrada das Lágrimas, 3034, São Paulo –

REHTOM: Mogi Guaçu – São Paulo (<http://www.rehtom.com.br/transformador-corrente-tc-transformadores-correntes-tcs>);

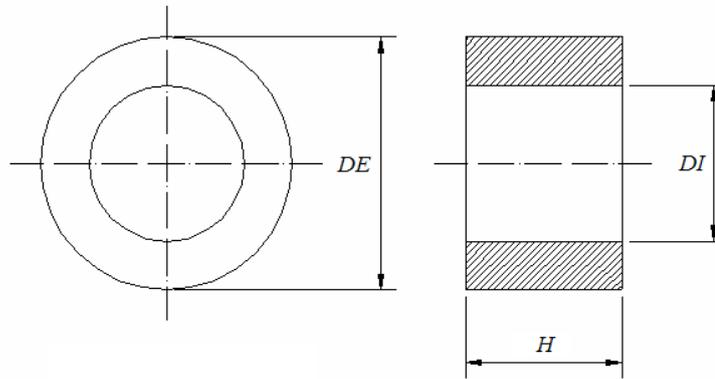
SIEMENS: <https://w3.siemens.com.br>. E-mail: atendimento.br@siemens.com.
Telefone: 0800 11 94 84;

KRON: São Paulo – SP (<http://www.kron.com.br>);

SCHNEIDER ELECTRIC: seis unidades fabris no Brasil
(<https://www.se.com/br/pt/about-us/unidades/>).

- Apêndice B

Dimensões do Núcleo Toroidal de Liga Nanocristalina



Diâmetro externo do material magnético (DE) = 97,5 mm

Diâmetro interno do material magnético (DI) = 79,50 mm

Altura do material magnético (largura da fita) (H) = 18,00 mm

Fator de empilhamento = 0,85

Área magnética efetiva = 138,8 mm²

Espessura do encapsulamento = 2,5 mm

