



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

**Transformadores de Corrente com Núcleo de Liga
Nanocristalina Utilizados para Serviços de
Medição e Proteção em Sistemas Elétricos**

Thiago de Carvalho Batista

Campina Grande, Paraíba, Brasil

© Thiago de Carvalho Batista, Fevereiro de 2015

Thiago de Carvalho Batista

**Transformadores de Corrente com Núcleo de Liga
Nanocristalina Utilizados para Serviços de Medição e
Proteção em Sistemas Elétricos**

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Benedito Antonio Luciano, Dr.
Orientador

Raimundo Carlos Silvério Freire, Dr.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Fevereiro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B333t Batista, Thiago de Carvalho.
Transformadores de corrente com núcleo de liga nanocristalina utilizados para serviços de medição e proteção em sistemas elétricos / Thiago de Carvalho Batista. – Campina Grande, 2015.
109 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Benedito Antonio Lucena, Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire".

Referências.

1. Transformadores de Corrente. 2. Ligas Nanocristalinas. 3. Núcleos Toroidais. 4. Núcleo Misto. I. Lucena, Benedito Antonio. II. Freire, Raimundo Carlos Silvério. III. Título.

CDU 621.314(043)

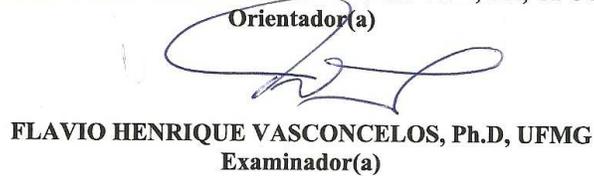
**"TRANSFORMADORES DE CORRENTE COM NÚCLEOS DE LIGA NANOCRISTALINA
UTILIZADOS PARA SERVIÇOS DE MEDIÇÃO E PROTEÇÃO EM SISTEMAS
ELÉTRICOS"**

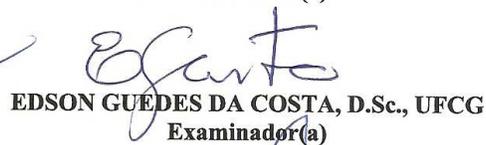
THIAGO DE CARVALHO BATISTA

TESE APROVADA EM 12/12/2014


BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)

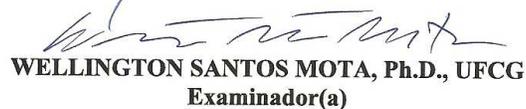

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador(a)


FLAVIO HENRIQUE VASCONCELOS, Ph.D, UFMG
Examinador(a)


EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


JOSÉ ROBERTO CARDOSO, Dr., USP
Examinador(a)


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, George Batista Zeferino e Maria Ângela de Carvalho Batista, ao meu padrinho Edmilson Barros de Lima e em memória da minha madrinha Maria do Céu de Carvalho Barros.

Agradecimentos

À toda minha família, em especial aos meus pais e meus padrinhos.

Aos professores Benedito Antonio Luciano e Raimundo Carlos Silvério Freire pela orientação e a amizade.

Aos meus amigos, Cícero Henrique, Cláudio Diego, Cristóvão Mácio, Euler Macedo, Stênio Cantalice e Warner Peixoto, e a todos os amigos conquistados ao longo da minha vida.

À banca avaliadora, pois com suas recomendações houve um enriquecimento da pesquisa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso.

Resumo

Os transformadores de corrente (TC) utilizados nos sistemas elétricos podem ser divididos em TC para serviços: medição e proteção. A principal diferença na constituição dos tipos de TC é o material utilizado no núcleo magnético. No TC utilizado para serviços de medição são empregados núcleos magnéticos que possuam uma alta permeabilidade magnética, já nos TC para serviços de proteção, os núcleos com alta densidade de fluxo de saturação são usados. Nesta tese é apresentado um estudo teórico e experimental sobre a aplicação de ligas nanocristalinas em núcleos toroidais de TC utilizados nos sistemas elétricos. Tomando como base as propriedades eletromagnéticas das ligas nanocristalinas, tais como: alta permeabilidade magnética relativa, densidade de saturação de fluxo magnético, alta resistividade e baixas perdas por histerese, são apresentadas e discutidas as formas como essas características afetam o desempenho dos transformadores de corrente. A partir dos resultados obtidos, percebe-se que o emprego de ligas nanocristalinas nos núcleos dos TC para serviços de medição, devido a sua alta permeabilidade, contribuiu para a redução da incerteza de medição devido à diferença de fase entre entrada e saída, erro de fase. A alta permeabilidade das ligas nanocristalinas diminui a corrente de excitação do TC, desse modo, os TC com núcleo de liga nanocristalina apresentam uma menor variação do erro de fase quando se altera a carga conectada no enrolamento secundário e quando a corrente primária possui componentes harmônicas. Com o intuito de utilizar um TC que possa ser utilizado tanto para serviços de medição quanto para serviços de proteção foi avaliado um TC com núcleo misto (ou núcleo composto), o qual possui um núcleo de liga nanocristalina e um núcleo de liga FeSi. O TC com núcleo misto quando for magnetizado e a densidade de fluxo magnético for relativamente baixa, as características predominantes são da liga nanocristalina, portanto, ideal para utilização como TC de medição. Quando o TC com núcleo misto é submetido a uma alta densidade de saturação, as características do núcleo de FeSi se tornam evidente, ideal para o uso em TC para proteção. Portanto, o TC com núcleo misto pode ser utilizado para serviços de medição e proteção.

Palavras-chaves: ligas nanocristalinas, núcleos toroidais, núcleo misto, transformadores de corrente.

Abstract

The current transformers (CT) used in electrical systems can be divided into two mainly types: CT for measurement and CT for protection. The main difference in the constitution of the CT types is the material used in the magnetic core. In CT for measuring service are employed cores with high magnetic permeability, and in CT for protection purposes are used cores with high saturation flux density. In this thesis is presented a theoretical and experimental study about the application of nanocrystalline alloys in CT toroidal cores applied to electrical systems. Based on the electromagnetic properties of nanocrystalline alloys, i.e. high relative magnetic permeability, magnetic flux saturation density, high resistivity and low hysteresis losses, are presented and discussed the influence of these characteristics in the CT performance. From the obtained results, it was verified that the use of nanocrystalline alloys in CT cores for measurement services, due to its high permeability, contributes to the reduction of phase errors, thereby improving the accuracy class. The high permeability of nanocrystalline alloys decreases the CT exciting current, and presents a smaller variation of the phase error when changing the load connected to the secondary winding and when the primary current presents harmonic components. In order to use a CT which can be used both for measuring and protection services it was evaluated a CT with composite core, which is composed of a nanocrystalline alloy and FeSi materials. The CT with composite core when tested with a low saturation flux density, the predominant characteristics are the nanocrystalline alloy one, therefore ideal for use as CT for measurement. When CT with composite core is applied with a high saturation density, characteristics of the core FeSi become apparent, being ideal for protection applications. Therefore, the CT with composite core can be used for metering and protection services.

Keywords: current transformes, nanocrystalline alloys, composite core, toroidal core.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Regiões da Curva de Magnetização.....	10
Figura 2 – Laço B versus H	10
Figura 3 – Laços menores e permeabilidade incremental.	11
Figura 4 – Circuito para determinação do laço B versus H	12
Figura 5 – Determinação da curva de magnetização.	14
Figura 6 - Influência da frequência do campo magnético aplicado sobre as perdas magnéticas.	15
Figura 7 - Relação do diâmetro com a concentração de C_u	20
Figura 8 – Relação do μ_r com a concentração de C_u	21
Figura 9 – Relação do diâmetro com a concentração de Nb.	21
Figura 10 - Dependência do diâmetro na fase ccc da liga $Fe_{73.5}Cu_1M_3Si_{13.5}B_9$ com relação ao M (M: Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W).	22
Figura 11 - Dependência da μ_r da liga $Fe_{73.5}Cu_1M_3Si_{13.5}B_9$ com relação ao M (M: Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W).	22
Figura 12 – Ligação do TC.....	23
Figura 13 – Circuito elétrico equivalente de um transformador de corrente com todos os parâmetros refletidos ao primário.	25
Figura 14 – Diagrama fasorial do transformador de corrente.	25
Figura 15 - Curvas de saturação de TC de proteção e medição.	28
Figura 16 – Típicas tensões secundárias de um TC com uma corrente primária senoidal constante e com o aumento da carga.	30
Figura 17 - Corrente primária de falta.	31
Figura 18 - Fluxo no núcleo.	32
Figura 19 – Efeito da densidade máxima de fluxo de saturação no fluxo do interior do núcleo do TC quando submetido a uma corrente primária com nível CC.	32
Figura 20 – Variação do fluxo no núcleo do TC depois da ocorrência de uma falta.	34
Figura 21 - Corrente no secundário de um TC para diversos fluxos remanescentes.	35
Figura 22 – Laço B versus H do Núcleo M-033 à 60Hz.	37
Figura 23 – Laço B versus H da liga nanocristalina de composição química: $Fe_{83.3}Si_4B_8P_4Cu_{0.7}$, ensaios na frequência de 1 kHz.	38
Figura 24 – Comportamento do diagrama fasorial de um TC com o aumento da componente indutiva da carga.	39
Figura 25 – Comportamento do diagrama fasorial de um TC com o aumento da componente resistiva da carga.	40
Figura 26 - Circuito equivalente considerado para o TC.	42
Figura 27 - Curva de magnetização linearizada divididas em 3 regiões.	43

Figura 28 – Dependência da permeabilidade magnética com a densidade de fluxo magnético, $f = 50$ Hz.....	47
Figura 29 – Dependência do erro de ângulo de fase (β) com a intensidade da corrente primária (I_p), para um TC com relação 50/5 A, $f = 50$ Hz.	47
Figura 30 – Estrutura do núcleo misto.	48
Figura 31 – 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®.....	49
Figura 32 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para os núcleos: a) FeSi b) núcleo misto.....	50
Figura 33 – Modelos para a disposição dos núcleos em um TC misto: a) axial b) radial. ..	51
Figura 34 - Circuito para determinação do laço B versus H	53
Figura 35 - Foto da montagem experimental com um núcleo de FeSi.	54
Figura 36 - Curva de magnetização inicial do núcleo de liga nanocristalina NANOPHY® N3E1.	55
Figura 37 - Curva λ versus i_0 para o TC a ser modelado.....	55
Figura 38 - Curva λ versus i_0 para o TC a ser modelado dividida em duas regiões.	56
Figura 39 - Curva da região 1 aproximada pelo <i>software</i> LABFIT®.....	56
Figura 40 - Curva de magnetização para a núcleo NANOPHY® N3E1.	57
Figura 41 – Representação da linha de transmissão utilizada nas simulações.	58
Figura 42 – Circuito utilizado para simulação da linha de transmissão antes da falta.	59
Figura 43 - Circuito monofásico equivalente para simulação do sistema após a falta.	59
Figura 44 – Foto dos protótipos confeccionados com as ligas NANOPHY® N3E1 e liga de FeSi GO.....	61
Figura 45 – Fotos da montagem do núcleo misto, composto por um núcleo de FeSi e um núcleo de liga nanocristalina FINEMET®.....	62
Figura 46 - Foto da medição da massa do núcleo de liga nanocristalina FINEMET®.....	63
Figura 47 – Diagrama do circuito para obter o erro de fase do TC sob ensaio.	63
Figura 48 - Diagrama esquemático do sensor de corrente utilizado para medições das correntes.	64
Figura 49 - Foto da montagem experimental realizada no LIMC/DEE/UFCG.	65
Figura 50 - Exemplo do erro de fase dos sensores.	65
Figura 51 – Exemplo do erro de fase para o TC com núcleo de FeSi no ensaio com o enrolamento secundário curto-circuitado.	66
Figura 52 – Diagrama esquemático para a realização de experimentos com os TC para serviços de proteção.	67
Figura 53 - Foto da montagem experimental com a chave síncrona.	68
Figura 54 - Obtenção experimental da densidade de fluxo magnético.	68

Figura 55 - Foto da montagem experimental para obtenção da densidade de fluxo magnético.	69
Figura 56 - Foto da montagem experimental do ensaio para avaliar a influência das componentes harmônicas no erro de fase.....	71
Figura 57 – Laço <i>B versus H</i> para a liga de FeSi.....	74
Figura 58 – Laço <i>B versus H</i> para a liga nanocristalina de nome comercial N3E1.....	74
Figura 59 – Curva de magnetização inicial do núcleo misto composto por um núcleo de FeSi e outro de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.....	75
Figura 60 – Curva de permeabilidade magnética relativa do núcleo misto composto por um núcleo de FeSi e outro de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.	75
Figura 61 – Laço de <i>B versus H</i> para o núcleo misto.	76
Figura 62 - Laço <i>B versus H</i> da liga de FeSi para uma densidade de saturação de 0,1 T...76	76
Figura 63 - Laço <i>B versus H</i> da liga FINEMET® para uma densidade de saturação de 0,1 T.	77
Figura 64 - Laço <i>B versus H</i> do núcleo misto para uma densidade de saturação de 0,1 T..77	77
Figura 65 – Laço <i>B versus H</i> da liga de FeSi para uma densidade de saturação de 0,2 T..77	77
Figura 66 - Laço <i>B versus H</i> da liga FINEMET® para uma densidade de saturação de 0,2 T.	78
Figura 67 - Laço <i>B versus H</i> do núcleo misto para uma densidade de saturação de 0,2 T..78	78
Figura 68 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga FeSi antes e após uma falta.	79
Figura 69 - Fluxo de enlace do núcleo de liga FeSi antes e após uma falta.....	79
Figura 70 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta.	80
Figura 71 - Fluxo de enlace do núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta.....	80
Figura 72 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta, sendo o núcleo com o dobro da área da secção transversal.	81
Figura 73 - Fluxo de enlace do núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta, sendo o núcleo com o dobro da área da secção transversal.....	81
Figura 74 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga FeSi antes e após uma falta com a presença de um fluxo remanescente.	83
Figura 75 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina N3E1 antes e após uma falta com a presença de um fluxo remanescente....	83
Figura 76 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 3, constituído por um núcleo de liga nanocristalina N3E3.	88
Figura 77 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 5, constituído por um núcleo de liga FeSi.....	88

Figura 78 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 4, dois núcleos de liga nanocristalina N3E3 sobrepostos.....	89
Figura 79 – Curva de magnetização inicial para a liga nanocristalina N3E3.....	89
Figura 80 – Curva de magnetização inicial para a liga de FeSi.	90
Figura 81 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 4, composto por um núcleo liga nanocristalina FINEMET®.	90
Figura 82 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 6, composto por um núcleo de liga FeSi.....	91
Figura 83 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 5, composto por dois núcleos de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.....	91
Figura 84 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 4, composto por um núcleo FINEMET® com o secundário curto-circuitado.....	92
Figura 85 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 6, composto por um núcleo de FeSi e secundário curto-circuitado.....	92
Figura 86 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do núcleo 5, composto por dois núcleos FINEMET® sobrepostos com o secundário curto-circuitado.....	93
Figura 87 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC misto, composto por um núcleo FINEMET® e um núcleo de FeSi sobrepostos.....	93
Figura 88 - Densidade de fluxo magnético para o TC nº 4, núcleo de liga nanocristalina FINEMET® e corrente no enrolamento primário de 2 A.....	94
Figura 89 - Densidade de fluxo magnético para o TC nº 5, composto por dois núcleos de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos e corrente no enrolamento primário de 2 A...	94
Figura 90 - Densidade de fluxo magnético para o TC nº 6, núcleo de FeSi e corrente no enrolamento primário de 2 A.....	94
Figura 91 - Densidade de fluxo magnético para o TC com núcleo misto, composto por um núcleo de liga FeSi e outro de liga FINEMET® sobrepostos e corrente no enrolamento primário de 2 A.....	95
Figura 92 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga FeSi.	96
Figura 93 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET®.....	97
Figura 94 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® com o dobro da área da secção magnética.....	97
Figura 95 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo misto, um núcleo de liga nanocristalina FINEMET® e outro de FeSi.....	98
Figura 96 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de FeSi, antes e após a ocorrência de uma falta.	98
Figura 97 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET®, antes e após a ocorrência de uma falta.	99
Figura 98 - Correntes primária e secundária do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® com o dobro da área da secção transversal, antes e após a ocorrência de uma falta.....	99

Figura 99 - Correntes primária e secundária do TC com núcleos sobrepostos, um núcleo de liga nanocristalina FINEMET[®] e outro de FeSi, antes e após a ocorrência de uma falta..100

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação das propriedades magnéticas de diversas ligas.	23
Tabela 2 - Impedâncias para os relés eletromecânicos e os relés digitais.....	39
Tabela 3 - Desenvolvimento das Ligas Nanocristalinas.	45
Tabela 4 - Ensaio experimentais para a determinação do ângulo de fase. $I_1 = 400$ A e $I_2 = 5$ A.....	48
Tabela 5 – Erro de ângulo de fase para TC com núcleo misto e núcleo de FeSi.	50
Tabela 6 – Erro de ângulo de fase para TC de 5 VA, correntes no primário e secundário 5 A.....	50
Tabela 7 – Comparativo das contribuições de diversos autores dos TC com núcleo de liga nanocristalina.	51
Tabela 8 – Características dos TC utilizados neste trabalho.	61
Tabela 9 - Cargas nominais determinadas com base na NBR-6856.....	70
Tabela 10 - Cargas utilizadas nos experimentos com os TC.....	70
Tabela 11 – Módulos e fases das componentes harmônicas aplicadas a uma senoide de 60 Hz.....	71
Tabela 12 – Permeabilidade magnética máxima e densidade de saturação de fluxo magnético para diversos materiais submetidos aos ensaios.	73
Tabela 13 - Fluxos remanescente para os núcleos sob ensaios.	82
Tabela 14 – Áreas geométrica e efetiva e massas dos núcleos sob ensaio.....	84
Tabela 15 - Erros de fase dos TC sob ensaios com uma corrente de 10% I_N	84
Tabela 16 - Erros de fase dos TC sob ensaios com uma corrente de 100% I_N	85
Tabela 17 – Erro de fase dos núcleos de FeSi e as ligas nanocristalinas N3E1, N3E2 e N3E3.	85
Tabela 18 – Erros de fase para os TC com núcleo de FeSi e N3E3 submetidos a distorções de corrente.	86
Tabela 19 – Erros de fase para os TC com núcleos de FeSi e N3E3 submetidos a um sinal distorcido.	87
Tabela 20 - Erros de fase para os TC com núcleos de FeSi, FINEMET [®] , FINEMET [®] duplo e núcleo misto (FINEMET [®] + FeSi) submetidos a um sinal distorcido.	87
Tabela 21 - Erro de fase para os núcleos sob ensaio com 10% da corrente nominal, 10 mA.	95
Tabela 22 - Erro de fase para os núcleos sob ensaio com 100% da corrente nominal, 100 mA.....	96

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

α_{st}	Expoente de Steinmetz
β	Ângulo de fase do TC
ε	Erro
ΔB	Varição do fluxo magético
ΔH	Varição do campo magnético
η_{st}	Coefficiente de Steinmetz
λ	Fluxo de enlace
λ_R	Fluxo de enlace remanescente
μ	Permeabilidade magnética
μ_{Δ}	Permeabilidade magnética incremental
μ_i	Permeabilidade magnética inicial
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
σ	Condutividade elétrica do material
ϕ	Fluxo magnético
θ	Ângulo entre a corrente e a tensão secundário do TC
ϕ	Ângulo ente o fluxo e a corrente de magnetização
χ_m	Susceptibilidade Magnética
$\langle s \rangle$	Tamanho do grão magnético
A	Área da secção transversal
A^{cte}	Constante efeito da textura (ligação dos grãos)
A_e	Área efetiva da secção transversal
A_g	Área geométrica da secção transversal
B	Densidade de fluxo magnético
B_m	Indução máxima
B_{op}	Densidade de operação do fluxo magnético
B_R	Densidade de fluxo magnético remanescente
B_S	Densidade de saturação de fluxo magnético
d	Espessura da lâmina

f	Frequência
F_{emp}	Fator de empilhamento
h	Passo de integração
H	Intensidade de campo magnético
H_c	Força coerciva
H_{ci}	Campo coercitivo local
H_0	Constante que expressa os efeitos das impurezas
I_0	Corrente de excitação
I_1	Corrente no enrolamento primário
I_2	Corrente no enrolamento secundário
I'_2	Corrente no enrolamento secundário refletido ao primário
l_e	Comprimento médio efetivo
m_v	Massa específica do material
M	Magnetização do material
N_1	Número de espiras do enrolamento primário
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário
P_{total}	Perda Magnética total
P_{hist}	Perdas por Histerese
$P_{parasita}$	Perdas por Correntes Parasitas
P_{adic}	Perdas Adicionais
Rp	Representação das perdas ôhmicas no núcleo
S	Potência aparente do TC
T	Tesla
T_x	Temperatura de Cristalização
W_f	Perdas no ferro por correntes induzidas
X_m	Representação da reatância de magnetização do núcleo
W_h	Perdas no ferro por histerese
Z_c	Impedância do instrumento de medição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APFIM	<i>Atom Probe Field Ion Microscope</i>
CA	Corrente alternada

CC	Corrente contínua
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
FCR	Fator de Correção da Relação
GNO	Grãos Não Orientados
GO	Grãos Orientados
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LIMC	Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
TC	Transformador de Corrente
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Delimitação do Tema.....	1
1.2 Motivação.....	3
1.3 Objetivos e Contribuições da Tese	3
1.3.1 Objetivos.....	3
1.3.2 Contribuições.....	4
1.4 Principais Publicações	5
1.5 Organização do Texto.....	6
2. Fundamentação Teórica	7
2.1 Materiais Magnéticos.....	7
2.1.1 Domínios Magnéticos	8
2.1.2 Anisotropia Magnética	8
2.1.3 Magnetostricção.....	8
2.2 Laço B versus H	9
2.2.1 Determinação Experimental do Laço B versus H	12
2.3 Perdas Magnéticas	15
2.3.1 Perdas Histeréticas	16
2.3.2 Perdas por Corrente de Foucault.....	17
2.4 Materiais Magneticamente Moles	17
2.4.1 Ferrites.....	18
2.4.2 Ligas de ferro-Silício.....	18
2.4.3 Ligas Amorfas.....	19
2.4.4 Ligas Nanocristalinas	20
2.5 Transformadores de Corrente.....	23
2.5.1 Características Construtivas	24
2.5.2 Características Elétricas	25
2.5.3 Erros de Relação e de Fase.....	26
2.5.4 Classificação dos TC.....	28
2.6 Saturação em TC	29
2.6.1 Saturação por Corrente Alternada.....	29
2.6.2 Saturação por Corrente Contínua.....	31
2.6.3 Fluxo Remanescente	33

2.7	Influência do Material Magnético nos Núcleos do TC.....	35
2.7.1	Condições Normais de Operação do Sistema.....	35
2.7.2	Saturação dos TC.....	36
2.7.3	Fluxo Remanescente.....	36
2.8	Influência da Carga Conectada ao Enrolamento Secundário de um TC.....	38
2.9	Influência das Componentes Harmônicas no Erro de Fase de um TC.....	40
2.10	Modelo do TC a ser utilizados nas Simulações.....	41
3.	Revisão Bibliográfica.....	44
3.1	Ligas Nanocristalinas.....	44
3.2	TC com Núcleos de Ligas Nanocristalinas.....	46
4.	Metodologia.....	53
4.1	Caracterização Magnética dos Núcleos Toroidais.....	53
4.2	Modelamento dos TC.....	55
4.3	Modelo dos Transformadores de Corrente para Simulação.....	57
4.4	Projeto dos Transformadores de Corrente.....	59
4.5	Avaliação do Tamanho e Massa dos TC.....	62
4.6	Ensaio com TC para Serviços de Medição.....	63
4.7	Ensaio com TC para Serviços de Proteção.....	66
4.8	Ensaio com TC para Avaliar a Influência da Carga Conectada ao Enrolamento Secundário.....	69
4.9	Ensaio com TC para Avaliar a Influência das Componentes Harmônicas no Erro de Fase.....	70
4.10	Ensaio com o TC de Núcleo Misto para Serviços de Medição e Proteção.....	72
5.	Apresentação e Discussão dos Resultados.....	73
5.1	Caracterização Magnética dos Núcleos Toroidais.....	73
5.2	Simulação dos TC para Serviços de Proteção.....	78
5.3	Simulação da Saturação com a Presença de um Fluxo Remanescente.....	82
5.4	Avaliação do Tamanho e Massa dos TC.....	84
5.5	Ensaio com TC para Medição.....	84
5.6	Influência da Carga Conectada ao Enrolamento Secundário.....	85
5.7	Influência das Componentes Harmônicas no Erro de Fase dos TC.....	86
5.8	Ensaio com TC para Proteção.....	87
5.9	Ensaio com o TC de Núcleo Misto para Serviços de Medição e Proteção.....	95
6.	Conclusões.....	101

6.1 Trabalhos Futuros.....	102
Referências	104

1. Introdução

1.1. Delimitação do Tema

Até 1930, os materiais magneticamente moles que mais se destacavam eram as ligas de aço temperado. Com o desenvolvimento da ciência e da engenharia dos materiais, novos materiais magneticamente moles foram desenvolvidos, dentre eles, os aços de grãos orientados (Fe-Si GO) e as ligas amorfas.

Em 1988, o pesquisador Yoshizawa e seus colaboradores relataram que uma permeabilidade magnética maior do que as apresentadas nos materiais até então desenvolvidos é obtida quando o tamanho do grão de cristal é reduzido a uma escala nanométrica, cristalizando a liga amorfa do sistema Fe-Si-B-Nb-Cu, dando início as pesquisas sobre as ligas nanocristalinas [1].

As ligas nanocristalinas só passaram a ser exploradas pelos pesquisadores para determinadas aplicações no início do decênio de 1990. Em escala industrial, as duas indústrias pioneiras na produção de ligas nanocristalinas foram: a *Nanophase Technologies* (Darien, IL) e a *Nanodyn, Inc.* (New Brunswick, NJ). Atualmente, algumas empresas européias e japonesas fabricam ligas nanocristalinas: *ULTRAN* (Olten, Suíça), *PSI Ltd.* (Polegate, East Sussex, Reino Unido), *FSU* (Talinn, Latvia), *HITACHI* (Japão) e *VAC* (Hanau, Alemanha), dentre outras.

O interesse pelas ligas nanocristalinas decorre da sua alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coerciva e baixas perdas por histerese. A redução dos grãos à escala nanométrica é o ponto chave para as características magneticamente moles das ligas nanocristalinas [2]. Tais características conferem às ligas nanocristalinas diferentes possibilidades de aplicações em dispositivos eletroeletrônicos, dentre elas os transformadores de corrente.

Os transformadores de corrente são imprescindíveis no sistema de energia elétrica, por ser o elo entre o sistema primário e os equipamentos de medição, controle e proteção postos no secundário, sendo o funcionamento correto dos TC um fator importante para a continuidade dos serviços da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

O transformador de corrente, ou simplesmente TC, é um transformador na qual o enrolamento primário é constituído de poucas espiras, na qual a secção transversal do condutor seja compatível com a corrente a qual se quer avaliar, e um enrolamento

secundário com elevado número de espiras e secção transversal pequena, geralmente capaz de suportar uma corrente de 5 A ou 1 A. Assim, baseados nas leis de Faraday e Ampère, os TC utilizados em sistemas elétricos de potência transformam correntes elevadas, que circulam no seu primário, em correntes de menor intensidade no secundário, segundo uma relação de transformação. Desse modo, conhecendo a relação de transformação do TC e conectando um instrumento de medição no enrolamento secundário, é possível obter a corrente que circula pelo enrolamento primário.

Os TC utilizados nos sistemas elétricos de potência podem ser classificados em dois tipos:

- TC para serviços de medição: utilizados para auxiliar na medição de correntes, são caracterizados pela sua alta exatidão (classes: 0,3; 0,6 e 1,2) e baixa corrente de saturação (4 vezes a corrente nominal).

- TC para serviços de proteção: utilizados para proteção de circuitos de alta tensão, são caracterizados pela baixa exatidão (classes: 2,5 e 10) e elevada corrente de saturação (da ordem de 10 a 20 vezes a corrente nominal).

Os TC para serviço de medição possuem núcleo feito de material de elevada permeabilidade magnética. Isso quer dizer que possuem pequena corrente de excitação, pequenas perdas e baixa relutância. Tais equipamentos, operam sob condições de baixa indução magnética (cerca de 0,1 tesla) [1,3,4,5,6,7].

O núcleo do TC para proteção é constituído por um material magnético que não tem a mesma permeabilidade magnética que o TC para medição, no entanto, apenas quando submetidos a valores elevados de fluxo magnéticos é que o TC apresenta indícios de saturação. Isso corresponde em termos práticos a uma corrente primária de cerca de 20 vezes o seu valor nominal. Nos instrumentos de medição essa corrente poderia danificá-los. Porém, os relés podem perfeitamente suportá-la desde que sejam especificados para essa condição [8,9].

O TC para proteção deve retratar com fidelidade as correntes de falta sem sofrer os efeitos da saturação. Na sua especificação deve-se considerar a tensão secundária máxima a partir da qual o TC passa a apresentar os efeitos da saturação. Momento o qual, o TC começa a não atender mais os requisitos de sua classe de exatidão.

A suscetibilidade de o TC entrar em saturação quando submetido a correntes de curto-circuito tem implicação direta no desempenho dos sistemas de proteção dos equipamentos e linhas de transmissão [10,11,12,13]. Os relés sofrem influência direta do

funcionamento inadequado dos TC para proteção, ocasionando em alguns casos o subbalcance em relés de distância utilizados na proteção de linhas de transmissão e o funcionamento atrasado de relés de sobrecorrente.

1.2. Motivação

As ligas nanocristalinas desenvolvidas até 2009, tinham como limitação a densidade de saturação da liga, os quais atingiam saturação em torno de 1,2 T. No entanto, pesquisas recentes resultaram na obtenção de ligas com densidade de saturação B_s de até 1,9 T [14,15,16,17,18]. Tais ligas, possuem densidade de saturação próxima à da liga de FeSi com grãos orientados (2 T). No entanto, essas ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética relativa maior e menor força coerciva. Com a obtenção de novas ligas nanocristalina com valores de B_s mais elevados, surgem perspectivas para seu uso em TC para serviços de proteção.

Sabe-se que uma característica magnética que pode influenciar na saturação dos TC é o fluxo remanescente. Nesse caso, os núcleos de Fe-Si com entreferro são utilizados para minimizar os efeitos do fluxo remanescente. Porém, a inserção de um entreferro aumenta a corrente de magnetização e diminui a permeabilidade magnética do material, ocasionando um aumento no erro do TC, diminuindo a sua exatidão. As ligas nanocristalinas, de nome comercial NANOPERM[®] M-033 e NANOPHY[®] N3E1, apresentam densidade de fluxo remanescente em torno de 10% da densidade máxima e permeabilidade magnética elevada, o que pode ser uma alternativa para a substituição das ligas de Fe-Si com entreferro.

Com a possibilidade da utilização das ligas nanocristalinas como núcleos de TC para proteção, pode-se fabricar um TC com núcleo de liga nanocristalina que possa ser utilizado tanto para serviços de medição quanto para serviços de proteção.

1.3. Objetivos e Contribuições da Tese

1.3.1. Objetivos

Os objetivos da tese são:

- Identificar as propriedades magnéticas das ligas nanocristalinas e dos núcleos mistos, relacionando quais vantagens podem ser obtidas no seu emprego em núcleos de TC para serviços de medição e proteção em substituição às ligas de Ferro-Silício;

- Investigar, a partir de levantamento bibliográfico e experimental, quais são as composições de ligas nanocristalinas que podem ser utilizadas como núcleos de TC para serviços de medição e proteção;
- Caracterização magnética de ligas nanocristalinas e núcleos mistos, para uso em núcleo de TC para medição e proteção;
- Realizar experimentos com TC projetados com as ligas nanocristalinas disponíveis em laboratório, os quais serão utilizados para serviços de medição e proteção, visando, desse modo, analisar a influência das características magnéticas dos materiais magnéticos, tais como: permeabilidade magnética, densidade de fluxo de saturação e fluxo remanescente;
- Verificar a influência da carga conectada ao secundário no erro de fase de um TC;
- Verificar a influência das componentes harmônicas contidas na corrente primária no erro de fase de um TC.

1.3.2. Contribuições

A principal contribuição desta tese é apresentar o projeto e a realização de um protótipo de transformador de corrente com núcleo misto, composto por liga nanocristalina e liga FeSi, que pode ser utilizado tanto para serviços de medição quanto serviços de proteção.

Com relação à influência da carga conectada ao secundário e a influência das componentes harmônicas no erro de ângulo de fase, dentre outros trabalhos sobre o tema, este trabalho é o único que contempla resultados experimentais com a utilização de várias composições de ligas nanocristalinas.

Para caracterização magnética das ligas sob estudo foi desenvolvido um circuito capaz de fornecer o laço B versus H , e conseqüentemente obter: a permeabilidade magnética relativa, força coerciva, densidade de fluxo de saturação, fluxo residual e as perdas histeréticas.

Também como contribuição, foi desenvolvida uma plataforma de ensaio que visa representar em escala reduzida uma falta em alta tensão, com o uso de uma chave síncrona, controlada por microcontrolador.

1.4. Principais Publicações

As seguintes publicações foram produzidas ao longo do trabalho que resultou nesta tese:

Artigos publicados em periódicos

- 1) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; CATUNDA, S. Y. C., “*Current Transformer with Nanocrystalline Alloy Core for Measurement*”. International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Binjiang. Proceedings of I2MTC 2011, p. 1653-1656, 2011.
- 2) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; GUERRA, F. C. F.; FREIRE, R. C. S., “*Errors in Current Transformers Submitted to Nonsinusoidal Conditions*”. Metrologia 2011, Natal - RN. Anais Proceedings, p. 1-4, 2011.
- 3) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S. “*Phase error in current transformers with nanocrystalline alloys core*”. In: 19th IMEKO TC-4 Symposium Measurements of Electrical Quantities, 2013, Barcelona. 19th IMEKO TC-4 Symposium Measurements of Electrical Quantities, p. 491-495, 2013.
- 4) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B. “*Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores*”. In: 20th International Symposium on Metastable Amorphous and Nanostructured Materials, Torino – Italy, 4P2-72, 2013.
- 5) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B. “*Current transformer with a core composed of two different soft magnetic materials*”. In: 21th International Symposium on Metastable Amorphous and Nanostructured Materials, Cancun – México, 2014.

Artigos publicados em revistas

- 6) LUCIANO, B. A.; BATISTA, T. C.; FREIRE, R. C. S.; GUERRA, F. C. F.; CASTRO, W. B., “*Current transformers with nanocrystalline alloy toroidal core: analytical, computational and experimental studies*”. Materials Research (São Carlos. Impreso), v. 15, p. 805-808, 2012.
- 7) BATISTA, T. C.; LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B.; ARAÚJO, E. M. “*Influence of magnetic permeability in phase error of current transformers with nanocrystalline alloys cores*”. Journal of Alloys and Compounds, p. S228-S230, 2014.

1.5. Organização do texto

Com o intuito de obter os objetivos propostos, esta tese está organizada da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 é apresentada, de forma resumida, a fundamentação teórica básica necessária para o entendimento deste trabalho. Dentre os assuntos abordados, são apresentados os conceitos fundamentais sobre os materiais magnéticos e os transformadores de corrente, os erros relacionados aos TC, bem como a influência do material magnético utilizado como núcleo do TC.
- No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as ligas nanocristalinas e os TC com núcleos de ligas nanocristalinas;
- No Capítulo 4 são abordadas as metodologias para a realização dos experimentos propostos;
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados da caracterização magnética dos núcleos magnéticos disponíveis em laboratório;
- No Capítulo 6 são expostos os resultados das simulações dos TC para serviços de proteção;
- No Capítulo 7 são exibidos os resultados dos experimentos com TC para serviços de medição, bem como, serviços de proteção;
- No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e algumas propostas de trabalhos decorrentes desta tese.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Materiais Magnéticos

A indução magnética B [T], linhas de fluxo de campo magnético atravessando uma superfície, é a soma dos efeitos de um campo magnético H [A/m] produzido por uma corrente mais o efeito da magnetização do material (efeito de “spins” alinhados), dada pela relação (1). Esta relação pode ser tratada de maneira vetorial ou de um modo mais simples pela resultante média dos efeitos das grandezas como escalares.

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

A susceptibilidade magnética (χ_m) de um material é a medida do grau que um material pode ser magnetizado em relação ao campo magnético aplicado. Para o vácuo a susceptibilidade χ_m é nula ($\chi_{m0}=0$). A relação entre intensidade de campo magnético H e magnetização M é, então, a susceptibilidade magnética do material, dada pela relação (2).

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (2)$$

A permeabilidade de um material μ é dada pela soma dos efeitos da distribuição do fluxo magnético no vácuo e da susceptibilidade magnética do material, conforme a relação (3). A partir das relações 1, 2 e 3 pode-se obter a equação (4). A permeabilidade relativa ao vácuo de um material μ_r é dada pela relação (5).

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (4)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

Os materiais magnéticos podem ser classificados em cinco grupos distintos: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos possuem momentos magnéticos atômicos que se alinham paralelamente ao campo magnético aplicado, criando um campo magnético no interior do material muito superior ao aplicado. Estes materiais podem apresentar permeabilidade relativa muito superior à unidade. Porém, acima de uma temperatura crítica, denominada temperatura de Curie, o material torna-se paramagnético. Podem ser citados como exemplos de materiais ferromagnéticos: o ferro, cobalto e níquel.

2.1.1. Domínios Magnéticos

Um domínio magnético é uma região do cristal na qual todos os vetores momento de dipolo magnético de seus átomos estão alinhados segundo uma direção preferencial, formando um vetor de magnetização nesta direção. Os domínios magnéticos são delimitados pelas paredes de domínio. As paredes dos domínios são interfaces entre as regiões, as quais são espontaneamente magnetizadas, resultando diferentes direções de magnetização. O processo de magnetização do material é realizado pela movimentação destes domínios e pela rotação dos momentos magnéticos. Idealmente, a saturação do material é atingida quando os “spins” do material estão alinhados em uma mesma direção, tendo um só sentido para os vetores de magnetização de cada domínio.

2.1.2. Anisotropia Magnética

A anisotropia magnética é um dos fenômenos mais importantes para melhorar o desempenho dos materiais. As curvas de magnetização mudam consideravelmente segundo a direção do campo magnético aplicado. A magnetização espontânea em um material ferromagnético não é arbitrária. O forte campo molecular origina uma interação de troca direta entre spins de átomos vizinhos que os orientam paralelamente no grão magnético. A simetria da estrutura da rede cristalina, entretanto, afeta os processos de troca, fazendo com que existam determinados eixos preferenciais de magnetização, originando assim, uma anisotropia magnetocristalina. Esta preferência na orientação dos momentos magnéticos está associada a uma energia de anisotropia magnetocristalina, a qual é mínima quando os momentos magnéticos estão orientados ao longo dos eixos, os quais são denominados de eixos de fácil magnetização.

2.1.3. Magnetostricção

Magnetostricção é um fenômeno reversível, caracterizado pela deformação elástica de um material magnético quando seu estado magnético é alterado. Alguns materiais, como o níquel e o cobalto, se contraem na direção de magnetização, enquanto outros se expandem.

O estudo e a determinação da magnetostricção nos materiais magnéticos são importantes, pois em muitos equipamentos eletroeletrônicos, quando os núcleos de indutores, sensores e transformadores são submetidos a campos magnéticos variantes, as alterações dimensionais do material magnético resultam em ruído audível.

Quando submetidos a campos magnéticos alternados, a variação dimensional do material magnético ocorre durante cada semiciclo e, dessa forma, a frequência básica do ruído produzido pela magnetostrição e, normalmente, duas vezes o da frequência da fonte de alimentação elétrica [19].

2.2. Laço B versus H

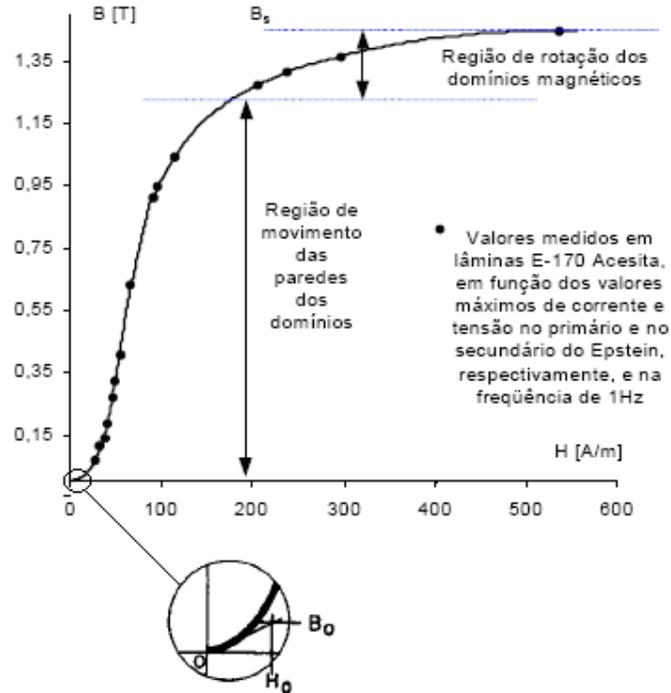
O processo de magnetização de um material ferromagnético sob a influência de um campo externo se reduz a:

- Crescimento dos domínios magnéticos cujos momentos magnéticos formam o menor ângulo com a direção do campo,
- Rotação dos momentos magnéticos na direção do campo externo.

Na Figura 1 esses dois fenômenos podem ser observados. Na região de permeabilidade magnética inicial (μ_i), região em destaque na Figura 1, o processo de magnetização é caracterizado pelo deslocamento reversível das paredes de domínios de suas posições de equilíbrio. Com o aumento posterior do campo magnético, ocorre uma forte magnetização do material devido ao deslocamento irreversível das paredes de domínios. A saturação magnética é alcançada quando acaba o processo de crescimento dos domínios e os momentos magnéticos de todas as regiões imantadas espontaneamente estão na mesma direção do campo.

O processo de magnetização de um material ferromagnético é caracterizado por suas curvas de magnetização B versus H . Sua obtenção é feita da seguinte forma: para um material inicialmente não magnetizado, ao aumentar progressivamente a força magnetizante de 0 até H_{max} , obtém-se o ramo 0-a da Figura 2. Reduzindo-se em seguida H de H_{max} até zero, encontra-se o ramo a-b. Para reduzir B a zero é necessário aumentar H em sentido contrário até c, obtendo-se o ramo b-c da curva. Continuando-se a fazer variar H até $-H_{max}$ tem-se o ramo c-d. Fazendo-se variar H de $-H_{max}$ até zero, em seguida até H_{max} e continuando deste modo, obtém-se sucessivamente os pontos e- f - a- b - c - d - e.

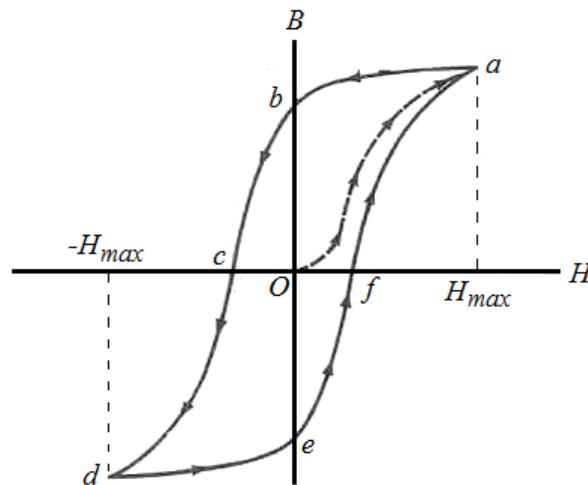
Figura 1 - Regiões da Curva de Magnetização.



Fonte: BATISTELA, 2001 [20].

Repetindo-se a operação descrita (variação de H entre H_{max} e $-H_{max}$), obtém-se uma curva fechada que se repete, o material terá então atingido o estado de magnetização cíclica simétrica (curva abcdefa na Figura 2). A esta curva fechada, obtida quando o material se acha em estado de magnetização cíclica, dá-se o nome de laço B versus H .

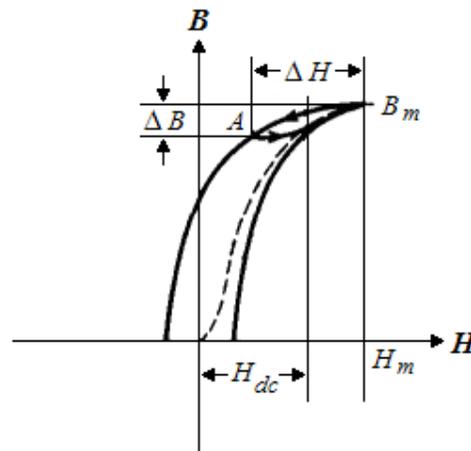
Figura 2 – Laço B versus H .



Fonte: PINHO, 2009 [21] "Adaptado pelo autor".

Caso o material ferromagnético sob ensaio seja submetido a um campo magnético AC com um componente contínuo (CC), ocorre o aparecimento de laços menores, A-B_m, conforme mostrado na Figura 3. Assim, a permeabilidade incremental, μ_{Δ} , pode ser definida como sendo a relação entre a variação de densidade de fluxo magnético do laço menor (ΔB) e a variação do campo magnético do laço menor (ΔH), de acordo com a expressão 6 [22].

Figura 3 – Laços menores e permeabilidade incremental.



Fonte: LEE, 1955 [23].

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (6)$$

Entre os modelos de histerese escalar destacam-se os modelos de Preisach e Jiles-Atherton.

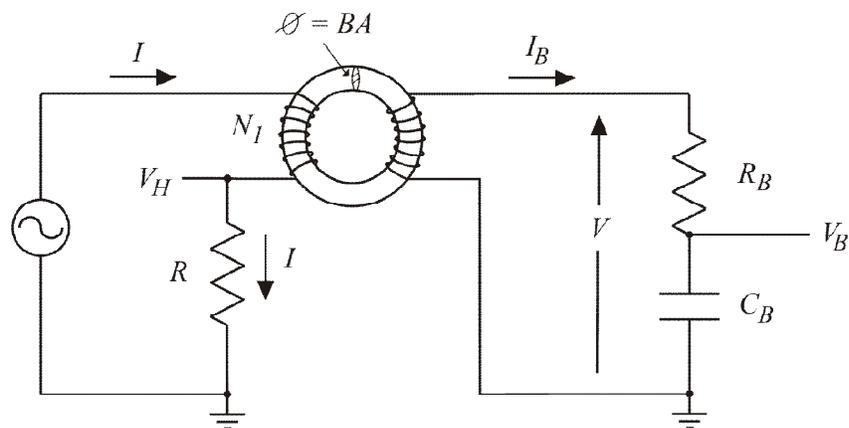
No modelo de Preisach, o material é subdividido em domínios elementares. O comportamento magnético de cada domínio é definido por um ciclo retangular. Cada domínio pode ocupar um dos dois estados magnéticos $+M_s$ ou $-M_s$, sendo M_s a magnetização na saturação do material. A mudança de estado corresponde ao campo coercivo local direto ou inverso. A distribuição e a largura dos domínios determinam a probabilidade de uma variação de estado. Essa função é geralmente uma Gaussiana relacionando o campo coercivo à magnetização de saturação. Ela permite traçar o ciclo de histerese estático na indução máxima de operação e, assim, pode-se deduzir a área correspondente às perdas no ferro pelo fenômeno de histerese [24].

O modelo de Jiles e Atherton é baseado nas ideias sobre Ferromagnetismo de Maxwell (iteração mútua entre momentos magnéticos), de Weber, de Weidemann (dipolos magnéticos moleculares), de Ewing (iteração mútua entre momentos magnéticos), de Langevin (teoria matemática do Paramagnetismo), de Weiss (iteração entre os domínios magnéticos e no conceito de indução efetiva magnética no fenômeno ferromagnético). A argumentação física para o modelo provém principalmente dos trabalhos de Kersten, Becker e Doring na interpretação da mudança de magnetização do material em termos da movimentação das paredes dos domínios [25].

2.2.1. Determinação Experimental do Laço B versus H

As características magnéticas, tais quais: permeabilidade magnética relativa, densidade de fluxo de saturação e densidade de fluxo remanescente são obtidas a partir do laço B versus H . Uma possibilidade para a determinação experimental do laço B versus H do material magnético de um núcleo toroidal é a utilização do circuito apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Circuito para determinação do laço B versus H .



Fonte: Produzida pelo autor.

De acordo com a lei circuital de Ampère, a integral de linha de H em qualquer percurso fechado é igual ao somatório dos ampère-espiras enlaçados pelo percurso, ou seja, ao somatório das forças magnetomotrizes [26],

$$\oint H \cdot dl = \Sigma NI . \quad (7)$$

No caso de um núcleo toroidal com N espiras, tem-se:

$$\oint H \cdot dl = H 2\pi r = NI, \quad (8)$$

$$H = \left[\frac{N_1}{2\pi r} \right] I. \quad (9)$$

Analisando-se a expressão 9 pode-se observar que o campo magnético é diretamente proporcional à corrente que circula pelas espiras N_1 do toroide. No circuito apresentado na Figura 4, a corrente de magnetização (I) pode ser obtida medindo-se a queda de tensão V_H sobre o resistor R , colocado em série com o enrolamento primário do TC, tendo por base a relação $I = V_H/R$. Neste caso, o campo H será dado por:

$$H = \left[\frac{N_1}{2\pi r} \right] \frac{V_H}{R} = \left[\frac{N_1}{2\pi r R} \right] V_H. \quad (10)$$

Segundo a lei de Faraday, um campo magnético variável produz uma força eletromotriz. O cálculo da força eletromotriz no enrolamento secundário é estabelecido pela expressão 11.

$$fem = N_2 \frac{d\phi}{dt}, \quad (11)$$

na qual, o fluxo magnético é dado por:

$$\phi = B.A. \quad (12)$$

Na Figura 4, o núcleo do TC tem formato toroidal. Na relação 12 a área de sua seção transversal será representada por A .

Substituindo a relação 12 na equação 11 e no circuito da Figura 4 $|Z_B| \rightarrow \infty$:

$$V \approx fem = N_2 A \frac{dB}{dt}. \quad (13)$$

Observa-se que, considerando um $R_B \gg X_{C_b}$ tem-se a tensão V sendo dada por:

$$V = I_B R_B. \quad (14)$$

Substituindo 13 e 14 na expressão da tensão no capacitor C_B , é obtida a relação 15.

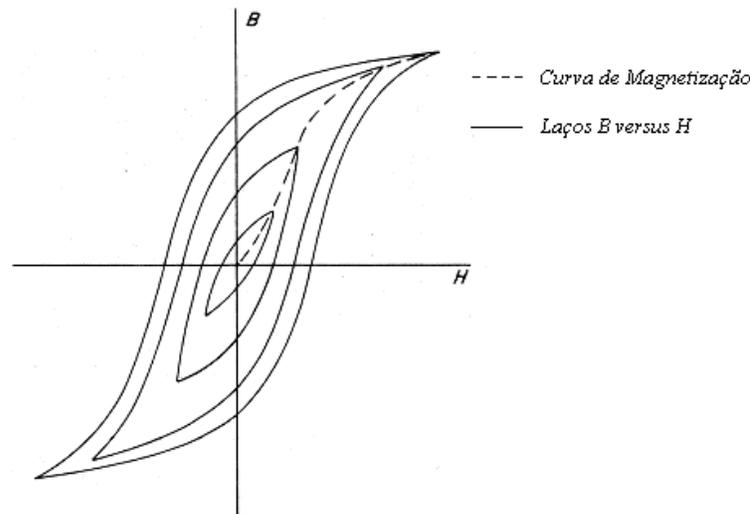
$$V_B = \frac{1}{C_B} \int I_B dt = \frac{1}{R_B C_B} \int V dt = \frac{N_2 A}{R_B C_B} \int \frac{dB}{dt} dt = \left[\frac{N_2 A}{R_B C_B} \right] B. \quad (15)$$

As expressões 10 e 15 fornecem, respectivamente, as relações entre o campo magnético H com a queda de tensão V_H no resistor R e da densidade de fluxo magnético B com a queda de tensão no capacitor C_B . Ambas as tensões podem ser medidas usando instrumentos digitais.

Portanto, pode-se obter o laço B versus H em função de V_B versus V_H , pois os valores correspondentes de B e H são obtidos apenas pela multiplicação de constantes.

O circuito apresentado na Figura 4 também pode ser usado para a determinação da permeabilidade magnética relativa do material magnético sob ensaio, ao longo da curva de magnetização. Para isso é necessário desmagnetizar o núcleo e variar o valor da corrente I a partir do zero, fazendo surgir vários laços B versus H , como é mostrada na Figura 5. A ligação das extremidades dos laços B versus H , mostrada como uma linha pontilhada na Figura 5, é chamada curva de magnetização.

Figura 5 – Determinação da curva de magnetização.



Fonte: LANDGRAF, 1997 [27].

Conforme pode ser observado na Figura 5, a permeabilidade do material magnético varia ao longo da curva de magnetização inicial. No início do processo de magnetização, o valor da permeabilidade magnética é baixo e vai aumentando na medida em que se aproxima do joelho da curva de magnetização, ponto em que a permeabilidade magnética

do material é máxima. A partir deste ponto, o valor da permeabilidade magnética diminui, pois o material começa a atingir a sua saturação magnética.

Pode-se obter o laço λ versus i_0 a partir de um laço B versus H . Para tanto, utiliza-se as equações 16 e 17.

$$\lambda = N_2 AB \quad (16)$$

$$i_0 = \frac{l_e H}{N_2} \quad (17)$$

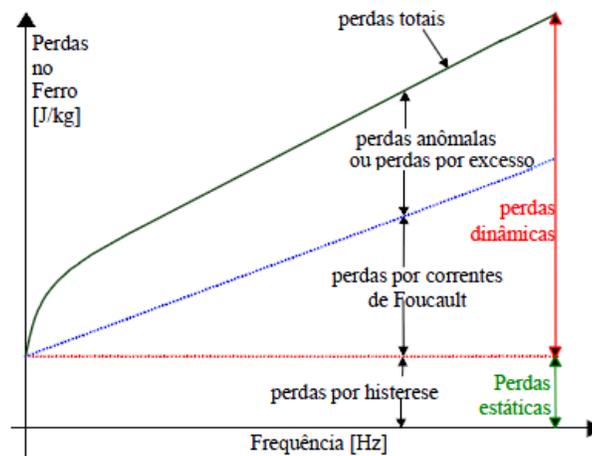
2.3. Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas em um núcleo ferromagnético podem ser divididas em três componentes, de acordo com a expressão 18 [28,29,30]:

$$P_{total} = P_{hist} + P_{parasita} + P_{adic} \quad (18)$$

- Perdas por histerese: correspondem à área interna do laço B versus H para cada ciclo do fluxo magnético alternado quando a frequência tende a zero. Em campos magnéticos alternados admite-se que a perda por histerese é independente da frequência;
- Perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault): resultam da circulação de correntes induzidas (Lei de Lenz) no material magnético quando a densidade de fluxo magnético se altera;
- Perdas adicionais ou anômalas: é a parcela de perdas resultante da subtração das perdas totais com as perdas por histerese e as perdas por corrente parasita.

Figura 6 - Influência da frequência do campo magnético aplicado sobre as perdas magnéticas.



Fonte: BATISTELA, 2001 [20].

Na Figura 6 pode-se observar a influência da frequência do campo magnético aplicado sobre as perdas magnéticas no material.

2.3.1. Perdas Histeréticas

As perdas por histerese são atribuídas às descontinuidades elementares das paredes dos domínios magnéticos, ou seja, à própria existência dos domínios magnéticos. Essas descontinuidades são influenciadas pelos parâmetros microestruturais do material, tais como as inclusões não magnéticas (impurezas), as pressões internas, os tamanhos e as ligações dos grãos e todas as imperfeições térmicas e mecânicas.

O campo magnético coercivo H_c é o valor (com direção e sentido no caso de uma abordagem vetorial) necessário para vencer a magnetização espontânea e/ou previamente magnetizada da região em questão. Assim, a modelagem das perdas por histerese pode ser obtidas a partir do campo coercivo global, o qual representa a média estatística dos campo coercivos locais, dado pela relação 19, formulada por Herpin [20].

$$H_c = \sqrt{\bar{H}_{ci}^2} \quad (19)$$

Neel e Kartens propuseram modelos para o campo coercitivo que levam em consideração a fadiga do material e a movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Guillaud foi o primeiro autor a correlacionar o campo coercivo ao tamanho dos grãos. Utilizando o material de MnBi (Manganês - Bismuto), ele obteve uma função entre H_c e o inverso do tamanho dos grãos. Bertotti [31] propôs, a partir de resultados experimentais, uma formulação empírica para H_c em função do diâmetro médio dos grãos ($\langle s \rangle$), dada pela equação 20. As constantes H_0 e A^{cte} expressam, respectivamente, o efeito das impurezas e da textura (ligação dos grãos). O efeito do tamanho dos grãos é, em parte, análogo ao das impurezas: os grãos mais finos implicam uma multiplicação das ligações, o que intensifica a amarração das paredes e, portanto, aumentam o H_c .

$$H_c = H_0 + \frac{A^{cte}}{\sqrt{\langle s \rangle}} \quad (20)$$

As perdas por histerese são independentes da frequência e relacionadas unicamente ao valor máximo da indução de operação.

Um dos métodos mais utilizados no cálculo da perda devido ao fenômeno de histerese é a fórmula empírica, equação (21), encontrada por Steinmetz em 1892 [32], para regimes senoidais. A constante η_{st} , chamada de coeficiente de Steinmetz, depende do

material e do sistema de unidades utilizado, e o expoente α_{st} , chamado de expoente de Steinmetz, depende apenas do material.

$$W_h = \eta_{st} (B_m)^{\alpha_{st}} \quad (21)$$

Quando a frequência do campo magnético aplicado tende a zero, as correntes induzidas no material são desprezíveis, desse modo, o laço B versus H pode ser denominado de laço de histerese estática.

2.3.2. Perdas por Correntes de Foucault

As perdas magnéticas por Correntes de Foucault são consequências das correntes induzidas no núcleo ferromagnético, quando este é percorrido por um fluxo variável no tempo (Lei de Ampère). A tendência do caminho da corrente visto em uma seção transversal é a formação de anéis de correntes induzidas perpendiculares à direção do fluxo. Por isso, lamina-se o material ferromagnético a fim de dificultar a formação das indesejáveis correntes parasitas. Outro fator que dificulta a geração de valores relevantes de correntes parasitas é aumentar a resistividade elétrica do material, pode-se nesse caso incluir o silício (ou outros materiais adequados) na composição do material magnético. Mesmo assim, com o processo de laminação e inclusão de substâncias de alta resistividade elétrica no material magnético, o fenômeno das correntes induzidas produzem perdas significativas por efeito “Joule”.

A energia dissipada por efeito Joule provocada pelas correntes induzidas no material é diretamente proporcional à condutividade elétrica do material σ (Ωm)⁻¹, ao quadrado da espessura da lâmina d (m) e ao quadrado da variação da indução no tempo, e inversamente proporcional à massa específica, equação 22. Para reduzir as correntes por Foucault pode-se utilizar o processo de laminação do núcleo ferromagnético e aumentar a resistividade elétrica do material [20].

$$W_f = \frac{\sigma d^2}{12 f m_v T} \int_0^T \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 dt. \quad (22)$$

2.4. Materiais Magneticamente Moles

Os materiais magneticamente moles recebem essa denominação por serem facilmente magnetizados e desmagnetizados, requerendo para isso baixas intensidades de campo magnético. Nesses materiais, a curva B - H é estreita, apresentando uma força coerciva de valor relativamente baixo e pequenas perdas magnéticas.

2.4.1. Ferrites

Existem dois tipos básicos de ferrites: os ferrites moles e os ferrites duros (ímãs permanentes). Os ferrites moles são derivados do óxido de ferro, ao qual são adicionados metais como o níquel, zinco e manganês.

Na obtenção do ferrite os elementos químicos constituintes são reduzidos a pó, prensados e aquecidos, de forma a gerar uma estrutura cristalina, que fornece aos núcleos as suas propriedades físicas e eletromagnéticas.

Os ferrites moles de MnZn (manganês – zinco) possuem, tipicamente, alta permeabilidade e baixas correntes parasitas. Já os ferrites de NiZn (níquel – zinco) possuem permeabilidades mais baixas e resistividade elevada, o que resulta em correntes parasitas extremamente reduzidas.

2.4.2. Ligas de Ferro-Silício

Nos materiais metálicos os átomos estão dispostos num arranjo geométrico bem definido, denominado de estrutura cristalina. Os materiais cristalinos são caracterizados por apresentarem um agrupamento ordenado de seus átomos, íons ou moléculas, que se repete nas três dimensões. A estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) é representada por um átomo em cada vértice de um cubo e um átomo no centro do mesmo.

A estrutura cristalina pode possuir ou não uma direção preferencial para a passagem do fluxo magnético, quando ocorre uma direção preferencial (anisotropia magnética) o material é constituído por grãos orientados (GO). Se a estrutura cristalina não possui orientação definida, o que proporciona uma facilidade da passagem do fluxo em qualquer direção (material isotrópico), o material é composto de grãos não orientados (GNO).

As ligas de Ferro-Silício podem conter até 6,5% de silício e algumas impurezas (carbono, enxofre, fósforo, manganês) associadas ao ferro, que é o principal constituinte. Suas propriedades magnéticas e sua resistividade dependem da constituição e dos tratamentos térmicos. A adição de silício ao ferro permite aumentar a resistividade, reduzir as perdas de histerese e o envelhecimento. Estas ligas são geralmente fabricadas sob a forma de tiras ou chapas. O percentual de silício depende da aplicação, já que a presença do silício tem o inconveniente de torná-lo quebradiço, sendo este o fato que limita a percentagem de silício empregada. Uma das ligas mais utilizadas comercialmente, conhecida pelo nome de hypersil, possui 3% de Si. Com processamento adequado, na

laminação e no tratamento térmico, são produzidas chapas com propriedades magnéticas melhores segundo uma direção preferida, cuja permeabilidade magnética nessa direção pode ser cerca de duas vezes maior que nas chapas de tipo clássico, e as perdas no ferro muito menores [33].

2.4.3. Ligas Amorfas

As estruturas amorfas, assim como as estruturas vítreas, são formadas por arranjos atômicos aleatórios e sem simetria ou ordenação de longo alcance. Embora a estrutura dos metais vítreos seja semelhante a dos vidros tradicionais, eles possuem características bem diferentes. Os metais vítreos são constituídos por elementos metálicos, ligados entre si por ligações metálicas, apresentam alta condutividade elétrica e térmica, são dúcteis, não são frágeis, possuem facilidade de magnetização, elevada dureza, alta tenacidade, resistência à corrosão e expansão térmica reduzida. Como propriedade mecânica, possui uma elevada resistência mecânica, podendo ser usado como elemento de reforço em concreto, borracha, plástico.

Com relação às propriedades químicas, vale ressaltar que a isenção de defeitos estruturais, como contorno de grão, precipitados, discordâncias e segregações, resultam em um material com comportamento químico bem diferente em relação aos metais cristalinos. Quando constituídos por elementos, como o cromo, os metais vítreos apresentam resistência à corrosão. Como decorrências dessas propriedades, seguem-se algumas aplicações: laminas de barbear, bio-implante, eletrodos para células eletrolíticas e vasos de reatores químicos [2].

A resistividade elétrica de um material está relacionada com a desordem de seus átomos, por esse motivo as estruturas vítreas possuem comparadas com as estruturas cristalinas elevadas resistências elétricas, variando entre 80 e 420 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, e dependem pouco da temperatura. Portanto, os metais amorfos possuem um baixo coeficiente de variação entre resistência elétrica e temperatura, podendo ser usado como resistências de precisão e como sensores de campos magnéticos. Como os metais amorfos possuem alta permeabilidade magnética e elevada resistividade elétrica em comparação com os metais cristalinos, eles podem ser usados na fabricação de núcleo de transformadores, cabeçotes de gravadores e transdutores magnéticos [2].

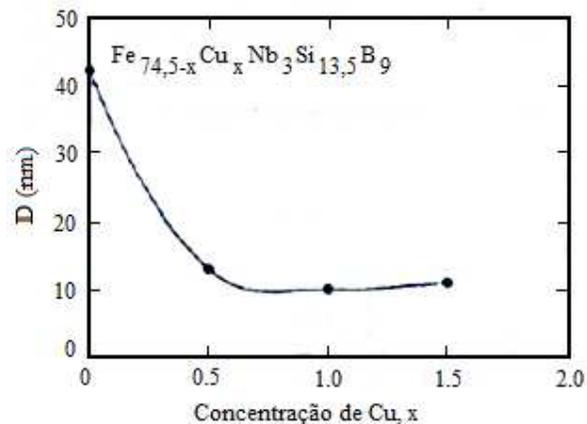
2.4.4. Ligas Nanocristalinas

As estruturas nanocristalinas são obtidas quando o tamanho do grão é reduzido a uma escala nanométrica. O interesse pelas pesquisas das ligas nanocristalinas se deve as suas características magnéticas, dentre elas: alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coerciva e baixas perdas por histerese. A redução dos grãos à escala nanométricas é o ponto chave para as características dos materiais magneticamente moles nas ligas nanocristalinas [2].

A concentração dos elementos constituintes de uma liga nanocristalina afetam as suas propriedades. A adição de Cu diminui o diâmetro do grão na fase ccc de Fe-Si, chegando o mesmo a atingir cerca de 10 nm para uma concentração de 1% de Cu na liga. A permeabilidade relativa (μ_r) também é afetada com a adição de Cu, neste caso com o aumento da sua concentração, a permeabilidade aumenta [2].

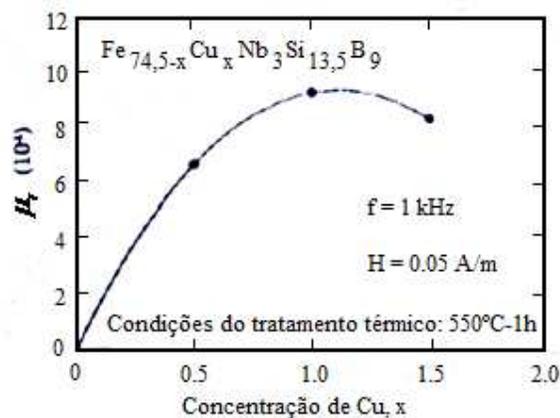
Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as relações do diâmetro e μ_r com a concentração de Cu.

Figura 7 - Relação do diâmetro com a concentração de Cu.



Fonte: YOSHIZAWA, 1999 [2].

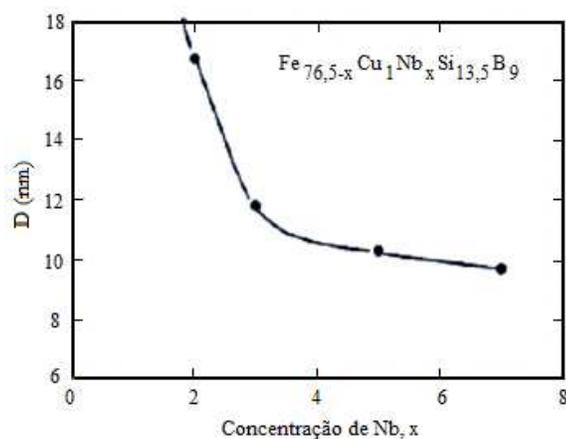
Figura 8 – Relação do μ_r com a concentração de Cu.



Fonte: YOSHIZAWA, 1999 [2].

A dependência do tamanho do grão na fase ccc também está ligada à adição de Nb na liga. Com o aumento da concentração de Nb, o diâmetro diminui, conforme pode se depreender a partir da Figura 9. A adição combinada de Cu e Nb é importante para a obtenção de uma liga homogênea e de grãos ultrafinos [2].

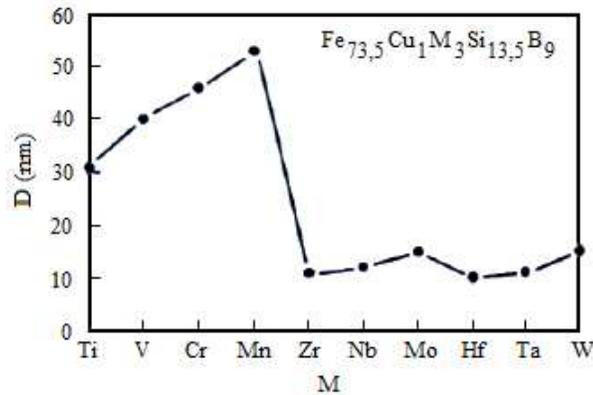
Figura 9 – Relação do diâmetro com a concentração de Nb.



Fonte: YOSHIZAWA, 1999 [2].

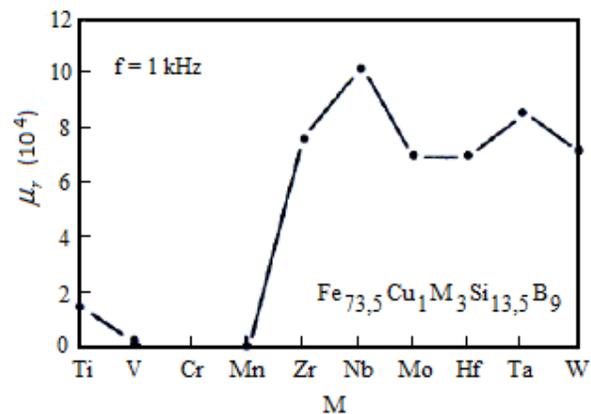
Nas Figuras 10 e 11 observam-se a dependência do diâmetro na fase ccc e o μ_r na liga $Fe_{73,5}Cu_1M_3Si_{13,5}B_9$ com relação ao M (M: Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W).

Figura 10 - Dependência do diâmetro na fase ccc da liga $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{M}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ com relação ao M (M: Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W).



Fonte: YOSHIZAWA, 1999 [2].

Figura 11 - Dependência da μ_r da liga $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{M}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ com relação ao M (M: Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W).



Fonte: YOSHIZAWA, 1999 [2].

Ligas nanocristalinas como as conhecidas comercialmente como FINEMET[®] e ligas do sistema Fe-Cu-Nb-Si-B apresentam ótimas propriedades magnéticas moles. Essas ligas são promissoras na miniaturização de dispositivos eletromagnéticos. A alta resistência mecânica das ligas nanocristalinas é explicada pelo fato de os nanogrãos barrarem a banda de deformação na matriz amorfa, já que o tamanho do grão é próximo ou menor que o tamanho da banda de deformação (10-20 nm). Já as excelentes propriedades magnéticas moles são atribuídas à supressão da anisotropia magnetocristalina, causada pela redução do tamanho de grão a nanocristais, com tamanho menor que as paredes dos domínios magnéticos, permitindo, assim, fácil reversão e magnetoestricção próxima de zero, atribuída à redistribuição de soluto da fase cristalina para a fase amorfa, além da elevada estabilidade térmica da matriz amorfa em uma ampla faixa de temperaturas [34].

Na Tabela 1 são apresentadas as características de algumas ligas nanocristalinas comparadas com ligas de FeSi e uma liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$.

Tabela 1 – Comparação das propriedades magnéticas de diversas ligas.

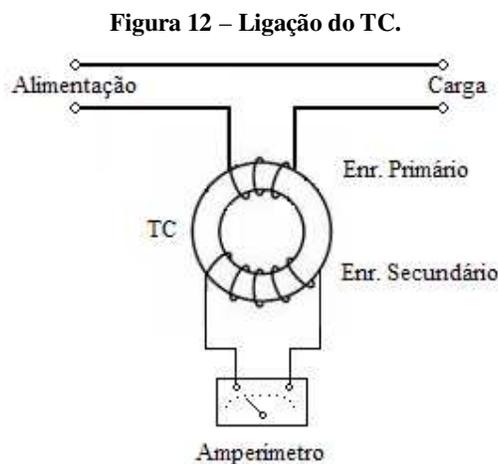
Composição	B (T)	H_c (A/m)	μ_e (1 kHz)	ρ ($\mu\Omega$ m)
$\text{Fe}_{85}\text{Si}_2\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ (Nanocristalina)	1,82	5,8	27000	0,736
$\text{Fe}_{93,5}\text{Si}_{1,1}\text{B}_{1,7}\text{P}_{2,4}\text{Cu}_{1,3}$ (Nanocristalina)				
$\text{Fe}_{86}\text{Si}_1\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ (Nanocristalina)	1,85	2,8	24000	0,670
$\text{Fe}_{94,1}\text{Si}_{0,6}\text{B}_{1,7}\text{P}_{2,4}\text{Cu}_{1,2}$ (Nanocristalina)				
$\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ (Nanocristalina)	1,23	0,5	150000	1,15
Fe3% Si de grãos não orientados	1,51	26	720	0,572
Fe3% Si de grãos orientados	1,92	7,8	6100	0,478
$\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ (Amorfa)	1,49	2,6	10600	1,35

Fonte: MAKINO *et al.*, 2011 [16].

De acordo com a Tabela 1, determinadas composições químicas das ligas nanocristalinas possuem densidade de saturação próxima da liga de FeSi com grãos orientados, no entanto, essas ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética relativa maior e menor força coerciva.

2.5. Transformadores de corrente

Os TC transformam correntes elevadas, que circulam no seu primário, em correntes de menor intensidade no secundário, segundo uma relação de transformação. Desse modo, conhecendo a relação de transformação do TC e conectando um amperímetro no enrolamento secundário, é possível obter a corrente que circula pelo enrolamento primário, conforme ilustrado na Figura 12.



Fonte: Produzida pelo autor.

A necessidade do conhecimento do comportamento dos transformadores ligados a instrumentos tornou-se evidente quando a literatura técnica começou a enfatizar os parâmetros principais que determinam a exatidão do transformador de corrente ou potencial, no que se refere à sua relação e ângulo de fase, principalmente nas medições de potência e energia. Nos anos de 1906 e 1908 é que os citados erros foram amplamente analisados para os transformadores de corrente. A conscientização da necessidade de especificações para transformadores de instrumentos fez com que 17 países, entre 1923 e 1958, elaborassem normas específicas. Porém, somente após 1958 é que se pode registrar que houve uma uniformização da utilização de normas para transformadores de instrumentos, como a norma 185 da entidade IEC no ano de 1966 para os transformadores de corrente [35]. As normas para os transformadores de corrente são: NBR-6821 (Método de ensaio), NBR-6856 (Especificação), IEC 60044-1 [36] e IEEE Std. C57.13.

2.5.1. Características Construtivas

Os TC podem ser de diversos tipos: barra, enrolado, janela, bucha, núcleo dividido, com vários enrolamentos, com vários núcleos secundários, derivação no secundário.

Transformadores de corrente destinados à baixa tensão normalmente têm o núcleo juntamente com os enrolamentos primário e secundário encapsulado em resina epóxi, submetida à polimerização, o que lhe proporciona endurecimento permanente, formando um sistema inteiramente compacto.

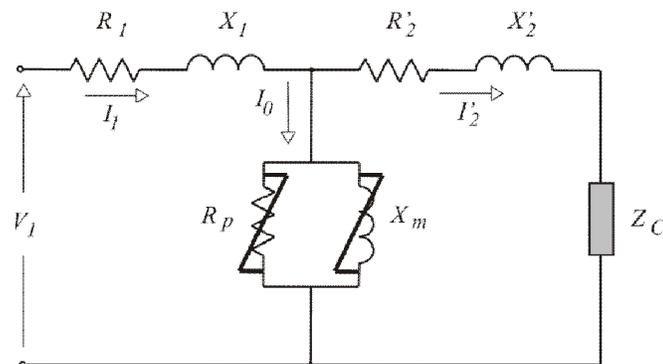
Transformadores de corrente de média tensão, semelhantemente aos de baixa tensão, são normalmente construídos em resina epóxi, quando destinados às instalações abrigadas. Também são encontrados TC para uso interno, construídos em tanque metálico com óleo mineral e provido de uma bucha de porcelana vitrificada 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.

Os TC destinados às aplicações em alta tensão são dotados de uma bucha de porcelana vitrificada com saias, comum aos terminais de entrada e saída da corrente primária e construídos em tanque metálico com óleo mineral. O enrolamento primário é envolvido por uma blindagem eletrostática, cuja finalidade é uniformizar o campo elétrico.

2.5.2. Características Elétricas

O circuito elétrico equivalente, refletido ao primário, para o TC é apresentado na Figura 13. As resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos primários e secundários são representadas por R_1 , X_1 , R'_2 e X'_2 , respectivamente. O ramo magnetizante está caracterizado pelos seus dois parâmetros, R_p o qual é responsável pelas perdas ôhmicas no núcleo e X_m , que representa a reatância de magnetização do núcleo. Z_C é a impedância do instrumento de medição, refletida ao primário do circuito elétrico equivalente.

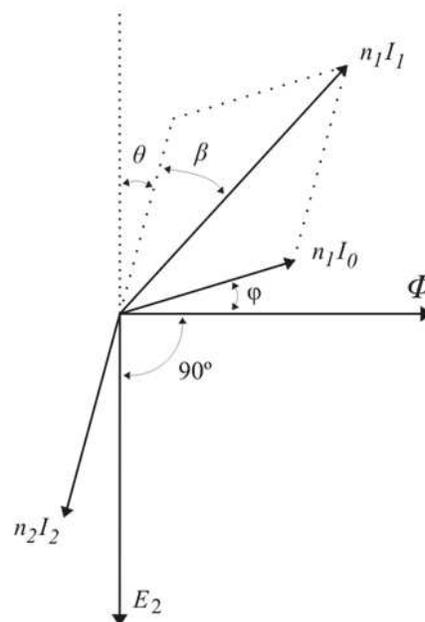
Figura 13 – Circuito elétrico equivalente de um transformador de corrente com todos os parâmetros refletidos ao primário.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 14 é apresentado o diagrama fasorial do TC.

Figura 14 – Diagrama fasorial do transformador de corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Observando-se o diagrama fasorial, verifica-se que a corrente no primário não é defasada de 180° em relação a corrente no secundário, condição que só seria satisfeita caso o TC fosse ideal. Os transformadores reais não representam a condição ideal por causa da presença da componente I_0 no ramo de magnetização.

A expressão 23 é obtida projetando-se os fasores sobre $n_1 I_1$,

$$n_1 I_1 = n_2 I_2 \cos \beta + n_1 I_0 \cos(90^\circ - \theta - \varphi - \beta), \quad (23)$$

ao se dividir ambos os lados na equação 23 por $n_1 I_2$ é obtida a expressão 24.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \cos \beta + \frac{I_0}{I_2} \text{sen}(\theta + \varphi + \beta). \quad (24)$$

Sendo β normalmente um ângulo muito pequeno (da ordem de um grau ou menos), a relação das correntes assume o valor aproximado mostrado na equação 25.

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{n_2}{n_1} \left[1 + \frac{I_0}{I_1} \text{sen}(\theta + \varphi) \right]. \quad (25)$$

A relação de espiras n_2/n_1 pode ser considerada como a relação aproximada do TC. Para se aproximar do caso ideal é desejável ter-se I_0 tão pequeno quanto possível. Isso requer que o material empregado para o núcleo seja de alta permeabilidade e que a densidade de fluxo seja mantida baixa. O fator $\text{sen}(\theta + \varphi)$ depende do tipo de carga ligada ao secundário, sendo pequeno para cargas resistivas e maiores para as indutivas.

A carga secundária equivale à impedância conectada aos terminais do enrolamento secundário do TC, todos os dispositivos, tais como amperímetros, wattímetros, medidores de fator de potência, relés de proteção representam, cada um, certa impedância para o TC. Pode-se também, acrescentar à carga secundária a impedância dos cabos que conectam o TC aos instrumentos de medição e relés. Os dados dos fabricantes geralmente incluem a carga de cada dispositivo a ser ligado no circuito do TC.

O ângulo φ , que é o ângulo de fase entre o fluxo e a corrente de excitação, depende do material do núcleo, sendo pequeno para materiais que têm pequenas perdas magnéticas.

2.5.3. Erros de Relação e Ângulo de Fase

Os transformadores de corrente podem ser caracterizados pela relação de transformação nominal e real. A relação nominal exprime o valor da relação entre as

correntes primária e secundária para a qual o equipamento foi projetado, e é indicada pelo fabricante. A relação real exprime a relação entre as correntes primária e secundária que se obtém realizando medições em laboratório. Tal diferença entre as relações se devem à reatância de dispersão e à influência do material ferromagnético de que é constituído o núcleo do TC. A determinação do erro de relação e do erro de fase é particularmente importante quando se trata de TC destinados à medição para fins de faturamento.

Na equação 25 é mostrada que a relação real das correntes difere da relação de espiras, nominal, por uma quantidade que depende da razão I_0/I_1 e do ângulo de fase da carga. A razão I_0/I_1 varia com a corrente I_1 devido a não linearidade do material magnético do núcleo e da impedância da carga ligada ao secundário. Desse modo, é denominado erro de relação de um TC a diferença entre a relação de transformação real ou verdadeira e a relação de transformação nominal do TC. O fator de correção da relação, ou *FCR*, é o fator pelo qual a relação nominal deve ser multiplicada para ser obtida a relação verdadeira, conforme a expressão 26.

$$FCR = \frac{RELAÇÃO REAL}{RELAÇÃO NOMINAL}. \quad (26)$$

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 .

Os erros de relação e de ângulo de fase devem ser levados em consideração quando se deseja determinar a classe de exatidão do TC. O erro de relação é o único que importa no caso de o TC ser empregado para medições de corrente, sem fins de faturamento. Caso o TC seja empregado para medições de potência e energia, na qual o ângulo de fase é importante, a correção do ângulo de fase deverá ser feita se o desvio do ângulo tiver um efeito apreciável nas referidas medidas.

Deve-se alertar para o fato de que os transformadores de corrente com mais de uma derivação no enrolamento secundário têm a sua classe de exatidão relacionada com a sua operação na posição na qual há o maior número de espiras.

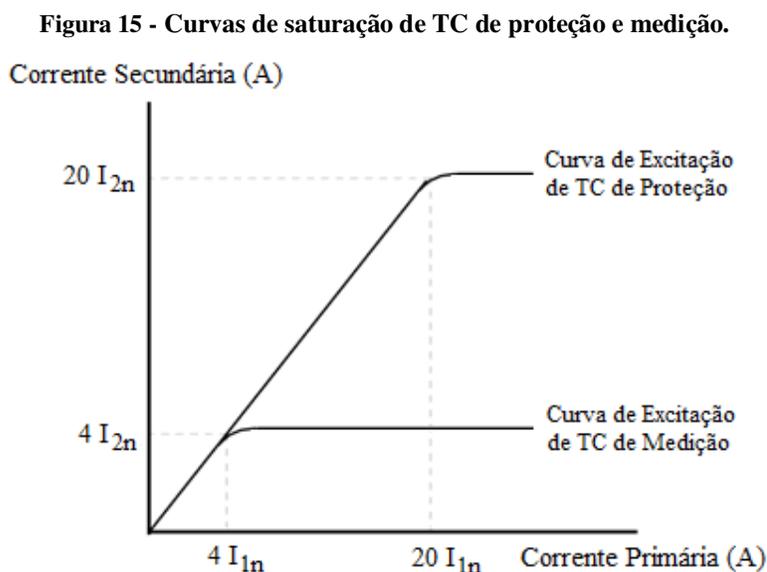
A redução do erro de um TC consiste na ideia de reduzir-se ao máximo a corrente de excitação. Um dos métodos utilizados para diminuir a corrente de excitação é manter a densidade de fluxo pequena, o que pode ser obtido pelo emprego de um núcleo de grande seção reta, ou com um grande número de espiras, ou por uma combinação dos dois. Outra possibilidade é o emprego de um núcleo magnético com alta permeabilidade magnética [5,7].

2.5.4. Classificação

Embora todos os TC tenham o mesmo princípio de funcionamento, há de se considerar as características de projeto que diferenciam os TC de proteção dos de medição. As diferenças básicas são:

- TC de medição se enquadra na classe de exatidão: 0,3; 0,6 e 1,2, determinadas de acordo com os paralelogramos de exatidão, onde são levados em conta os erros de relação e fase;
- TC de proteção se enquadra na classe de exatidão 2,5 e 10, e apenas o erro de relação é considerado. De acordo com a ABNT, 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 do mesmo e a qualquer carga igual ou inferior à nominal;

Na Figura 15 são apresentadas as curvas de saturação para os TC de proteção e medição.



Fonte: MEDEIROS, 1976 [8].

Os TC empregados na medição de corrente ou energia elétrica são equipamentos capazes de transformar as correntes elevadas, oriundas do sistema elétrico, segundo uma relação de transformação, propiciando o registro de valores pelos instrumentos medidores sem que estes estejam em ligação direta com o circuito primário da instalação.

Os transformadores de corrente destinados à proteção de sistemas elétricos são equipamentos capazes de transformar elevadas correntes de sobrecarga ou de curto-circuito em pequenas correntes, propiciando a operação de relés sem que estes estejam em ligação direta com o circuito primário da instalação.

Ao contrário dos TC para medição, os TC para serviço de proteção não devem saturar para correntes de elevado valor, tais como as que se desenvolvem durante a ocorrência de um defeito no sistema.

2.6. Saturação em TC

Quando o material magnético do núcleo do TC atinge a saturação, surgem dois problemas: erro elevado (superior à classe de exatidão) e distorção da forma de onda da corrente secundária.

A saturação no TC pode ser de dois tipos, a saturação por corrente alternada CA e a por corrente contínua CC. A saturação por CA acontece quando a componente fundamental da corrente primária é de intensidade superior ao fator de sobrecarga vezes a corrente primária nominal. A saturação por corrente contínua ocorre pela componente CC da corrente primária (componente exponencial), comumente presente nos primeiros ciclos das correntes de curtos-circuitos. Esta componente estabelece um fluxo de polarização no núcleo do TC, sobre o qual as variações de fluxo da componente simétrica se sobrepõem, resultando em um valor muito elevado que provocará a saturação do TC.

2.6.1. Saturação por corrente alternada

Considerando que a saturação é uma função da tensão desenvolvida no enrolamento secundário, para uma determinada corrente secundária a tensão é função da impedância secundária, a qual, devido à saturação será função da corrente secundária. Por sua vez, a corrente secundária é função da corrente primária e da saturação do TC.

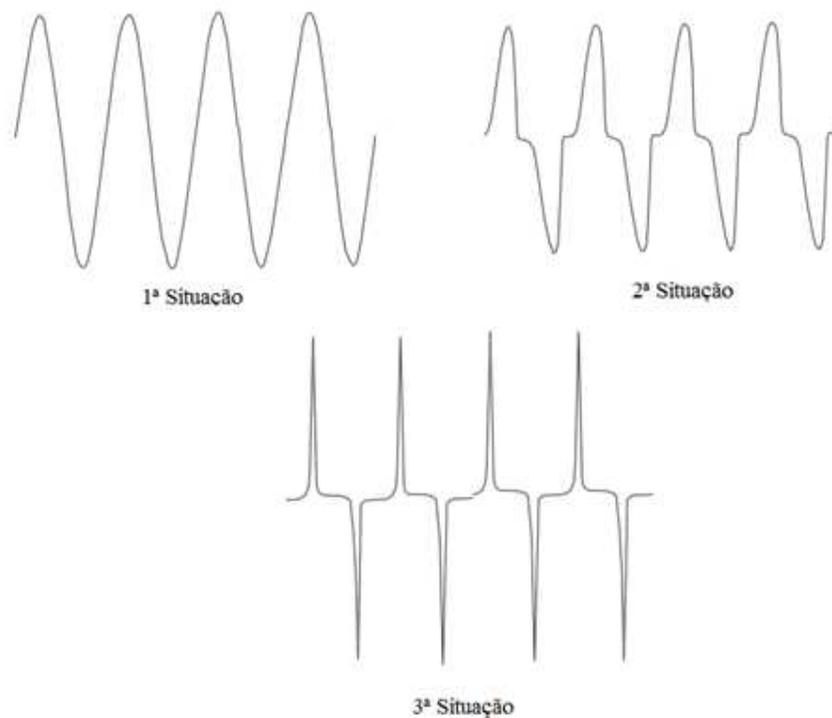
Na maioria dos casos, a impedância conectada ao enrolamento secundário não é facilmente definível como uma única impedância. Há geralmente mais do que um equipamento conectado ao secundário do TC, e diferentes correntes de fase primárias surgindo de faltas desbalanceadas tornam a determinação das correntes secundárias mais difíceis. Em tais casos, é necessário apelar para a característica de excitação secundária do TC. Em geral, os dados do fabricante incluem a curva característica de excitação secundária.

A impedância secundária do TC (resistência e reatância de dispersão) será aproximadamente igual à resistência do enrolamento secundário, em TC com enrolamento secundário totalmente distribuído, tal como ocorre nos TC tipo bucha, TC utilizados quando se trata da proteção de sistemas elétricos [37].

Um método para reduzir a saturação em corrente alternada é limitar a tensão terminal do secundário. Isto pode ser conseguido diminuindo a carga secundária. Quando a carga é excessiva resultando desempenho não satisfatório do TC, serve como solução o uso de dois conjuntos de TC e a distribuição da carga secundária entre os dois. Isto reduz a carga à metade e, em geral, reconduz o desempenho do TC a limites aceitáveis.

A influência da carga secundária na tensão no enrolamento secundário pode ser demonstrada na Figura 16.

Figura 16 – Típicas tensões secundárias de um TC com uma corrente primária senoidal constante e com o aumento da carga.



Fonte: BLACKBURN; DOMIN, 2006 [38].

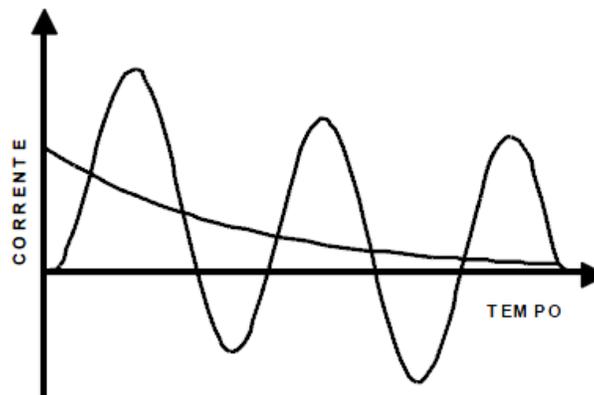
A corrente no primário é mantida constante, enquanto é variada a carga conectada ao secundário. Nessa figura existem três situações distintas, na primeira situação a carga está dentro dos limites aceitáveis e a tensão do secundário não é distorcida pela saturação. Na segunda situação a carga é aumentada, neste caso a tensão começa a sofrer alterações devido ao início da saturação do núcleo. Já na terceira situação o núcleo está totalmente saturado, sendo neste caso a tensão no enrolamento secundário totalmente distorcida.

2.6.2. Saturação por corrente contínua

A componente assimétrica das correntes de falta em sistemas de potência causa, em certas situações, algum grau de saturação nos transformadores de corrente. Após a ocorrência de saturação, a corrente que alimenta os relés de proteção mostrará evidências de distorção e o desempenho dos esquemas de proteção pode ser afetado. A distorção da corrente secundária que se obtém através do transformador de corrente começa sempre que a densidade de fluxo no núcleo entra na região de saturação.

Quando se tem uma corrente primária, com um deslocamento provocado pela presença de corrente contínua, como mostrado na Figura 17, ocorrerá um aumento do fluxo no núcleo muitas vezes maior do que o requerido para se transformar apenas a componente de 60 Hz da corrente.

Figura 17 - Corrente primária de falta.



Fonte: JÚNIOR, 2005 [39].

Na Figura 18 é exemplificado o aumento da densidade de fluxo no núcleo de um transformador de corrente, quando uma corrente deslocada pela componente contínua é aplicada a um transformador de corrente com uma carga secundária resistiva. A componente contínua da corrente introduz um fluxo contínuo no núcleo do transformador de corrente sobre o qual oscila o fluxo devido a componente alternada da corrente. Assim, uma corrente assimétrica exige uma maior corrente de excitação do que a curva de excitação secundária indicaria e, como resultado, a saída de um transformador de corrente na presença da componente contínua é menor do que a esperada. A saturação devido à componente contínua é especialmente importante porque em casos severos pode reduzir a saída de um transformador de corrente a quase zero para os primeiros ciclos da falta. A duração desta condição é determinada pela relação X/R do sistema.

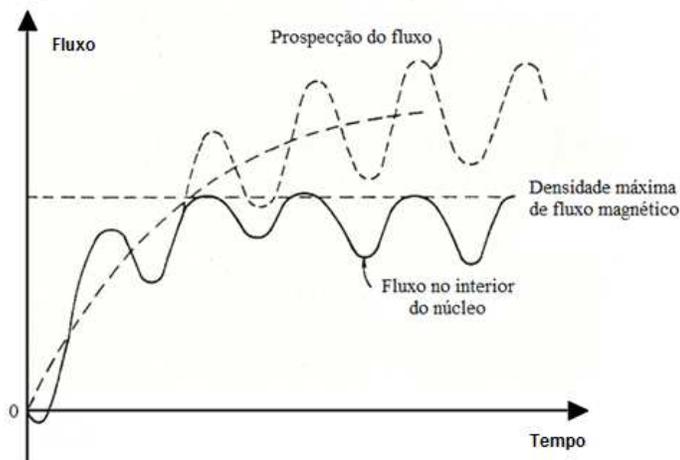
Figura 18 - Fluxo no núcleo.



Fonte: JÚNIOR, 2005 [39].

Na Figura 19 é apresentado um exemplo do comportamento do fluxo no interior do núcleo do TC, quando submetido a uma corrente primária com nível CC. Nesse caso, como o núcleo está saturado, o fluxo não ultrapassa o limite máximo do fluxo magnético, o qual é determinado pelas características magnéticas do material utilizado na confecção do núcleo.

Figura 19 – Efeito da densidade máxima de fluxo de saturação no fluxo do interior do núcleo do TC quando submetido a uma corrente primária com nível CC.



Fonte: ASHTON, 1975 [40].

A carga ligada ao TC tem um papel fundamental na distorção da forma de onda da corrente do enrolamento secundário. Caso a carga seja apenas resistiva, quanto maior for a resistência dessa carga, maior será a distorção da corrente secundária. No caso da carga do TC ser uma carga indutiva, resultaria uma saturação um pouco menos severa.

Durante a saturação do TC, a impedância vista por relés de distância ($Z=V/I$) pode ser maior do que o valor esperado, promovendo assim um problema de subbalcance neste tipo de proteção. No caso dos relés de sobrecorrente instantâneos, a saturação do TC pode fazer com que a corrente vista pelos relés seja inferior a real, implicando a não operação ou atraso no tempo de operação dos mesmos. Além disso, relés diferenciais podem operar erroneamente devido à saturação de um dos TC.

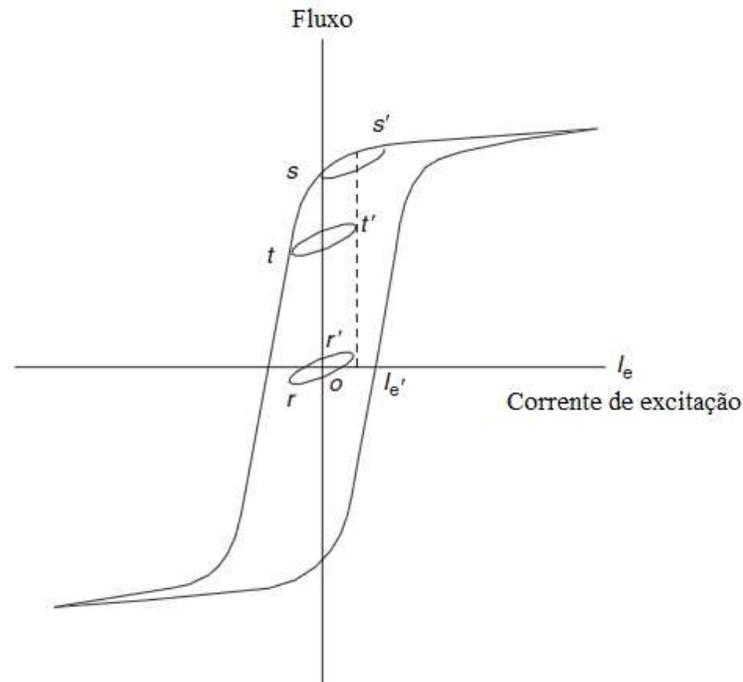
As principais causas da saturação dos TC são as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, o fluxo magnético remanescente no núcleo e a carga do TC. Um método de evitar a saturação em TC é aumentar a área da seção transversal do núcleo. Outro método é utilizar um material no núcleo com alta densidade de fluxo de saturação. Ambas as opções podem afetar o custo e a facilidade de aplicação desses equipamentos [41].

2.6.3. Fluxo Remanescente

No momento em que um transformador de corrente é energizado pela primeira vez, a excursão do laço de histerese é simétrica, como é apresentada na variação do fluxo rr' na Figura 20. Falhas no sistema elétrico produzem um acréscimo no fluxo e um aumento no laço de histerese. Quando a falta é eliminada e a corrente no primário torna-se zero, uma corrente unidirecional pode fluir no secundário.

A interrupção da falta e a queda da corrente de excitação à zero ainda deixa um fluxo no TC. Isto é o chamado fluxo remanescente (ou residual), tal como no ponto s da Figura 20. Agora, se o TC é reenergizado com a carga original, a excursão do laço de histerese será ss' . No entanto, o laço não pode continuar em ss' , porque isto exigiria uma corrente com componente CC para mantê-lo nesta posição de *offset* [42]. As oscilações de fluxo normais devido as correntes de carga tenderão a reduzir o fluxo remanescente até um ponto, tt' na Figura 20, que depende do material do núcleo e do menor laço BH em torno do qual a operação normal ocorre. Esta redução ocorrerá durante os vários segundos após a remoção da falta. O nível final deste fluxo remanescente pode ser muito maior do que as oscilações de fluxo que ocorrem devido às correntes normais de carga. Até que haja mudanças de carga ou que outra falha ocorra, o fluxo irá variar neste laço indefinidamente. Os laços representados pelas letras $s-s'$, $t-t'$ e $r-r'$ são denominados laços menores.

Figura 20 – Variação do fluxo no núcleo do TC depois da ocorrência de uma falta.

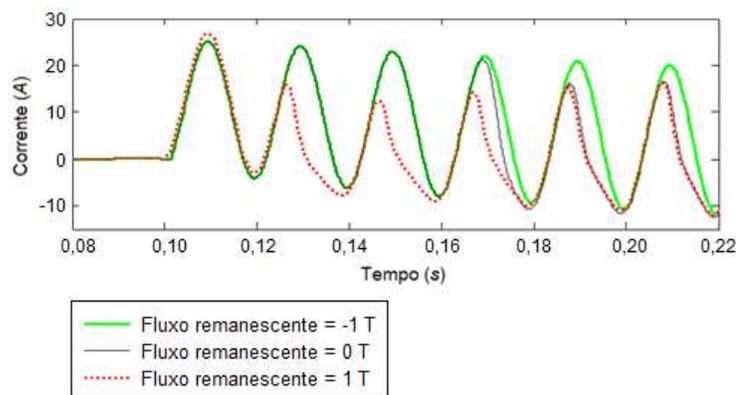


Fonte: BLACKBURN; DOMIN, 2006 [38].

O fluxo remanescente no núcleo do TC depende do valor de fluxo imediatamente antes da interrupção da corrente primária. O valor de fluxo é determinado pelo valor da corrente primária simétrica, da componente unidirecional e da impedância do circuito secundário. O máximo fluxo remanescente ocorre quando a corrente primária é interrompida enquanto o transformador encontra-se saturado. O fluxo remanescente no núcleo do TC irá se somar ou subtrair ao fluxo gerado pelas correntes que fluem através do terminal primário do TC, dependendo da polaridade desse fluxo gerado. Em alguns casos em que o fluxo residual é muito alto, o TC pode saturar logo após o início da falta. Uma tensão equivalente a 60% da tensão do ponto de joelho deve ser aplicada para reduzir o fluxo remanescente em menos de 10% da densidade de fluxo de saturação. O fluxo remanescente permanecerá no núcleo até que este seja desmagnetizado [43].

Na Figura 21 é apresentado um exemplo de como o fluxo residual pode afetar a saturação do núcleo. Se o fluxo gerado pela falta tiver a polaridade positiva, um fluxo remanescente positivo agrava a saturação do núcleo, como se pode perceber pela linha tracejada. No entanto, se o fluxo remanescente for negativo, como pode ser visto pela linha contínua mais espessa, o TC não entra em saturação, neste caso o fluxo remanescente impediu a saturação do núcleo.

Figura 21 - Corrente no secundário de um TC para diversos fluxos remanescentes.



Fonte: VIAWAN et al., 2009 [44].

A saturação causada pela componente CC do fluxo pode ser irrelevante em relação aos relés temporizados e aos relés digitais se o tempo de intervenção dos mesmos for tal que, no instante de atuação, a referida componente já se achar atenuada, o que não ocorre nos relés de atuação rápida.

2.7. Influência do Material Magnético nos Núcleos de TC

O material magnético utilizado em núcleos de transformadores de corrente, utilizados para fins de medição e proteção de sistemas elétricos, pode influenciar nas suas classes de exatidão e na saturação. Nos tópicos seguintes são apresentadas as influências das características magnéticas dos materiais magnéticos, empregados nos núcleos dos TC, nas condições normais de operação do sistema e quando ocorrem faltas simétricas e assimétricas na rede.

2.7.1. Condições Normais de Operação do Sistema

Nas condições normais de operação de um sistema elétrico, os transformadores de corrente operam sob condições de baixa indução magnética (cerca de 0,1 T), como decorrência do efeito desmagnetizante da corrente secundária. Portanto, na condição de operação citada a densidade de saturação de fluxo magnético não tem influência no funcionamento do TC.

Na operação normal do sistema o que realmente interessa é a permeabilidade magnética do material. Pois, a permeabilidade magnética elevada do material melhora as características de exatidão do TC.

A utilização de ligas nanocristalinas em substituição às ligas de FeSi, usualmente utilizadas núcleos de TC, diminuem os erros de fase, possibilitando o enquadramento em classes de exatidão menores.

No caso da utilização de ligas nanocristalinas em núcleos de TC para serviços de proteção, caso os erros de relação de fase se enquadrem nos paralelogramos de exatidão, surge a possibilidade da utilização de um transformador de corrente, o qual pode ser utilizado tanto para fins de medição como para fins de proteção.

2.7.2. Saturação do TC

A propriedade dos materiais magnéticos, utilizados nos núcleos dos TC para proteção, que minimizam os efeitos da saturação é a densidade de saturação de fluxo magnético. Quanto maior a densidade de saturação, maior a corrente no enrolamento primário necessária para saturar o TC. O material usualmente utilizado nos núcleos de TC para proteção é a liga de FeSi de grãos orientados, que possui densidade de saturação por volta de 2 T. Entretanto, algumas ligas nanocristalinas desenvolvidas recentemente possuem densidade de saturação entre 1,8 e 1,9 T [14,15,16,17,18,45], possibilitando a sua utilização em núcleos de TC para proteção.

O superdimensionamento do núcleo do TC pode ser uma solução para evitar a saturação, pois quanto maior a área da secção transversal do núcleo magnético, menor será o fluxo magnético para uma mesma corrente circulando no enrolamento primário. Porém, esta alternativa implica em aumento de custos.

2.7.3. Fluxo Remanescente

O fluxo magnético remanescente, B_r , é uma característica que pode potencializar o início da saturação no interior de um núcleo magnético. Geralmente há três grupos diferentes de TC:

- TC com alta remanência;
- TC com baixa remanência;
- TC sem nenhuma remanência.

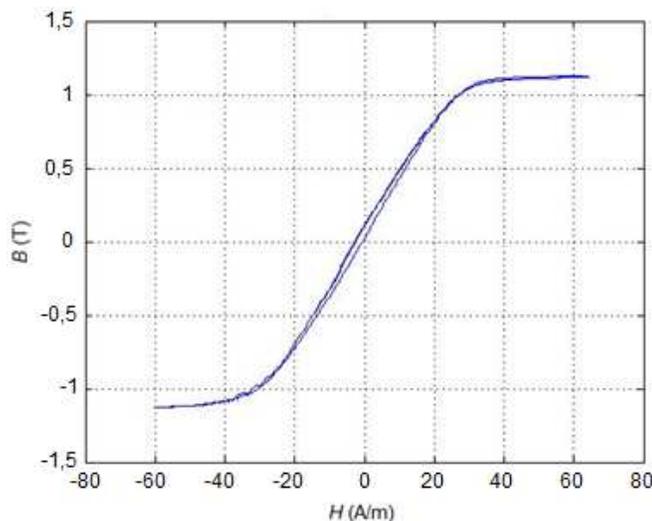
O TC do tipo alta remanência têm um núcleo magnético sem qualquer entreferro, o fluxo remanescente pode ser de 70-80% do fluxo de saturação.

Transformador de corrente do tipo baixa remanência têm um limite especificado para o fluxo remanescente. O TC é feito com um pequeno entreferro para reduzir o fluxo remanescente de forma que não exceda 10% do fluxo de saturação.

Transformadores de corrente do tipo sem remanência tem, praticamente, um nível de fluxo remanescente desprezível. O TC possui relativamente um grande entreferro de forma a reduzir a praticamente zero o nível de fluxo remanescente, minimizando a influência da componente CC das corrente primárias de falta. Os entreferros reduzirão, entretanto, a incerteza da medição na região não saturada de operação.

A liga nanocristalina de nome comercial NANOPERM[®] e referência M-033, possui uma densidade de saturação de 1,09 T, ensaios a 60 Hz. Porém, o fluxo remanescente da liga é baixo, como pode ser observado a partir da análise da Figura 22. Desse modo, com o superdimensionamento da área da seção transversal, a liga M-033 pode ser utilizada em núcleos de TC do tipo baixa remanência.

Figura 22 – Laço B versus H do Núcleo M-033 à 60Hz.

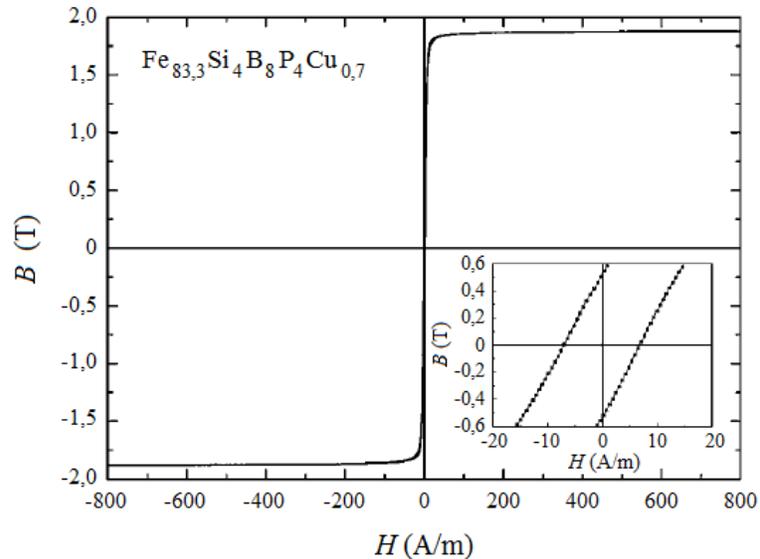


Fonte: Produzida pelo autor.

A liga nanocristalina de composição química $Fe_{83,3}Si_4B_8P_4Cu_{0,7}$, além de possuir permeabilidade magnética relativa de 25.000 (1 kHz) [46], apresenta duas vantagens que viabiliza sua utilização em núcleos de transformadores de corrente destinados a serviços de proteção, conforme pode ser observado na Figura 23:

- Alta densidade de fluxo de saturação (B_s): densidade em torno de 1,88 T;
- Baixa densidade de fluxo remanescente (B_r): densidade em torno de 0,5 T.

Figura 23 – Laço B versus H da liga nanocristalina de composição química: $\text{Fe}_{83,3}\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_{0,7}$, ensaios na frequência de 1 kHz



Fonte: MAKINO *et al.*, 2009 [46].

2.8. Influência da Carga Conectada ao Enrolamento Secundário de um TC

A carga de um TC equivale à impedância conectada aos terminais do enrolamento secundário do TC, todos os dispositivos, tais como amperímetros, wattímetros, medidores de fator de potência, relés de proteção representam, cada um, certa impedância para o TC. Pode-se também, incluir na carga secundária a impedância dos cabos que ligam o TC aos instrumentos de medição e relés.

Os wattímetros e os relés eletromecânicos têm uma impedância com composição predominantemente indutiva. Entretanto, os novos equipamentos digitais utilizados nas medições de corrente e fator de potência, os relés digitais, os IED, dentre outros, têm sua impedância representada praticamente por uma componente resistiva. Desse modo, torna-se importante a análise da influência do tipo de carga ligado ao enrolamento secundário nos erros dos TC.

Os relés digitais quando comparado com os relés eletromecânicos possuem uma impedância menor. A partir da análise da Tabela 2, pode-se observar a diferença entre as impedâncias dos relés eletromecânicos e os digitais. O menor *tap* de um relé eletromecânico é o que representa a maior impedância para o TC.

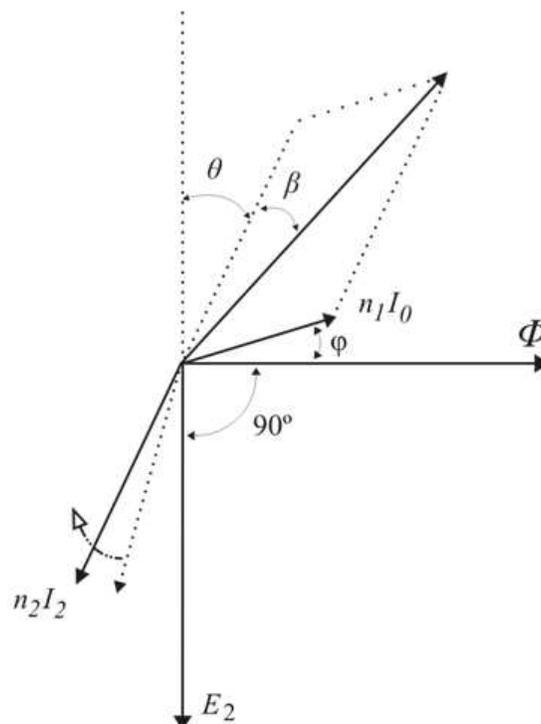
Tabela 2 - Impedâncias para os relés eletromecânicos e os relés digitais.

Relé Eletromecânico		
Modelo do Relé	Faixa de <i>taps</i> (A)	Impedância no menor <i>tap</i> (Ω)
IAC51A101A	4 – 16	0,35
IAC51A2A	1,5 – 6	2,4
IAC51A3A	0,5 – 2	22,00
ICM2	4 – 16	16,4
Relés Digitais		
Modelo do Relé	Carga (VA)	Impedância (Ω)
7SJ61/62/63	0,3	0,012
7SA6	0,3	0,012
P141, 142, 143	0,5	0,02
P433, P435, P437	0,1	0,004

Fonte: HOJO, 2005 [47].

Na Figura 14 foi apresentado o diagrama fasorial do TC. Já na Figura 24 é exemplificado o comportamento do diagrama fasorial quando se aumenta a componente indutiva da carga conectada ao secundário. Pode-se perceber que o erro de fase (β) diminui.

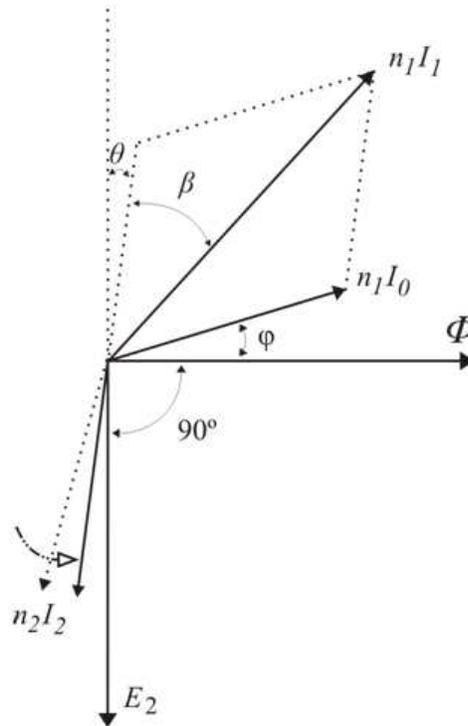
Figura 24 – Comportamento do diagrama fasorial de um TC com o aumento da componente indutiva da carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 25 é apresentado o comportamento do diagrama fasorial quando se aumenta a componente resistiva da carga conectada ao secundário. Pode-se perceber que o erro de fase (β) aumenta.

Figura 25 – Comportamento do diagrama fasorial de um TC com o aumento da componente resistiva da carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

2.9. Influência das Componentes Harmônicas no Erro de Fase de um TC

Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando o seu espectro contém apenas componentes de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal. Esse tipo de deformação periódica geralmente é imposta pela relação não-linear tensão/corrente característica de determinados componentes da rede, como por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outra causa de não-linearidades são as discontinuidades devido ao chaveamento, em retificadores controlados, controladores de tensão, fontes chaveadas.

Apesar de o Brasil não possuir norma própria sobre harmônicos, nos Procedimentos de Rede do ONS estão contidos os critérios de distribuição de energia que

englobam o nível máximo de distorção harmônica de tensão possível no sistema elétrico brasileiro.

Atualmente, os principais guias internacionais e as referências nacionais são:

- Guia IEEE Std 519 [48];
- Norma IEC 61000 [49];
- Procedimento de Rede – Submódulo 2.8 [50];
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST [51].

As componentes harmônicas contidas na corrente secundária do TC são resultados de dois fatores: a não linearidade magnética do núcleo e a presença de componentes harmônicas na corrente primária [52,53,54]. Nos TC as distorções na forma de onda da corrente primária podem produzir efeitos muito pequenos no erro de relação e no erro de ângulo de fase e em geral podem ser desprezados [55,56]. Harmônicos de ordem mais elevada podem provocar erros. Porém, não estão presentes em amplitudes elevadas a ponto de serem significantes para influenciar os erros dos TCs.

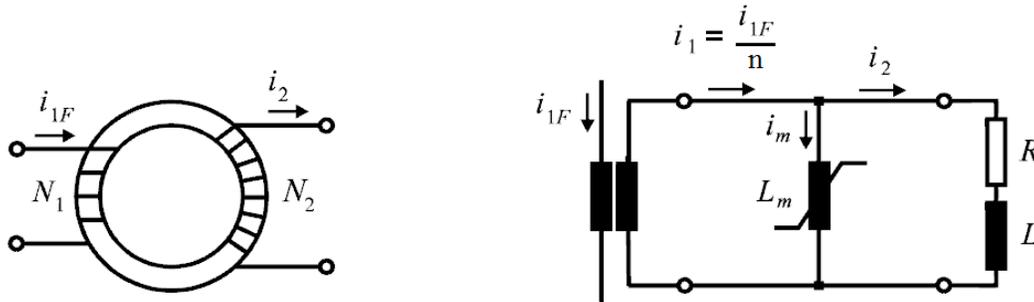
Com o auxílio do circuito elétrico equivalente, Figura 13, pode-se avaliar a influência das componentes harmônicas no erro de fase de um TC. Como o erro de fase está diretamente relacionado com a corrente de excitação, quanto menor a corrente de excitação, menor será o erro de fase do TC.

Com o aumento da frequência ocorre um aumento na reatância de magnetização X_m , e desse modo ocorre uma diminuição na corrente de excitação. Por outro lado, um aumento da frequência ocasiona um aumento nas perdas no núcleo. Nesse caso, quanto maior a permeabilidade magnética e a resistividade do material, menor serão as perdas devido as correntes parasitas.

2.10. Modelo do TC a ser utilizado nas Simulações

Para realizar as simulações apresentadas nesta tese, a representação do TC é feita mediante o circuito simplificado da Figura 26.

Figura 26 - Circuito equivalente considerado para o TC.



Fonte: PEREIRA, 2012 [57]; GUERRA, 2007 [58].

Na representação do TC as seguintes simplificações são assumidas:

- A reatância de dispersão do enrolamento secundário e a reatância do cabeamento entre o TC e o relé são desconsideradas, face aos baixos valores da frequência e das respectivas indutâncias.
- As propriedades magnéticas do núcleo são representadas apenas pela curva de magnetização λ versus i_0 (fluxo de enlace no secundário versus corrente de magnetização, em valores de pico). Assim, a histerese e as perdas dinâmicas (parasíticas e anômalas) não são consideradas.

Do circuito apresentado na Figura 26, as seguintes expressões podem ser estabelecidas:

$$\frac{d\lambda}{dt} = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt}, \quad (27)$$

$$i_2 = i_1 - i_m, \quad (28)$$

substituindo a expressão 28 na expressão 27, têm-se:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dt} &= Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{dt} = Ri_1 - Ri_m + L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_m}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{R(i_1 - i_m) + L \frac{di_1}{dt}}{1 + L \frac{di_m}{d\lambda}}. \end{aligned} \quad (29)$$

A expressão 29 pode ser solucionada por integração numérica utilizando o método de Euler, expressão 30:

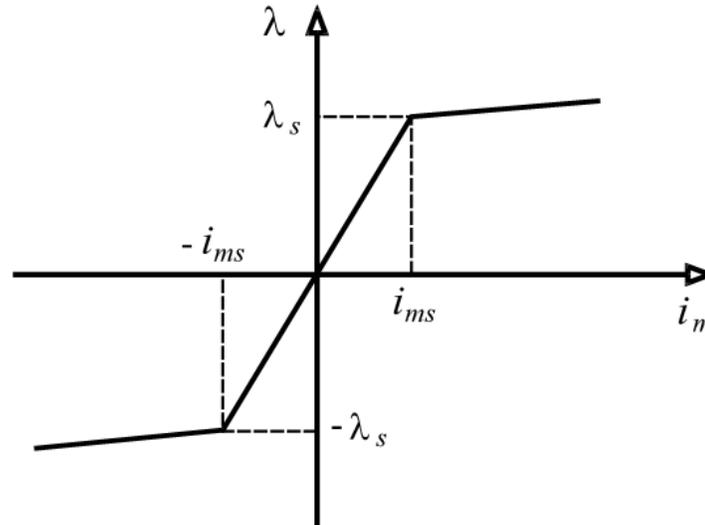
$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + h \frac{d\lambda}{dt}, \quad (30)$$

na qual h é o passo de integração.

A curva de magnetização linearizada, como apresentada na Figura 27, é dividida em 3 regiões:

- $\lambda > \lambda_s$ (saturação)
- $\lambda_s \leq \lambda \leq -\lambda_s$ (linear)
- $\lambda < -\lambda_s$ (saturação)

Figura 27 - Curva de magnetização linearizada divididas em 3 regiões.



Fonte: PEREIRA, 2012 [57].

O ponto (λ_s, i_{ms}) é definido como o joelho da curva de magnetização.

Nesta análise, supõe-se que o TC opera inicialmente na região linear, com indutância L_m constante, tal que $L_m \gg L_2$ e $wL_m \gg R_2$. Apesar de ser um modelo simplificado, a formulação exposta apresenta resultados satisfatórios para as simulações de saturação de um TC.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Ligas Nanocristalinas

Em 1988, o pesquisador Yoshizawa relatou que uma excelente permeabilidade é obtida quando o tamanho do grão de cristal é reduzido a uma escala nanométrica, cristalizando a liga amorfa do Fe-Si-B-Nb-Cu, dando início as pesquisas das ligas nanocristalinas. Posteriormente, baseado na teoria aleatória da anisotropia, o princípio de suavização magnética acompanhado pela redução do grão à escala nanométrica foi explicado por Herzer [59]. De acordo com este modelo a suavização magnética é atribuída à distribuição aleatória dos grãos nanométricos.

O primeiro passo de Yoshizawa na obtenção da liga nanocristalina foi obter fitas de ligas amorfas de Fe-Si-B pelo método de solidificação rápida, acrescida de Cu para promover a nucleação dos grãos, Nb, Ta e Mo adicionados para aumentar a temperatura de cristalização da liga, evitar o crescimento dos grãos e a deterioração das propriedades magnéticas do material, as fitas tinham aproximadamente 5 mm de largura e de 15 à 20 μm de espessura. As fitas amorfas foram enroladas na forma de toróides e em seguida submetidas a um tratamento térmico, com temperaturas variando entre 673 K a 923 K, durante 1h, sob atmosfera de gás nitrogênio. Nesse processo, um campo magnético, no sentido transversal ou longitudinal, era aplicado sobre a amostra toroidal, sendo medidas durante o ensaio características como: curva $B-H$, permeabilidade magnética relativa, perdas no núcleo e temperatura de cristalização (T_x) [1].

Para analisar o processo de evolução microestrutural da liga nanocristalina, $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ (comercialmente conhecida como FINEMET[®]), Yoshizawa e seus colaboradores utilizaram um equipamento denominado APFIM (*Atom Probe Field Ion Microscope*). Após a obtenção das fitas de ligas amorfas, elas foram enroladas no formato de toroide e submetidas a um processo de recozimento durante uma hora na temperatura abaixo da cristalização, que é de 873 K, as fitas continuam sendo amorfas, no entanto com a ajuda do APFIM, detectou-se a formação de aglomerados com alguns nanômetros de comprimento ricos em cobre, estruturas denominadas de *clusters*.

Quando as fitas de ligas amorfas foram submetidas a um recozimento de 1 hora na temperatura de cristalização, constatou-se a presença de três fases. A fase principal é a fase cristalizada composta de estruturas cúbica de corpo centrado (ccc) de Fe-Si,

responsável pelas características ferromagnéticas e cujos grãos são de ordem nanométrica. A outra fase amorfa, rica em nióbio e boro, contém silício e uma pequena quantidade de cobre. O aumento da concentração de nióbio e boro na fase amorfa acaba por cessar o crescimento dos grãos na fase de Fe-Si. Completando as três fases, existe uma fase rica em cobre, na forma de *clusters* obtidos quando o recozimento foi realizado abaixo da temperatura de cristalização. Ainda na fase citada, existem cristais com estrutura cúbica de face centrada (cfc) tendo como principal elemento o cobre, mas contendo, também, os demais elementos da liga. Como a concentração de ferro é baixa, esta fase não contém propriedades magnéticas. Outra liga nanocristalina que possui estas características é a liga de composição $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15,5}\text{B}_7$, comercialmente denominada de NANOPERM®.

Na Tabela 3 é apresentado um levantamento relativo aos principais trabalhos publicados sobre o desenvolvimento das ligas nanocristalinas no período de 1988 a 2014.

Tabela 3 - Desenvolvimento das Ligas Nanocristalinas.

Ligas Nanocristalinas	Ano	Pesquisadores	Processos
Fe-Cu-M (-Si)-B [M; Nb, Ta, Mo, Zr, etc] (FINEMET)	1988	Yoshizawa <i>et al.</i> [1]	Melt quenching (Sputtering)
Co-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc]	1989	Hasegawa <i>et al.</i> [60]	Sputtering
Fe-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc]			Sputtering
Fe-Au-Nb-Si-B	1989	Kataoka <i>et al.</i> [61]	Melt quenching
Fe-M-N [M: Hf, Zr, Ta, etc]	1990	K. Nakanishi <i>et al.</i> [62]	Sputtering
Fe-M-B [M: Hf, Zr, Nb, etc]	1990	Suzuhi <i>et al</i> [63]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Cu-P-C-Ge	1990	Fujii <i>et al.</i> [64]	Melt quenching
Fe-Zr-B-Cu	1991	A. Makino <i>et al.</i> [65]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Cr-Cu-Nb-Si-B	1992	A. Slawska- Waniewska <i>et</i> <i>al.</i> [66]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Ga-Si-Nb-B	1993	T. Tomida [67]	Melt quenching
Fe-Cu-Nb-Sb-Si-B	1994	J. Degro <i>et al.</i> [68]	Single-roller
Fe-Cu-W-Si-B			
Fe-B-Nb-Cu	1995	J. S. Lee <i>et al.</i> [69]	Melt-spinning
Fe-Al-Nb-B-Cu	1996	J. Y. Park <i>et al.</i> [70]	Single-roller Melt-spinning
Fe-Zr-B-Cu	1997	Y. Naitoh <i>et al.</i> [71]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)

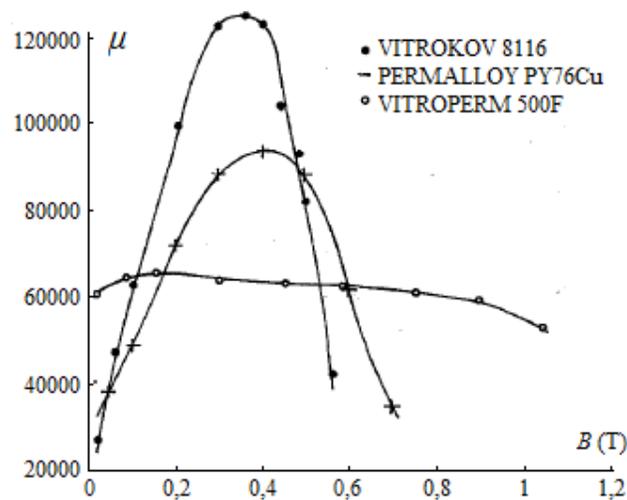
Fe- Co-Zr-B-Cu	1998	M. A. Willard <i>et al.</i> [72]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-Hf-B-Cu	1999	H. Iwanabe <i>et al.</i> [73]	Melt-spinning
Fe-Cu-M-Si-B (M: Nb, V)	2000	N. S. Mitrovic <i>et al.</i> [74]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-Si-B-Cu-Nb	2001	J. M. Borrego <i>et al.</i> [75]	Melt-spinning
Fe-Zr-B	2002	M. Hasiak <i>et al.</i> [76]	Melt-spun
Co-Fe-Zr-B-Cu	2002	A. Makino <i>et al.</i> [77]	Arc-melting
Fe-Nb-B-P-Cu	2003	A. Makino e T. Bitoh [78]	Arc-melting (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-Cu-M-Si-B (M: Nb, Zr)	2004	Y. Yoshizawa <i>et al.</i> [79]	Melt-spinning
Fe-Co-Cu-Nb-Si-B	2005	Y. Yoshizawa e Ogawa [80]	Melt-spinning
Fe-Si-Ni	2006	A. Bahrami <i>et al.</i> [81]	Mechanical Alloying (sob atmosfera controlada)
Fe-Zr-B-Cu	2006	J. C.-h. Shih <i>et al.</i> [82]	Melt-spinning (sob atmosfera inerte)
Fe-Nb-B-P-Cu	2007	A. Makino <i>et al.</i> [83]	Arc-melting (sob atmosfera inerte)
Fe-Ge-Nb-B-Cu	2008	D. Muraca <i>et al.</i> [84]	Melt-spinning
Fe-Si-B-P-Cu	2009	A. Makino <i>et al.</i> [85]	Melt-spun
Fe-(Co)-Ni-Zr-B	2010	A. González <i>et al.</i> [86]	Mechanical Alloying (sob atmosfera controlada)
Fe-B-C-Cu	2011	X. Fan <i>et al.</i> [15]	Melt-spun
Fe-Si-B-P-Cu	2011	F. Kong <i>et al.</i> [14]	Melt-spinning
Fe-Si-B-P-Cu	2012	A. Makino [45]	Melt-spun
Fe-Si-B-P-Cu	2012	F. Kong [87]	Melt-spinning
Fe-B-P-Cu	2012	A. Akiri <i>et al.</i> [88]	—
Fe-B-P-Cu	2013	A. Urata <i>et al.</i> [89]	—
(Fe-Co)-Si-B-Nb-Cu	2013	Z. Wen <i>et al.</i> [90]	—
Fe-Si-B-P-Cu	2014	K. Takenaka <i>et al.</i> [91]	Melt-spun
Fe-Co-Si-B-P-Cu	2014	Y. Zhang <i>et al.</i> [92]	Melt-spinning

3.2. TC com núcleo de Ligas Nanocristalinas

Os primeiros ensaios com TC com núcleo de liga nanocristalina foram realizados pelos pesquisadores Draxler e Styblíková, em 1996 [93]. Nos seus estudos, Draxler e

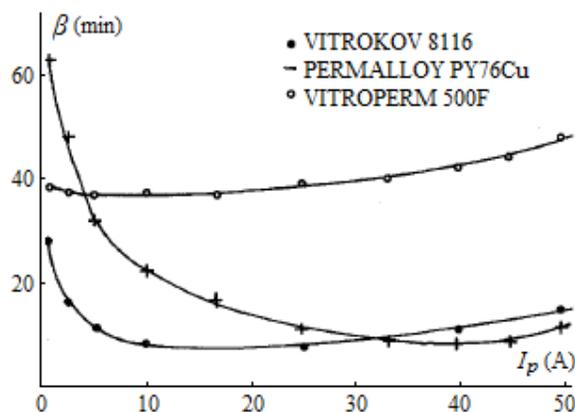
Styblíková compararam três materiais: liga nanocristalina, liga amorfa e a liga permalloy. De acordo com esses estudos, eles concluíram que o TC constituído de uma liga nanocristalina (Vitroperm 500F) apresentou uma menor dependência do erro de ângulo de fase (β) com a variação da intensidade de corrente no primário. Conforme pode ser observado a partir das análises da Figura 28 e da Figura 29, como a permeabilidade magnética da liga Vitroperm 500F é praticamente constante com a variação do fluxo magnético, o erro de fase tem uma menor variação, quando comparado com a liga amorfa (VITROKOV 8116) e a liga permalloy (Py76Cu).

Figura 28 – Dependência da permeabilidade magnética com a densidade de fluxo magnético, $f = 50$ Hz.



Fonte: DRAXLER; STYBLFKOVFI, 1996 [93].

Figura 29 – Dependência do erro de ângulo de fase (β) com a intensidade da corrente primária (I_p), para um TC com relação 50/5 A, $f = 50$ Hz.



Fonte: DRAXLER; STYBLFKOVFI, 1996 [93].

No Brasil, a partir de 2002, o pesquisador B. A. Luciano e seus colaboradores começaram a relatar estudos analíticos sobre os TC com núcleo de liga nanocristalina [94]. Em 2005, eles apresentaram estudos analíticos e computacionais, constatando a viabilidade do uso de ligas nanocristalinas em núcleos de TC [95]. Em 2006, apresentaram os primeiros resultados experimentais obtidos a partir de dois protótipos de TC: um com núcleo da liga nanocristalina FINEMET® FT-3M F6045G e outro composto por uma liga aço ao silício GO E-004. Com a análise da Tabela 4, pode ser constatada a diminuição dos erros de fase obtidos pelo emprego da liga nanocristalina no núcleo do TC [5].

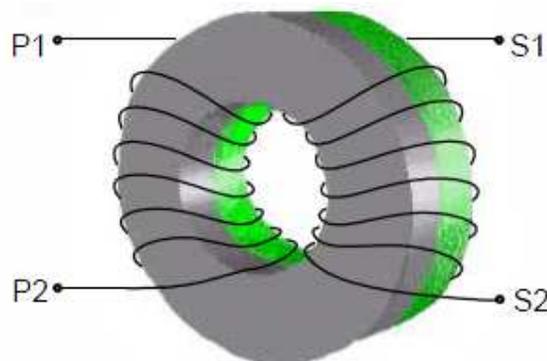
Tabela 4 - Ensaio experimentais para a determinação do ângulo de fase. $I_1 = 400$ A e $I_2 = 5$ A.

Carga: 2,5 VA			Carga: 5,0 VA		
Ângulo de fase (minutos)			Ângulo de fase (minutos)		
$%I_2$	FeSi	Nanocristalin	$%I_2$	FeSi	Nanocristalin
o			o		
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: LUCIANO, 2006 [5].

A partir de 2007, com o trabalho de Kwiczala e Kasperczyk [96], foram apresentados os primeiros resultados sobre o uso de núcleos mistos com liga nanocristalina em transformadores de corrente, cf. Figura 30.

Figura 30 – Estrutura do núcleo misto.

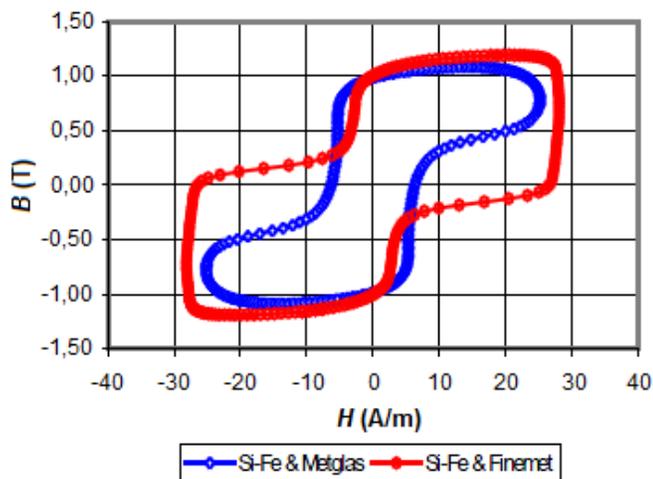


Fonte: KWICZALA; KASPERCZYK, 2007 [96].

No trabalho foram apresentadas 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 FINEMET[®], como pode ser verificado na Figura 31. Nos ensaios de erro de ângulo de fase foram comprovados que os erros ficaram dentro dos limites estabelecidos para a classe de exatidão de 0,1.

Figura 31 – 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[®].

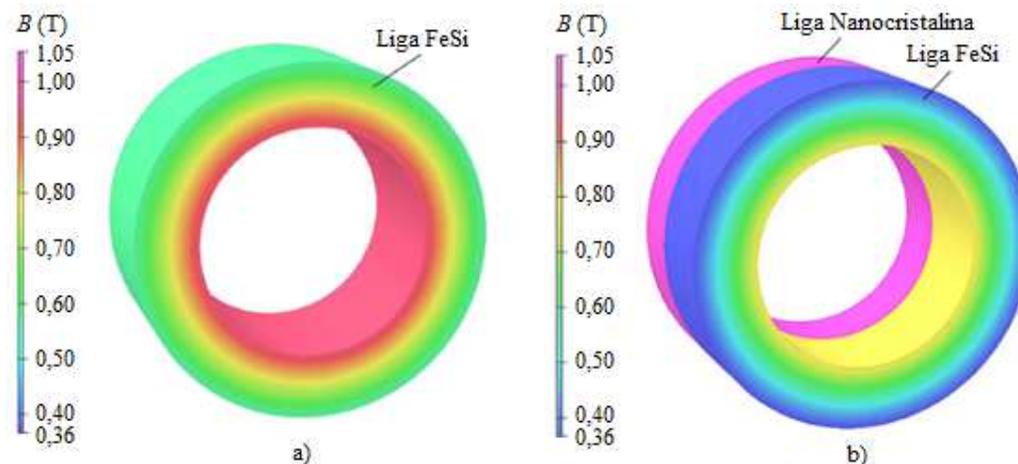


Fonte: KWICZALA; KASPERCZYK, 2007 [96].

Em 2009, Yoshizawa apresentou a patente de núcleos magnéticos para transformadores de corrente [97]. Nela, são apresentadas várias composições de materiais, dentre eles as ligas nanocristalinas, que podem ser utilizados como núcleo de transformadores de corrente.

Os núcleos mistos, compostos por aço ao silício e liga nanocristalina foram reportados na pesquisa de Lesniewska e Rajchert, em 2010 [98]. Na Figura 32 é apresentada uma simulação computacional da dispersão do fluxo magnético no interior no núcleo magnético. Pode-se perceber que na dispersão do núcleo de aço ao silício, Figura 32a, o fluxo é mais intenso próximo do raio interno. No caso, de ser utilizado um núcleo misto, Figura 32b, como a liga nanocristalina possui uma menor densidade de saturação em comparação com a liga de aço ao silício, para uma corrente no primário de 200 A o núcleo de liga nanocristalina se encontra saturado, diferentemente do núcleo de aço ao silício. Na Tabela 5, são apresentados os erros de ângulo de fase para os núcleos em ensaio. Pode-se observar que para uma corrente até 20% da corrente nominal, o núcleo misto apresenta menores erros de fase, quando comparado com o núcleo de FeSi.

Figura 32 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para os núcleos: a) FeSi b) núcleo misto.



Fonte: LESNIEWSKA; RAJCHERT 2010 [98].

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: LESNIEWSKA; RAJCHERT 2010 [98].

No mesmo ano, 2010, foi apresentada a dissertação de Batista, T. C. intitulada: Transformador de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina para Medição [7]. Na dissertação foram apresentados resultados experimentais dos erros em TC utilizados para serviços de medição. Dois TC foram utilizados nos ensaios: um com núcleo de liga FeSi GO e outro com núcleo de liga nanocristalina FINEMET®. Os erros de fase são apresentados na Tabela 6. Com a análise da Tabela 6, pode-se perceber que os erros de ângulo de fase são menores para o TC constituído de liga nanocristalina.

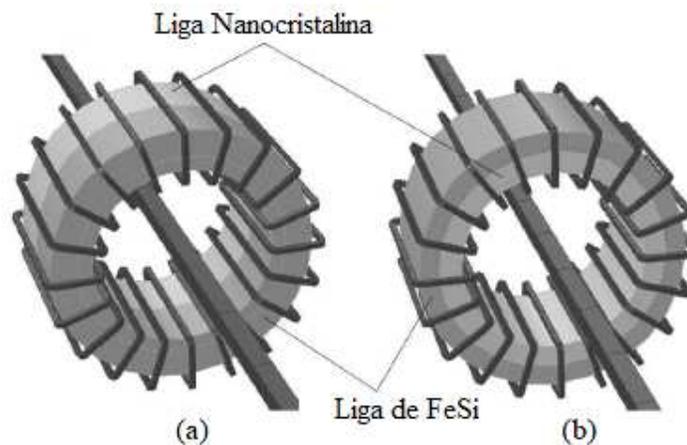
Tabela 6 – Erro de ângulo de fase para TC de 5 VA, correntes no primário e secundário 5 A.

Material do Núcleo	Erro de Ângulo de Fase	
	10%	100%
Liga Nanocristalina	1,28'	1,30'
FeSi – GO	14,31'	5,86'

Fonte: BATISTA, 2010 [7].

No ano de 2013, as pesquisadoras Lesniewska e Rajchert publicaram resultados de simulações para núcleos mistos [99]. No trabalho citado foi verificada a influência da disposição dos núcleos, axial ou radial, conforme apresentada na Figura 33. Foram constatados resultados muito similares, das características magnéticas do núcleo misto, para os dois tipos de disposição dos núcleos.

Figura 33 – Modelos para a disposição dos núcleos em um TC misto: a) axial b) radial.



Fonte: LESNIEWSKA; RAJCHERT, 2013 [99].

Como forma de destacar as publicações referentes aos TC com núcleos de liga nanocristalina e a inserção desta pesquisa no estado da arte, na Tabela 7 é apresentada de forma resumida a revisão bibliográfica.

Tabela 7 – Comparativo das contribuições de diversos autores dos TC com núcleo de liga nanocristalina.

Referência	Erros no TC	TC com núcleo misto	Influência de harmônicas no erro de fase	Influência da carga conectada ao secundário	TC para serviços de proteção
Drawlex <i>et al.</i> (1996)	√	-	-	-	-
Luciano <i>et al.</i> (2006)	√	-	-	-	-
Kwiczala <i>et al.</i> (2007)	√	√	-	-	-
Yoshizawa, Y. (2009)	√	-	-	-	-
Batista, T. C. (2010)	√	-	-	-	-
Lesniewska <i>et al.</i> (2010 e 2013)	√	√	-	-	-
Esta Tese (2014)	√	√	√	√	√

Fonte: Produzida pelo autor.

Na revisão bibliográfica verifica-se que nenhum dos trabalhos avaliados contempla o estudo da influência de componentes harmônicas e da carga conectada ao secundário no

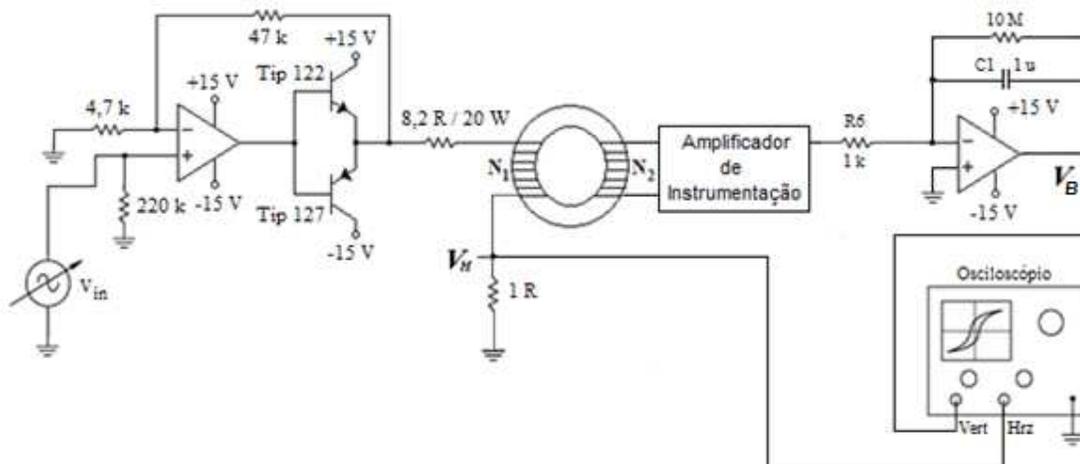
erro de fase de TC com núcleo de liga nanocristalina e o uso de TC com núcleo de liga nanocristalina em serviços de proteção.

4. Metodologia

4.1. Caracterização Magnética dos Núcleos Toroidais

Para a realização experimental do levantamento do laço B versus H foi utilizado o circuito da Figura 4. Porém, com um estágio de amplificação de corrente, como mostrado na Figura 34, pois o gerador de funções utilizado não fornece a corrente necessária para a saturação dos núcleos toroidais ferromagnéticos em estudo. O amplificador de instrumentação foi adicionado para garantir uma carga elevada no enrolamento secundário, podendo considerar como um circuito aberto, e evitar qualquer influência do núcleo na integração da tensão secundária.

Figura 34 - Circuito para determinação do laço B versus H .



Fonte: Produzida pelo autor.

Os ensaios foram realizados com frequência de 60 Hz, a mesma a que serão submetidos os transformadores de corrente. De acordo com o que está mostrado na Figura 34, no gerador de funções, representado por V_{in} , são geradas senóides, as quais serão variadas em amplitude, com o intuito de obter a família dos laços B versus H . No canal 1 (horizontal) do osciloscópio é colocado o sinal V_H , já o sinal V_B no canal 2 (vertical). Operando o osciloscópio no modo XY, são exibidos os gráficos V_B versus V_H . Tais gráficos correspondem aos laços B versus H , pois os valores de densidade de fluxo magnético (B) e intensidade de campo magnético (H) são obtidos apenas pela multiplicação de constantes, de acordo com as expressões 31 e 32.

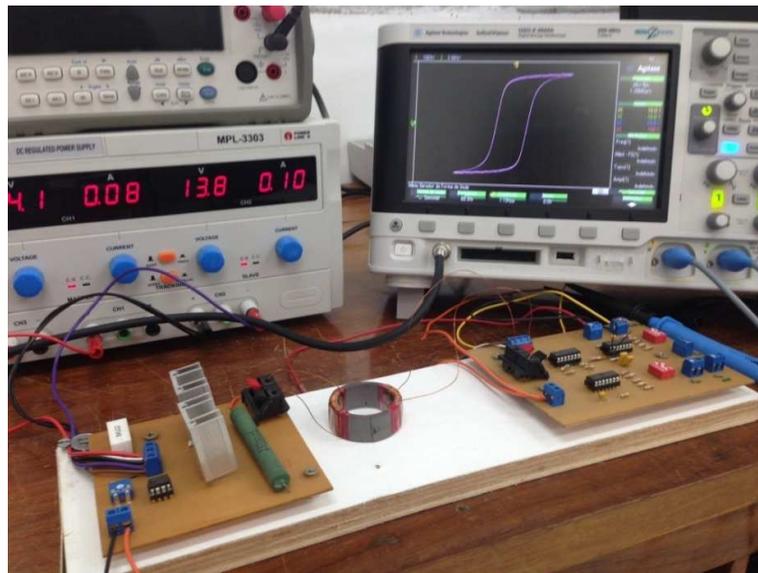
$$B = \left[\frac{R_6 C_1}{N_2 A_e} \right] V_B, \quad (31)$$

$$H = \left[\frac{N_1}{l_e R_2} \right] V_H. \quad (32)$$

Nas expressões, A_e é a área efetiva da secção transversal do núcleo, N_1 e N_2 são os números de espiras do primário e do secundário, respectivamente, e l_e é o comprimento efetivo médio.

Na Figura 35 é exibida uma foto da montagem experimental com um núcleo de FeSi.

Figura 35 - Foto da montagem experimental com um núcleo de FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

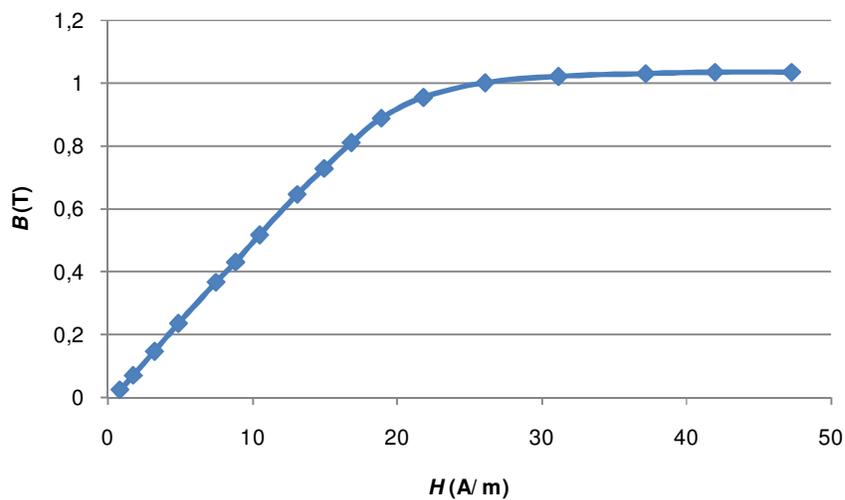
Os ensaios experimentais foram limitados pela disponibilidade dos núcleos toroidais de liga nanocristalina. Por isso, os núcleos de liga nanocristalina com alto valor de densidade de fluxo de saturação (1,9 T), desenvolvidos por estudos recentes, não foram utilizados nas caracterizações e, portanto, nos protótipos dos TC. Os núcleos utilizados nos ensaios experimentais possuem os seguintes nomes comerciais: liga nanocristalina NANOPERM[®] M-033, ligas nanocristalinas NANOPHY[®] (N3E1, N3E2 e N3E3), liga nanocristalina FINEMET[®] e a liga de FeSi.

4.2. Modelamento dos TC

A partir da curva de magnetização inicial de cada núcleo toroidal sob ensaio foi obtida a curva de magnetização dividida em três regiões, da mesma forma da curva apresentada na Figura 27.

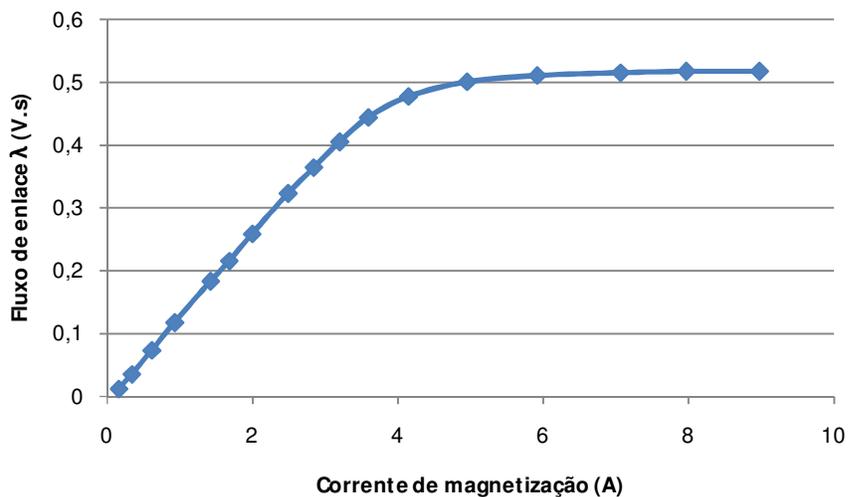
Na Figura 36 é mostrada a curva de magnetização inicial para o núcleo toroidal de liga nanocristalina NANOPHY[®] N3E1. Com o auxílio das expressões 16 e 17 pode-se obter a curva λ versus i_0 para o TC a ser modelado, conforme apresentada na Figura 37.

Figura 36 - Curva de magnetização inicial do núcleo de liga nanocristalina NANOPHY[®] N3E1.



Fonte: Produzida pelo autor.

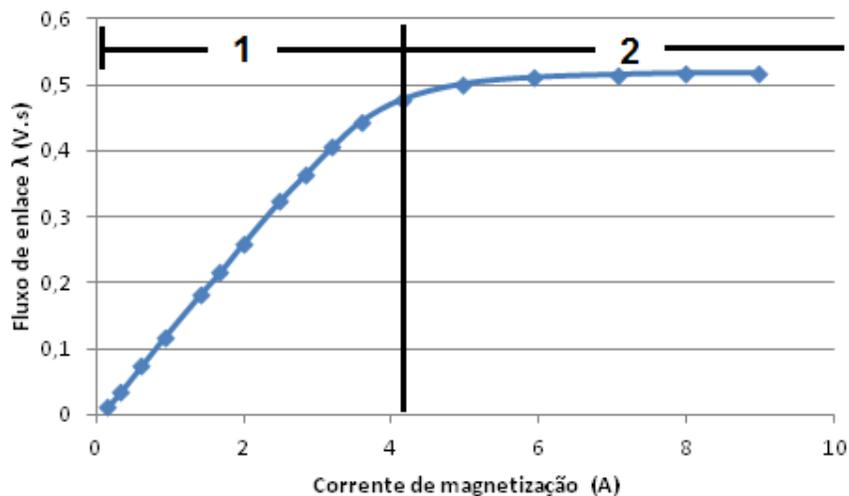
Figura 37 - Curva λ versus i_0 para o TC a ser modelado.



Fonte: Produzida pelo autor.

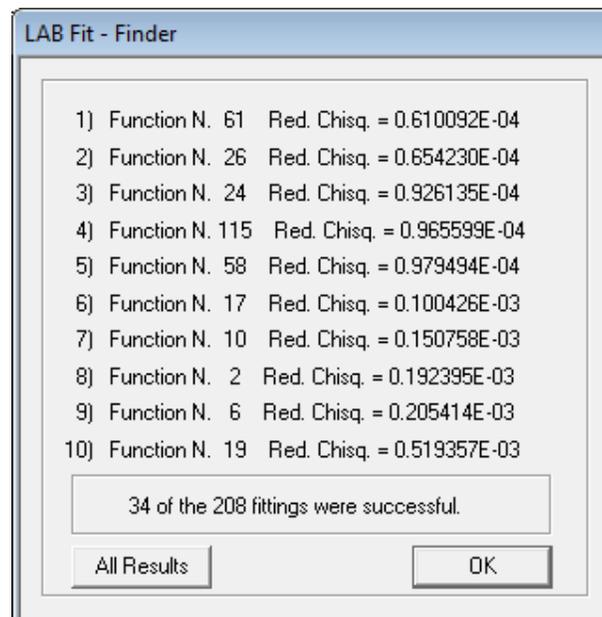
Para obter a função que representa a curva apresentada na Figura 27 é utilizado o *software* LABFIT®. A curva λ versus i_0 é dividida em duas partes, como mostrada na Figura 38. A parte 1 representa a região linear de atuação do TC e a parte 2 à região de saturação. Os pontos da região 1 são inseridos no *software* LABFIT®, que retorna a curva que mais se aproxima dos pontos, Figura 39. O mesmo procedimento é realizado para a região 2.

Figura 38 - Curva λ versus i_0 para o TC a ser modelado dividida em duas regiões.



Fonte: Produzida pelo autor.

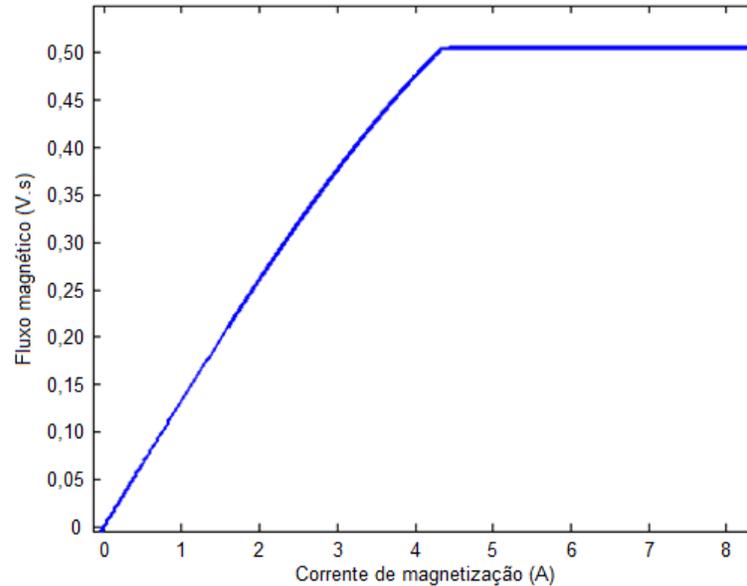
Figura 39 - Curva da região 1 aproximada pelo *software* LABFIT®.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 40 é apresentada a curva de magnetização obtida a partir das curvas aproximadas pelo *software* LABFIT®.

Figura 40 - Curva de magnetização para a núcleo NANOPHY® N3E1.



Fonte: Produzida pelo autor.

A curva de magnetização do núcleo N3E1 utilizada nas simulações e representada pelas equações:

- No trecho $[-i_{ms}, i_{ms}]$

$$\lambda = 0,6341 \cdot \text{sen}(0,2119 \cdot i)$$
- No trecho $[i_{ms}, \infty]$

$$\lambda = 30 \cdot 10^{-6}(i - i_{ms}) + \lambda_{ms}$$
- No trecho $[-\infty, -i_{ms}]$

$$\lambda = 30 \cdot 10^{-6}(i + i_{ms}) - \lambda_{ms}$$

O procedimento descrito foi repetido para todos os núcleos sob ensaio.

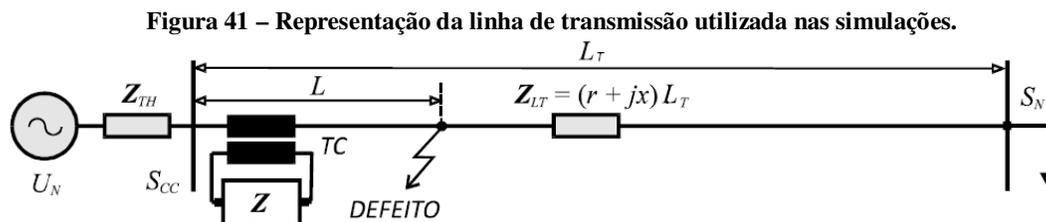
4.3. Simulações dos Transformadores de Corrente

No intuito de verificar a validade das premissas abordadas, foram realizadas simulações dos TC para serviços de proteção com os materiais caracterizados experimentalmente. O modelo utilizado para representar o TC foi o modelo simplificado obtido a partir da Figura 26. O transformador de corrente a ser modelado possui uma potência aparente de 50 VA e relação de transformação de 2000:5, com uma espira no

enrolamento primário e 150 espiras no enrolamento secundário, uma área de secção transversal de $0,0025 \text{ m}^2$ e um comprimento efetivo de 190 mm.

Para modelar o TC é necessário utilizar os resultados, obtidos de forma experimental, da caracterização magnética dos núcleos toroidais sob ensaio. A partir dos laços B versus H e com o auxílio das equações 16 e 17, é obtida a curva de magnetização para cada TC.

As simulações realizadas contemplam a saturação por corrente contínua e a saturação na presença de um fluxo remanescente. Para ambas as simulações foi utilizado um circuito representativo de uma linha de transmissão, conforme apresentado na Figura 41. Trata-se de uma linha de transmissão de 345 kV cujos dados de sequência positiva são descritos [57]. Para a simulação foi utilizado o *software* MATLAB[®].

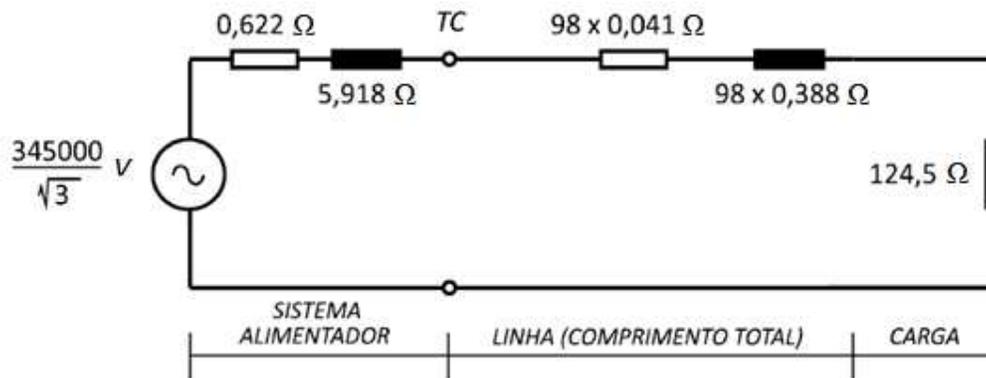


Fonte: PEREIRA, 2012 [57].

- Comprimento total, L_T : 98 km.
- Tensão nominal, U_N : 345 kV.
- Corrente nominal, I_N : 1600 A.
- Resistência em série por km, r : 0,041 Ω /km.
- Reatância em série por km, x : 0,388 Ω /km.
- Ângulo, θ : 84°.
- Corrente de curto-circuito no barramento de saída, I_{CC} : 33,5 kA.
- Potência de curto-circuito no barramento emissor, S_{CC} : 20 GVA.
- Impedância de curto-circuito no barramento emissor, Z_{TH} : 0,622 + j 5,918 Ω .
- Carga ligada ao barramento receptor, S_N : 956 MVA, $FP \cong 1$.
- Impedância equivalente ligada ao barramento receptor, Z_N : 124,5 Ω .

A simulação foi realizada antes e depois da ocorrência de uma falta na linha de transmissão. O circuito utilizado para a simulação da linha de transmissão antes da falta é apresentado na Figura 42.

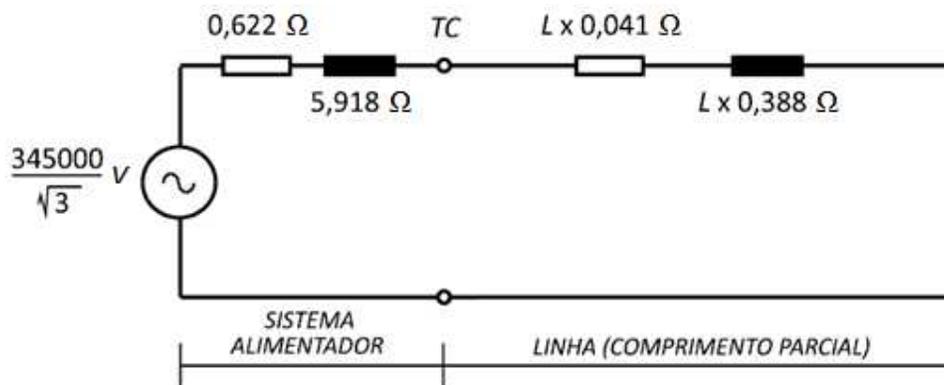
Figura 42 – Circuito utilizado para simulação da linha de transmissão antes da falta.



Fonte: PEREIRA, 2012 [57].

Na Figura 43 é apresentado o circuito monofásico equivalente para a simulação do sistema imediatamente após a ocorrência da falta simétrica. A linha de transmissão é representada por sua impedância equivalente Z_L relativa ao comprimento L . Para a simulação da falta simétrica foi simulada uma falta a 60 km da fonte.

Figura 43 - Circuito monofásico equivalente para simulação do sistema após a falta.



Fonte: PEREIRA, 2012 [57].

4.4. Projetos dos Transformadores de Corrente

Os núcleos toroidais utilizados nos transformadores de corrente possuem os seguintes nomes comerciais: N3E1, N3E2 e N3E3 (núcleos de liga nanocristalina da família NANOPHY[®]), liga nanocristalina FINEMET[®] e núcleos de FeSi de grãos orientados.

Os projetos dos TC tiveram como limitação tanto a disponibilidade dos núcleos toroidais de ligas nanocristalinas quanto à intensidade de corrente elétrica que irá circular pelo enrolamento primário.

Os TC são do tipo enrolado e destinados para utilização em serviços de medição e proteção. A relação nominal do transformador é de 1:1, ou seja, corrente no primário de 100 mA e corrente no secundário de 100 mA. A relação 1:1 foi definida por limitação da fonte de tensão utilizada nos experimentos.

Definidas as correntes primárias e secundárias o próximo passo foi a determinação do número de espiras dos enrolamentos. A bitola dos condutores dos enrolamentos primário e secundário dos TC possui área de secção transversal $0,13 \text{ mm}^2$. O número de espiras é limitado pelo comprimento interno do núcleo toroidal. Portanto, os protótipos baseados nas dimensões das ligas nanocristalinas N3E1, N3E2 e N3E3 possuem 150 espiras nos enrolamentos primário e secundário. Já os protótipos baseados nas dimensões da liga FINEMET[®] possuem 270 espiras nos enrolamentos primário e secundário

De acordo com a expressão 33, para determinar o número de espiras do enrolamento do TC precisam ser definidas: a frequência (f) de operação, a potência aparente (S), a densidade de fluxo magnético de operação (B_{op}), a área da secção magnética efetiva do núcleo toroidal (A_e) e a corrente nominal.

$$N_2 = \frac{S}{4,44 \cdot I_2 \cdot B_{op} \cdot A_e \cdot f} . \quad (33)$$

A área magnética efetiva da seção transversal é dada pela relação entre a área geométrica (A_g) e o fator de empilhamento (F_e), como apresentado na expressão 34. Os núcleos compostos por ligas nanocristalinas possuem um fator de empilhamento em torno de 0,73 e o fator de empilhamento de um núcleo com a liga de Fesi é na ordem de 0,95.

$$A_e = A_g F_e . \quad (34)$$

No projeto foram definidas: a frequência de operação (60 Hz), o número de espiras, a corrente nominal (100 mA) e a dimensão da secção de área magnética dos núcleos toroidais. Como é desejável que a densidade de fluxo magnético de operação seja 0,1 T, é necessário obter qual a potência aparente do protótipo.

A partir da relação 35 são obtidas as potências aparente dos TC. O resultado obtido foi $S = 0,072 \text{ VA}$ para os TC com núcleos de liga nanocristalinas NANOPHY[®] e $S = 0,0228 \text{ VA}$ para os TC com núcleos de liga nanocristalinas FINEMET[®].

Na Figura 44 são apresentados os protótipos dos TC confeccionados com as ligas NANOPHY[®] N3E1 e liga de FeSi GO.

Figura 44 – Foto dos protótipos confeccionados com as ligas NANOPHY[®] N3E1 e liga de FeSi GO.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 8 são apresentados os TC utilizados neste trabalho.

Tabela 8 – Características dos TC utilizados neste trabalho.

Nº	Material do Núcleo	Área Efetiva (A_e) mm ²	Comprimento Médio (l_e) mm	Número de espiras (N_1 e N_2)
1	N3E1	90	100,3	150 e 150
2	N3E2	90	100,3	150 e 150
3	N3E3	90	100,3	150 e 150
4	N3E3	180	100,3	150 e 150
5	Fesi	100,8	127,2	150 e 150
6	FINEMET [®]	31,75	153,3	270 e 270
7	FINEMET [®]	63,5	153,3	270 e 270
8	FeSi	38,3	157,08	270 e 270
9	FINEMET [®] e FeSi	77,05	155,19	270 e 270

Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 45 são apresentados os passos para a confecção do TC misto, no qual são utilizados dois núcleos toroidais: um núcleo de liga FeSi e outro de liga nanocristalina FINEMET[®].

Figura 45 – Fotos da montagem do núcleo misto, composto por um núcleo de FeSi e um núcleo de liga nanocrystalina FINEMET®.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.5. Avaliação do Tamanho e Massa dos TC

Devido aos baixos valores de fator de empilhamento e densidade de fluxo de saturação apresentados pelos núcleos de ligas nanocrystalinas, foi realizada uma avaliação do tamanho e da massa do TC com liga nanocrystalina em relação ao TC com FeSi. Para medir as dimensões dos núcleos foi utilizado um micrometro Mitutoyo, com incerteza de $\pm 0,1$ mm, e para obter a massa dos núcleos foi utilizada uma balança de marca Marte® e modelo AL200C, a incerteza da balança é de $\pm 0,01$ g. Na Figura 46 é apresentada uma foto da medição da massa do núcleo de liga nanocrystalina FINEMET®.

Figura 46 - Foto da medição da massa do núcleo de liga nanocrystalina FINEMET®.



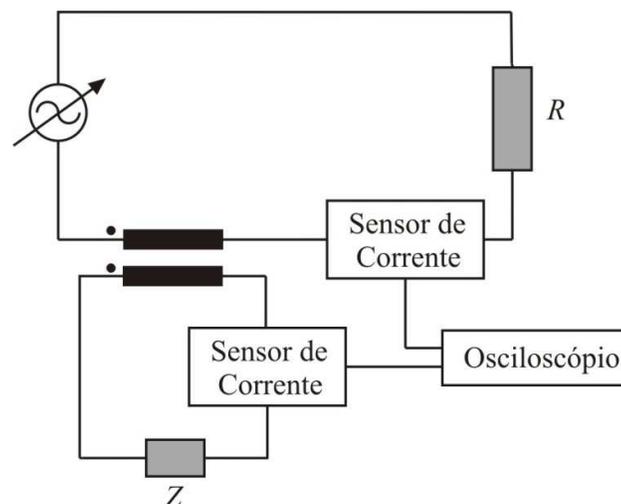
Fonte: Produzida pelo autor.

4.6. Ensaios com TC para Serviços de medição

Com o objetivo de avaliar a influência do material magnético no erro de fase dos transformadores de correntes, os ensaios são realizados de modo que a diferença é o material do núcleo magnético.

Os ensaios para determinação dos erros de fase dos TC foram realizados de acordo com as normas da ABNT NBR 6856 [100] e NBR 6821 [101]. O circuito para a realização dos experimentos é mostrado no diagrama da Figura 47.

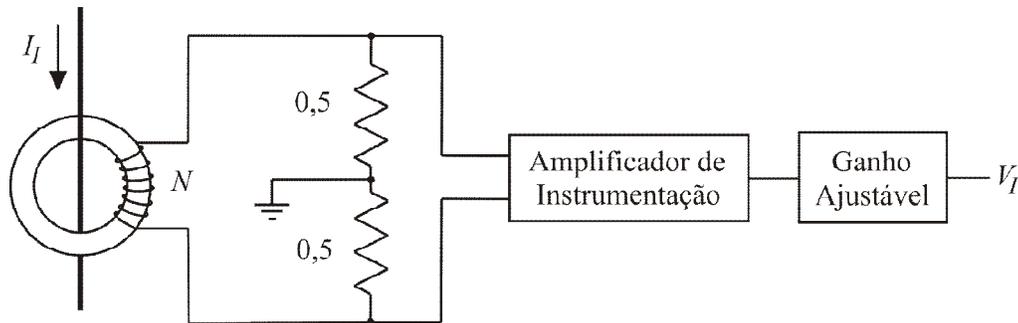
Figura 47 – Diagrama do circuito para obter o erro de fase do TC sob ensaio.



Fonte: Produzida pelo autor.

O osciloscópio utilizado foi da marca Agilent DSO7014A, as pontas de prova são da marca Agilent e modelo N2862B, o diagrama esquemático dos sensores de corrente é apresentado na Figura 48, a carga R é composta por três lâmpadas incandescentes de 60 W em série.

Figura 48 - Diagrama esquemático do sensor de corrente utilizado para medições das correntes.



Fonte: Produzida pelo autor.

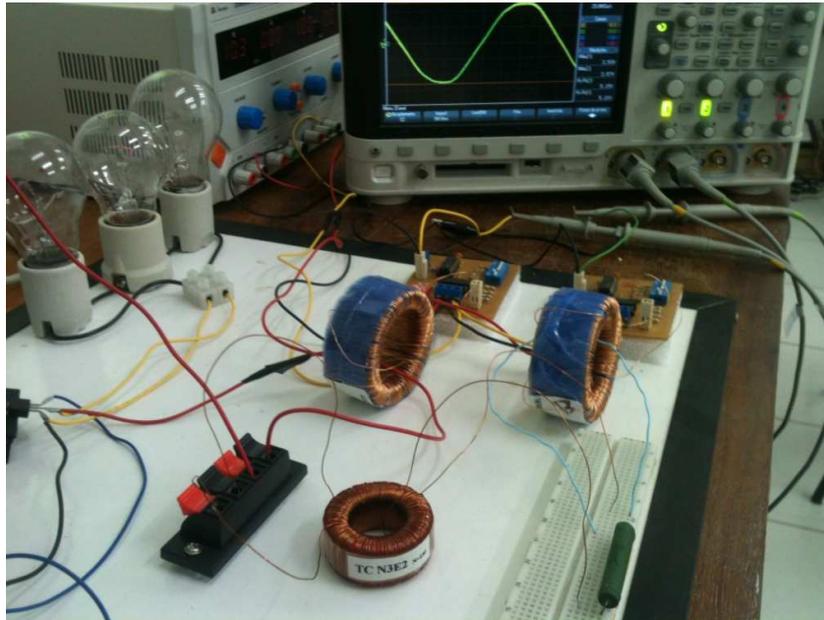
Segundo a norma da ABNT - NBR 6856, para cargas nominais com fator de potência 0,9, se um TC com designação C2,5 têm uma impedância de $0,1 \Omega$, um TC C0,072 têm impedância cerca de 35 vezes menor, portanto: $2,86 \text{ m}\Omega$.

No entanto, essa carga nominal é para uma corrente nominal de 5 A. Como a corrente nominal dos TC sob ensaio é de 100 mA, de acordo com a norma NBR 6856, equação 35, a impedância é de $7,15 \Omega$. Portanto, a carga utilizada nos ensaios do TC para serviços de medição é composta por um resistor de $6,43 \Omega$ e um indutor de $8,25 \text{ mH}$. Nos ensaios experimentais, foram utilizados um resistor de $5,69 \Omega$ e um indutor de $8,66 \text{ mH}$.

$$Z = 2,86 \text{ m} \left(\frac{5}{0,1} \right)^2 = 2,86 \text{ m} \cdot 2500 = 7,15 \text{ ohm} \quad (35)$$

Na Figura 49 é apresentada a montagem experimental, a qual foi realizada no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas – LIMC/DEE/UFCG.

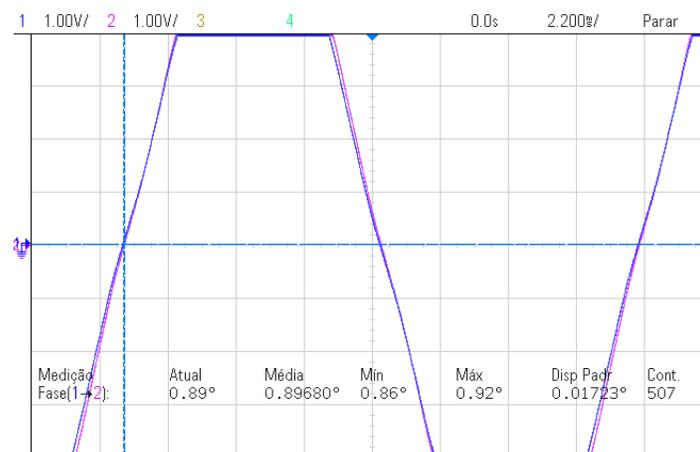
Figura 49 - Foto da montagem experimental realizada no LIMC/DEE/UFMG.



Fonte: Produzida pelo autor.

Para a obtenção dos erros de fase dos TC sob ensaios, o primeiro passo foi obter o erro imposto pelos sensores utilizados. Na Figura 50 é apresentado um exemplo do erro de fase para os sensores.

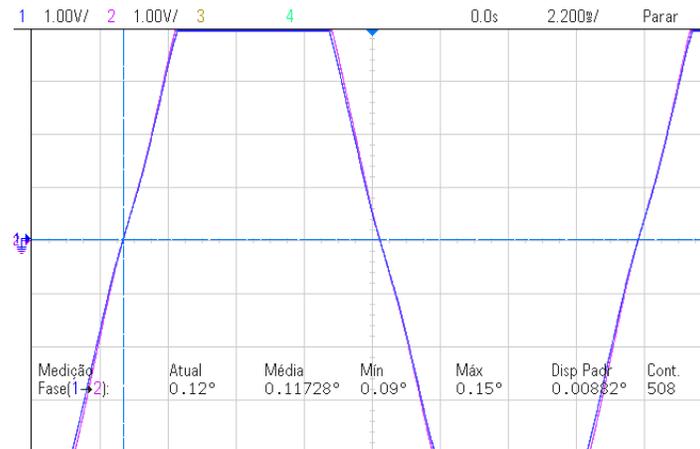
Figura 50 - Exemplo do erro de fase dos sensores.



Fonte: Produzida pelo autor.

Depois de identificado o erro de fase dos sensores, foram obtidos todos os erros de fase para os TC sob ensaio. Na Figura 51 é apresentado um exemplo do erro de fase para o TC com FeSi no ensaio com o enrolamento secundário curto-circuitado.

Figura 51 – Exemplo do erro de fase para o TC com núcleo de FeSi no ensaio com o enrolamento secundário curto-circuitado.



Fonte: Produzida pelo autor.

O erro de fase do TC é obtido ao subtrair o erro de fase do sensor dos erros obtidos em cada TC. Desse modo o erro de fase (β) é obtido mediante a expressão 36 [102].

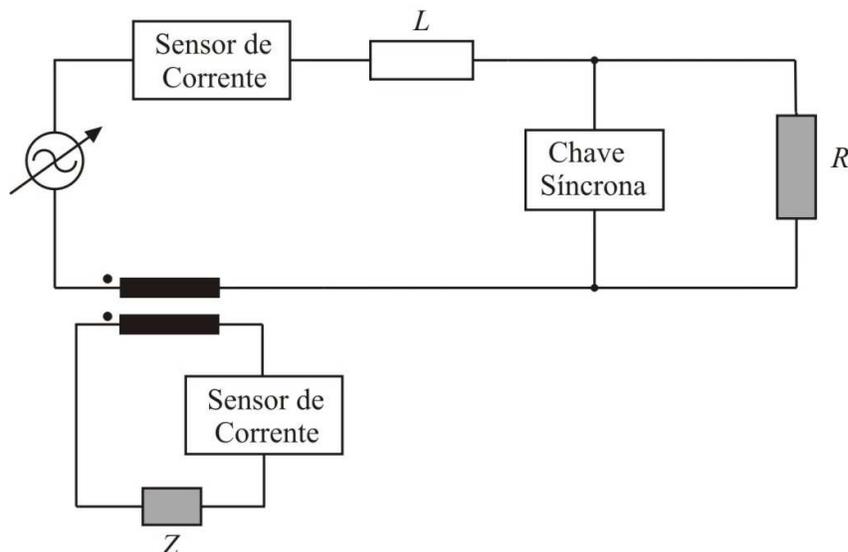
$$\beta = Erro_{sensor} - Erro_{TC} \pm \sqrt{desvio_{sensor}^2 + desvio_{TC}^2} \quad (36)$$

4.7. Ensaio com TC para Serviços de Proteção

Com o objetivo de realizar experimentos que representem o funcionamento de um TC para serviços de proteção, foi projetado o circuito na qual o diagrama esquemático está apresentado na Figura 52. Devido à limitação do nível de corrente utilizados nos ensaios, os TC utilizados para serviços de proteção são os mesmos que foram projetados para os TC de medição.

Para os ensaios com TC de proteção é observado o comportamento do TC antes e depois da ocorrência de uma falta. No circuito utilizado, a falta é simulada por uma chave síncrona. A chave síncrona é comandada por um microcontrolador PIC, o qual determina o momento exato da aplicação da falta. Ou seja, o momento exato em que a chave irá fechar e a corrente deixará de passar por L e R , para circular apenas pela indutância. O indutor utilizado tem uma relação $\tan^{-1}(X/R)$ de aproximadamente 81° , o que proporciona uma componente de corrente contínua mínima adequada para os ensaios.

Figura 52 – Diagrama esquemático para a realização de experimentos com os TC para serviços de proteção.



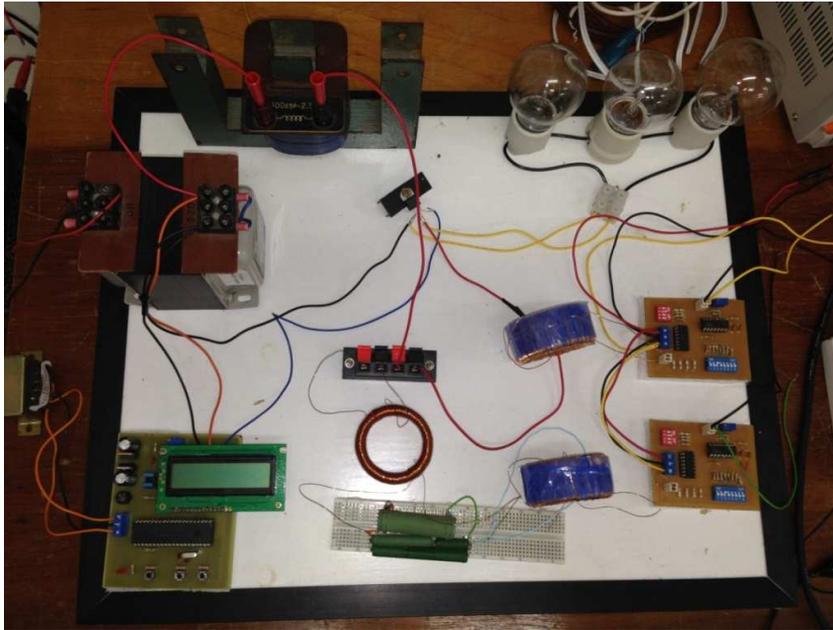
Fonte: Produzida pelo autor.

Com o intuito de verificar a influência do material magnético na saturação do TC, foram confeccionados TC com o dobro da área da secção transversal. De modo que seja possível confirmar a premissa que aumentar a área da secção transversal possibilita a circulação de uma corrente maior com o mesmo fluxo magnético.

Com o circuito mostrado na Figura 52 é possível verificar a saturação do material magnético quando circula pelo enrolamento primário uma corrente de 20 vezes a corrente nominal, ou seja, 2 A. Quando a chave síncrona estiver aberta, a corrente que circulará por R e L será de aproximadamente 100 mA, e quando a chave for acionada passará a circular uma corrente na ordem de 2 A.

Nos experimentos foram utilizados sete transformadores de corrente, de características apresentadas na Tabela 8, e cujos números são: 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Na Figura 53 é apresentada uma foto da montagem experimental com a chave síncrona.

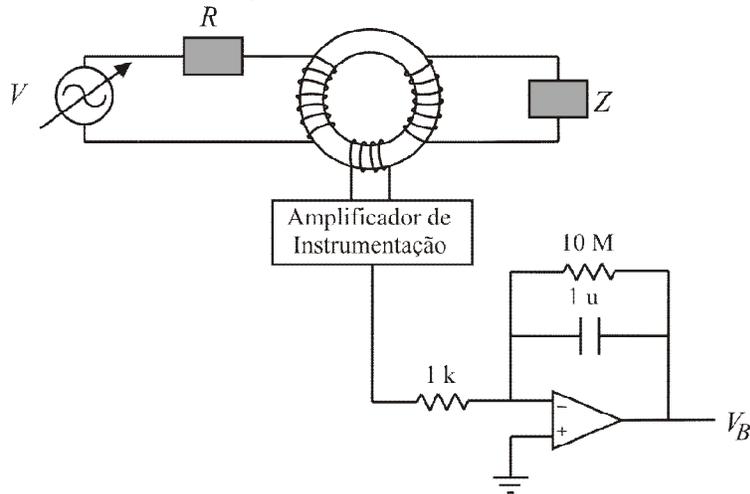
Figura 53 - Foto da montagem experimental com a chave síncrona.



Fonte: Produzida pelo autor.

A densidade de fluxo magnético pode ser obtida na forma experimental, para comprovar a saturação do núcleo magnético. A densidade de fluxo magnético foi obtida com o uso do circuito apresentado na Figura 54. Foi adicionado um terceiro enrolamento, apenas para obter uma amostra da tensão. A amostra da tensão é integrada e fornece a densidade de fluxo magnético, baseada na Lei de Faraday. O amplificador de instrumentação e o integrador são os mesmos utilizados para a caracterização magnética dos núcleos toroidais.

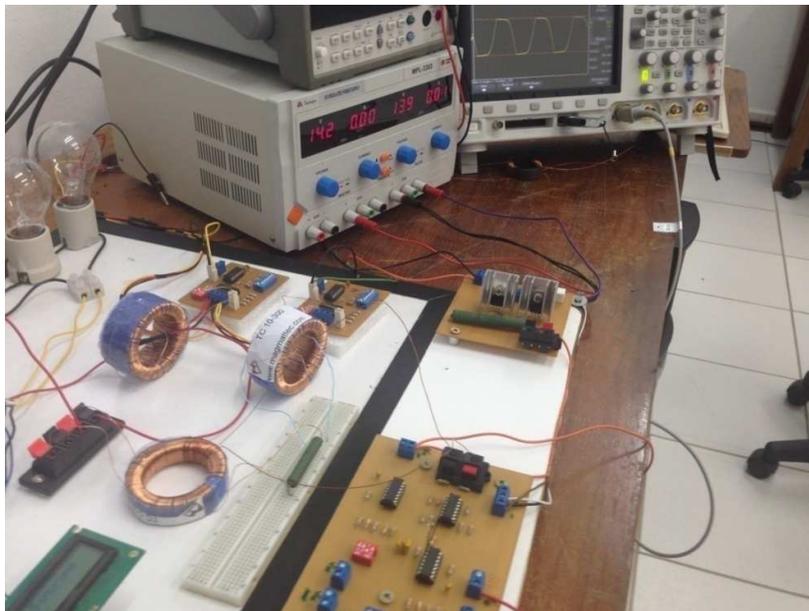
Figura 54 - Obtenção experimental da densidade de fluxo magnético.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 55 é mostrada uma foto da montagem experimental, na qual se pode visualizar a obtenção da densidade de fluxo magnético na tela do osciloscópio.

Figura 55 - Foto da montagem experimental para obtenção da densidade de fluxo magnético.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.8. Ensaios com TC para avaliar a influência da carga conectada ao enrolamento secundário

Para comprovar os estudos teóricos, foram realizados ensaios baseados na NBR-6856 e utilizando o circuito apresentado na Figura 47, para avaliar a influência da carga conectada ao enrolamento secundário no erro de fase do TC. As cargas utilizadas nos ensaios segundo a norma NBR-6856 têm fator de potência 0,5 e 0,9. Adicionalmente, foram realizados ensaios com o TC curto-circuitado e com a carga conectada ao secundário com fator de potência unitário. A carga com fator de potência unitário foi utilizada para representar os instrumentos digitais. O módulo da carga conectada ao secundário corresponde a: 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da carga nominal dos TC sob ensaio.

Na Tabela 9 são mostradas as cargas nominais obtidas a partir da equação 21, baseada na NBR-6856.

Tabela 9 - Cargas nominais determinadas com base na NBR-6856.

Fator de Potência		Resistência (Ω)	Indutância (mH)
0,5	25%	0,894	4,106
	50%	1,788	8,212
	75%	2,680	12,318
	100%	3,575	16,425
	125%	4,468	20,531
0,9	25%	1,608	2,062
	50%	3,215	4,125
	75%	4,822	6,188
	100%	6,430	8,250
	125%	8,038	10,312
1,0	25%	1,788	
	50%	3,575	
	75%	5,362	
	100%	7,150	
	125%	8,938	

Fonte: Produzida pelo autor.

Na Tabela 10 estão mostradas as cargas utilizadas nos experimentos.

Tabela 10 - Cargas utilizadas nos experimentos com os TC.

Fator de Potência		Resistência (Ω)	Indutância (mH)
0,5	25%	0,913	4,084
	50%	1,646	7,946
	75%	2,340	13,101
	100%	3,443	16,261
	125%	4,505	21,290
0,9	25%	1,551	2,402
	50%	3,310	4,510
	75%	4,670	5,832
	100%	5,690	8,663
	125%	8,121	10,705
1,0	25%	1,844	
	50%	3,964	
	75%	5,663	
	100%	6,812	
	125%	8,915	

Fonte: Produzida pelo autor.

4.9. Ensaio com TC para avaliar a influência das componentes harmônicas no erro de fase

Para verificar a influência das componentes harmônicas dois tipos de ensaios foram realizados. No primeiro ensaio foram utilizados dois TC, um com núcleo de FeSi e outro com a liga nanocristalina N3E3. Os TC foram submetidos a sua corrente nominal de 100

mA com frequência nominal de 60 Hz, e foram acrescentados a fundamental as componentes harmônicas de: 3^a, 5^a, 7^a e 9^a. As componentes harmônicas têm como módulo 10 % da componente fundamental. Esse módulo de 10 % foi utilizado com base no Guia IEEE *Std* 519. Até o momento não existe normas brasileiras com relação aos níveis de distorção de corrente.

O segundo ensaio realizado levou em consideração um sinal de tensão distorcido, como várias componentes harmônicas, comumente presente em sistemas de distribuição. Os módulos e fases das componentes são apresentados na Tabela 11. Como nesse sinal os módulos das componentes harmônicas são baixos, pode-se observar a influência desse sinal nos erros de fase para um TC de medição.

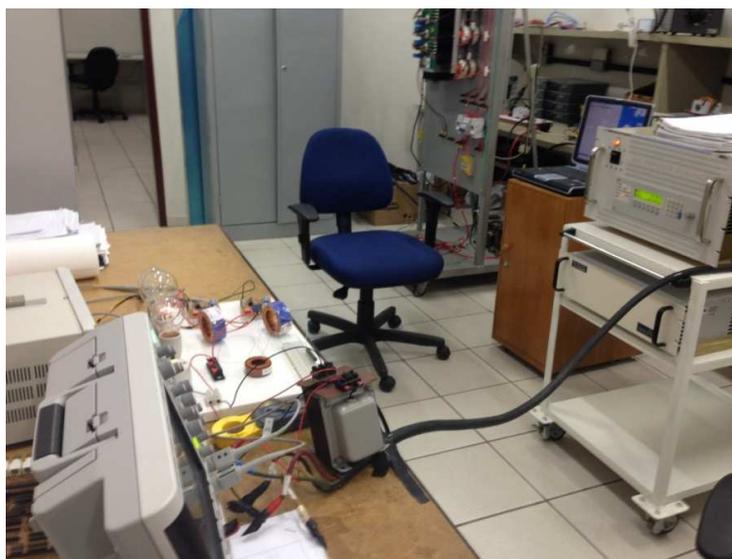
Tabela 11 – Módulos e fases das componentes harmônicas aplicadas a uma senoide de 60 Hz.

	Fundamental	3	5	7	9	11	13	15
Amplitude (%)	100	2	2,9	0,3	0,6	0,5	0,2	0,1
Fase (°)		83	168	-49	160	173	-1	86

Fonte: CHOWDHURY, 1999 [103].

Os ensaios foram realizados no laboratório de alta tensão (LAT/DEE/UFCG), e foi utilizada uma fonte de tensão programável da marca Califórnia e de referência Lx 3000, para gerar as componentes harmônicas controladas. Na Figura 56 é apresentada uma foto da montagem experimental do ensaio para avaliar a influência das componentes harmônicas no erro de fase.

Figura 56 - Foto da montagem experimental do ensaio para avaliar a influência das componentes harmônicas no erro de fase.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.10. Ensaio com o TC de Núcleo Misto para Serviços de Medição e Proteção

O TC misto foi construído para apresentar a viabilidade da sua aplicação tanto em TC para serviços de medição quanto serviços de proteção. Portanto, foram realizados ensaios para os dois tipos de serviços. Os TC utilizados são os TC nº 6, 7, 8 e 9.

O 1º ensaio foi realizado com o TC para serviços de medição, com uma carga de 1,05 Ω . No qual, a corrente primária é de 10% e 100% da corrente nominal.

O 2º ensaio foi realizado com o TC para proteção, com a mesma carga de 1,05 Ω . Nos ensaios para serviços de proteção foram avaliadas a saturação por corrente alternada e a saturação por corrente contínua.

5. Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1. Caracterização Magnética dos Núcleos Toroidais

Na Tabela 12 são apresentados os resultados, obtidos de forma experimental, da permeabilidade magnética máxima e da densidade de saturação de fluxo magnético para os materiais submetidos aos ensaios.

Tabela 12 – Permeabilidade magnética máxima e densidade de saturação de fluxo magnético para diversos materiais submetidos aos ensaios.

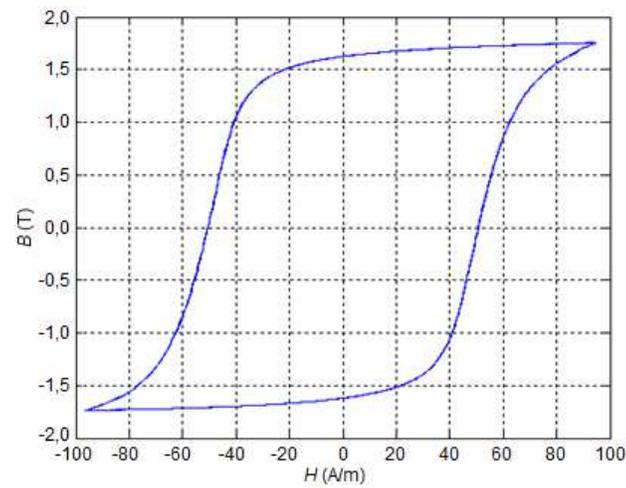
Núcleos Toroidais	60 Hz	
	μ_r máx	B_{SAT} (T)
Liga NANOPERM [®] M-033	30012	1,09
Liga NANOPHY [®] N3E1	39500	1,08
Liga NANOPHY [®] N3E2	102200	0,97
Liga NANOPHY [®] N3E3	179500	1,07
Liga FINEMET [®]	126700	1,11
Liga FeSi GO	39500	1,68
Núcleo Misto FINEMET [®] /FeSi	79155	1,41

Fonte: Produzida pelo autor.

A partir dos resultados mostrados na Tabela 12, pode-se destacar que as ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética igual ou superior a liga FeSi de grãos-orientados. Porém, o fluxo de saturação é menor que a liga de FeSi de grãos-orientados, o que afeta o emprego das ligas nanocristalinas como núcleos de TC de proteção.

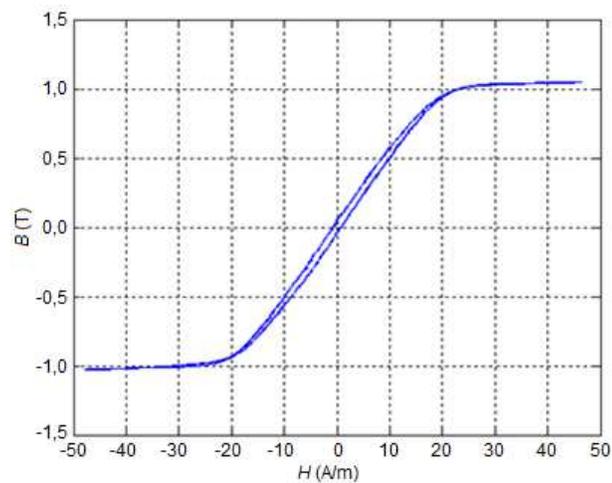
Nas figuras 52 e 53 são apresentados os laços B versus H da liga de FeSi e da liga nanocristalina N3E1. A partir da análise dessas figuras pode-se observar a densidade de fluxo remanescente e as perdas por histerese. O fluxo remanescente da liga de FeSi é da ordem de 1,6 T enquanto que nas ligas N3E1 o fluxo é na ordem de 0,06 T. As perdas magnéticas da liga nanocristalina em questão também é menor que as perdas da liga de FeSi.

Figura 57 – Laço B versus H para a liga de FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

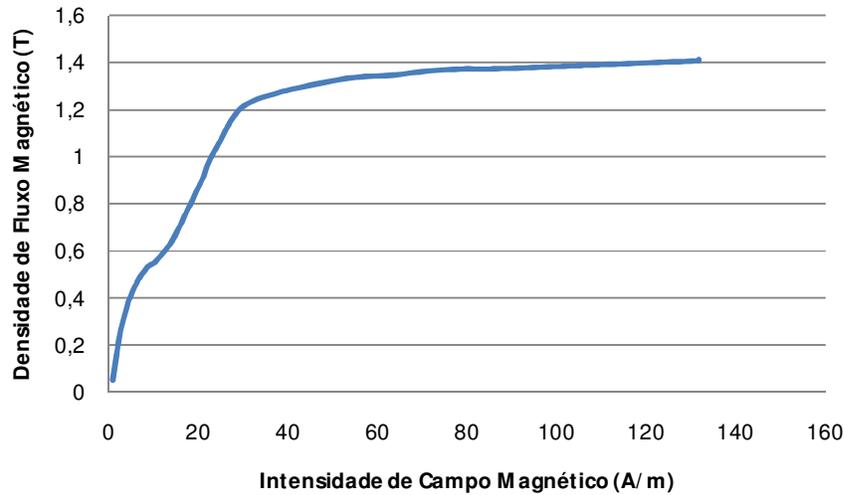
Figura 58 – Laço B versus H para a liga nanocristalina de nome comercial N3E1.



Fonte: Produzida pelo autor.

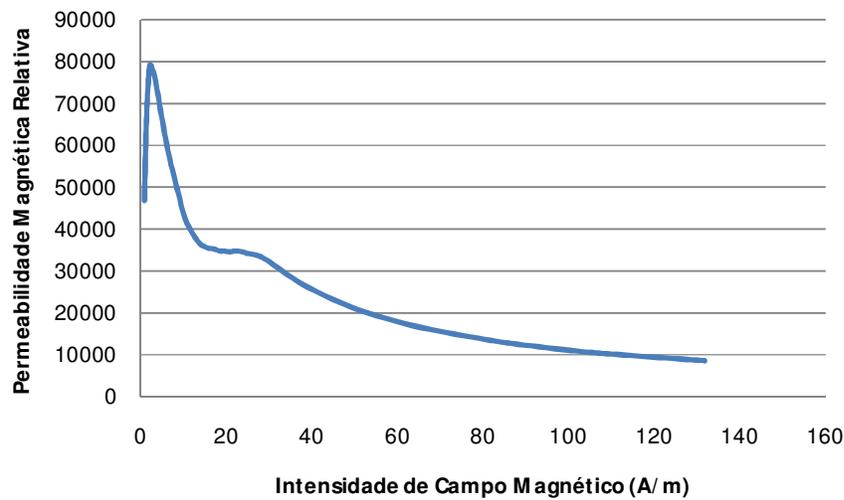
As características magnéticas de um núcleo toroidal composto por dois materiais distintos, nesse caso, uma liga FINEMET[®] e uma liga de FeSi, apresentam diferenças com relação a caracterização desses ligas em separado. Na Figura 59 e na Figura 60 são apresentadas as curvas de magnetização inicial e permeabilidade magnética para o núcleo misto.

Figura 59 – Curva de magnetização inicial do núcleo misto composto por um núcleo de FeSi e outro de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 60 – Curva de permeabilidade magnética relativa do núcleo misto composto por um núcleo de FeSi e outro de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.

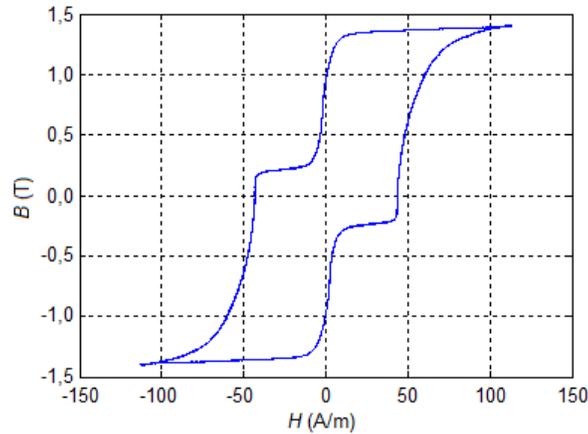


Fonte: Produzida pelo autor.

Com a análise das Figuras 54 e 55, pode-se observar uma descontinuidade das curvas, tal fato deve-se a saturação da liga nanocristalina, a qual possui uma menor densidade de fluxo magnético. Portanto, para uma baixa densidade de fluxo magnético as características da liga nanocristalina prevalecem, enquanto que para uma densidade

magnética mais elevada, as características da liga de FeSi é que se torna evidente. Tal descontinuidade é retratada no laço B versus H do núcleo misto, Figura 61.

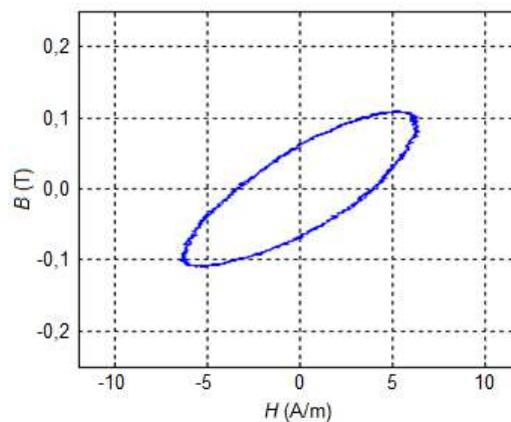
Figura 61 – Laço de B versus H para o núcleo misto.



Fonte: Produzida pelo autor.

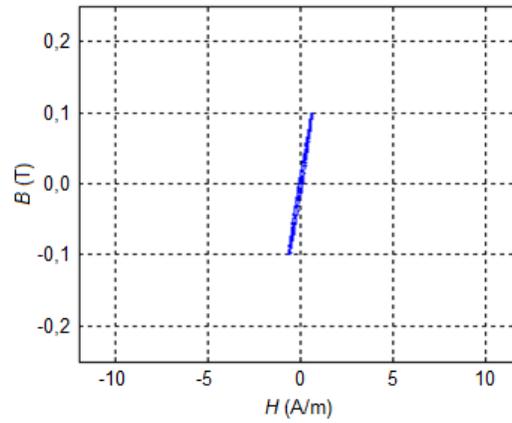
Para avaliar a característica do laço B versus H para uma baixa densidade de saturação, um núcleo de FeSi, um núcleo de liga FINEMET® e um núcleo misto foram submetidos a uma densidade de saturação de 0,1 T e 0,2 T. Os resultados são apresentados das figuras 57 a 62. Pode-se perceber com a análise das figuras que para uma baixa densidade de saturação as características predominantes são da liga nanocristalina.

Figura 62 - Laço B versus H da liga de FeSi para uma densidade de saturação de 0,1 T.



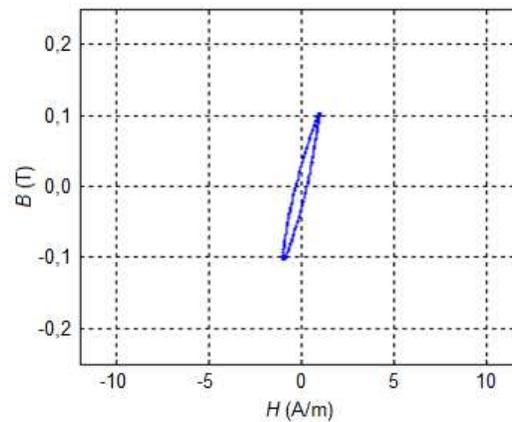
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 63 - Laço B versus H da liga FINEMET[®] para uma densidade de saturação de 0,1 T.



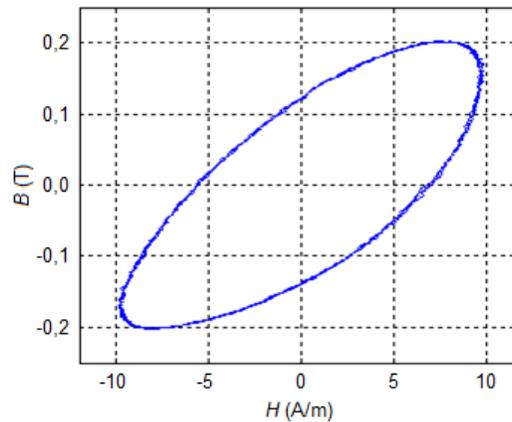
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 64 - Laço B versus H do núcleo misto para uma densidade de saturação de 0,1 T.



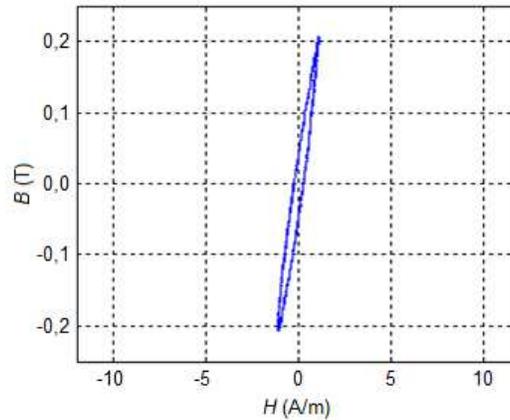
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 65 - Laço B versus H da liga de FeSi para uma densidade de saturação de 0,2 T.



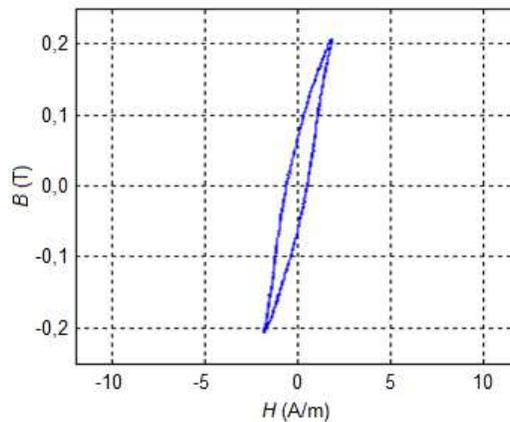
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 66 - Laço B versus H da liga FINEMET[®] para uma densidade de saturação de 0,2 T.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 67 - Laço B versus H do núcleo misto para uma densidade de saturação de 0,2 T.

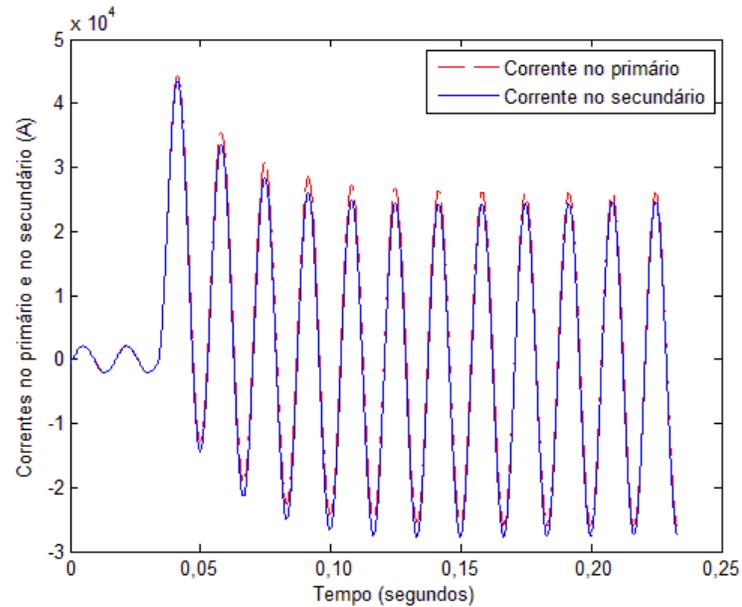


Fonte: Produzida pelo autor.

5.2. Simulação dos TC para serviços de proteção

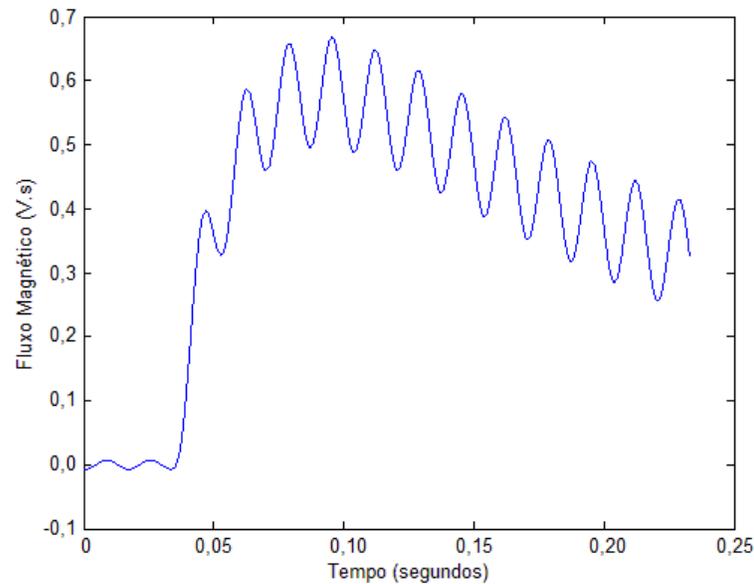
As simulações foram realizadas de modo que a única diferença é o material ferromagnético utilizado como núcleo do TC. Na Figura 68 são apresentadas as formas de onda da corrente no enrolamento primário, exibida em linha tracejada, e a forma de onda da corrente no enrolamento secundário, mostrada em linha contínua, para o TC com núcleo de FeSi. Pode-se observar com o auxílio da Figura 69 que o núcleo não apresenta saturação.

Figura 68 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga FeSi antes e após uma falta.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 69 - Fluxo de enlace do núcleo de liga FeSi antes e após uma falta.

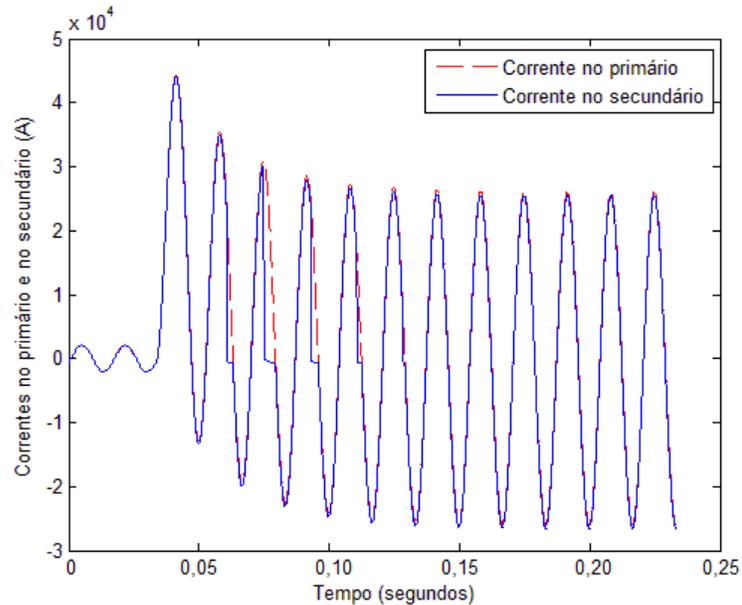


Fonte: Produzida pelo autor.

As formas de ondas das correntes e do fluxo de enlace da liga nanocristalina FINEMET[®] são mostradas na Figura 70 e na Figura 71. Com a análise das figuras observa-se que devido ao fato de a densidade de fluxo de saturação da liga FINEMET[®] ser mais baixa, o núcleo entra em saturação, distorcendo a forma de onda da corrente no secundário.

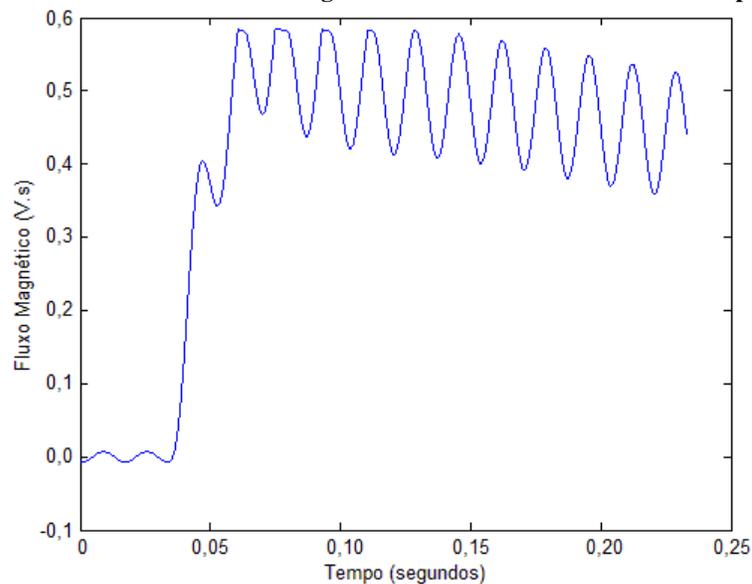
O mesmo comportamento da liga nanocrystalina FINEMET[®] foi verificado nas demais ligas nanocrystalinas sob estudos.

Figura 70 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocrystalina FINEMET[®] antes e após uma falta.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 71 - Fluxo de enlace do núcleo de liga nanocrystalina FINEMET[®] antes e após uma falta.

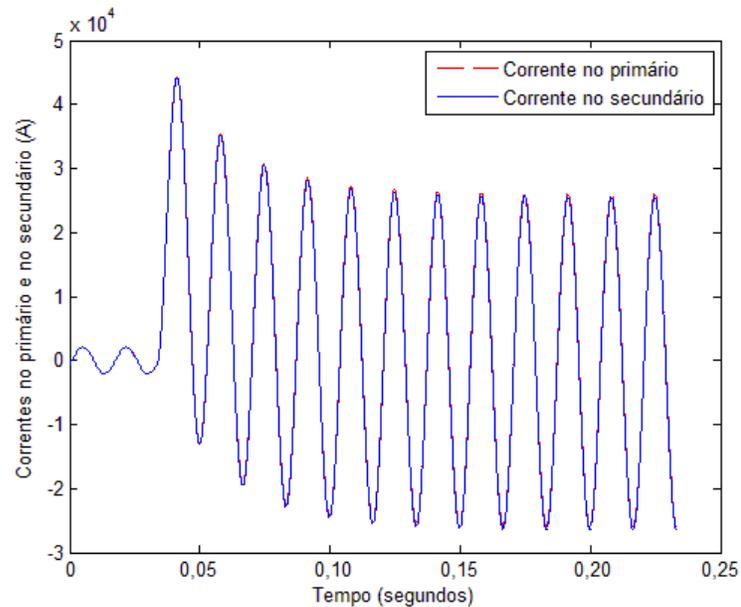


Fonte: Produzida pelo autor.

Nas simulações realizadas as áreas das secções transversais dos diversos núcleos são iguais. No entanto, uma das alternativas para aumentar o fluxo de enlace da saturação é aumentar a área da secção transversal. Foram realizadas simulações com os núcleos constituídos por liga nanocrystalinas com o dobro da área da secção transversal de um

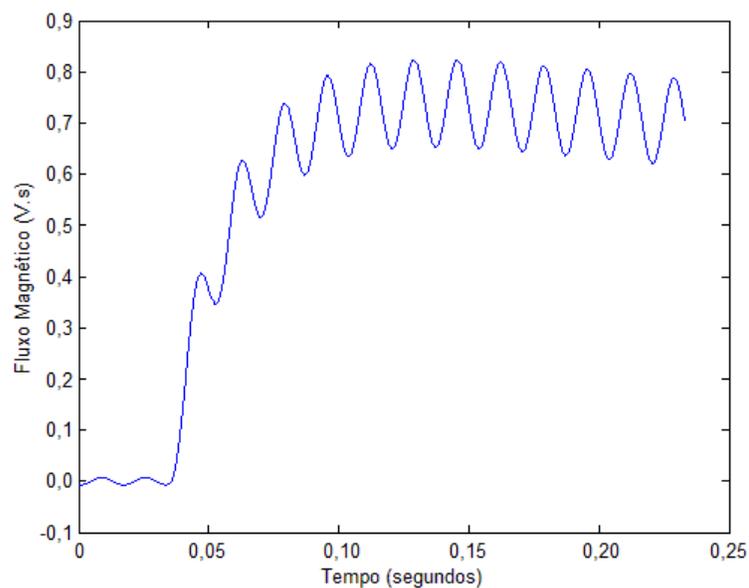
núcleo com liga de FeSi. Na Figura 72 são exibidas as formas de ondas das correntes e na Figura 73 é exposto o fluxo de enlace para um núcleo com liga nanocristalina FINEMET®. Pode-se perceber que a corrente no secundário não apresentou sinais da saturação do núcleo, o que pode ser comprovado pela análise da Figura 73.

Figura 72 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta, sendo o núcleo com o dobro da área da secção transversal.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 73 - Fluxo de enlace do núcleo de liga nanocristalina FINEMET® antes e após uma falta, sendo o núcleo com o dobro da área da secção transversal.



Fonte: Produzida pelo autor.

Com os resultados das simulações comprova-se que uma liga nanocristalina pode ser utilizada na confecção de um núcleo de TC destinado a serviços de proteção. Aumentar a área da secção do núcleo é uma alternativa para aumentar o fluxo de enlace, porém, na prática pode ocasionar um maior custo na fabricação dos núcleos. Uma alternativa é mediante o processamento de algoritmo de correção de correntes distorcidas no enrolamento secundário, o que é viável nos atuais IED (*Intelligent Electronic Devices*) [11,12,13,43,57].

5.3. Simulação da Saturação com a Presença de um Fluxo Remanescente

A simulação da saturação com a presença de um fluxo remanescente foi realizada de modo similar às simulações realizadas para a saturação por corrente contínua. No entanto, para essas simulações cada núcleo deve conter um fluxo remanescente. O fluxo remanescente adotado nas simulações corresponde ao fluxo remanescente (B_r), obtido quando o núcleo está na região de saturação.

O fluxo de enlace remanescente (λ_r) foi obtido de forma experimental, com o auxílio do laço B versus H . Os resultados são exibidos na Tabela 13. O fluxo de enlace foi inserido de modo a proporcionar o pior caso, na qual a polaridade do fluxo remanescente tem a mesma polaridade da corrente de falta.

Tabela 13 - Fluxos remanescente para os núcleos sob ensaios.

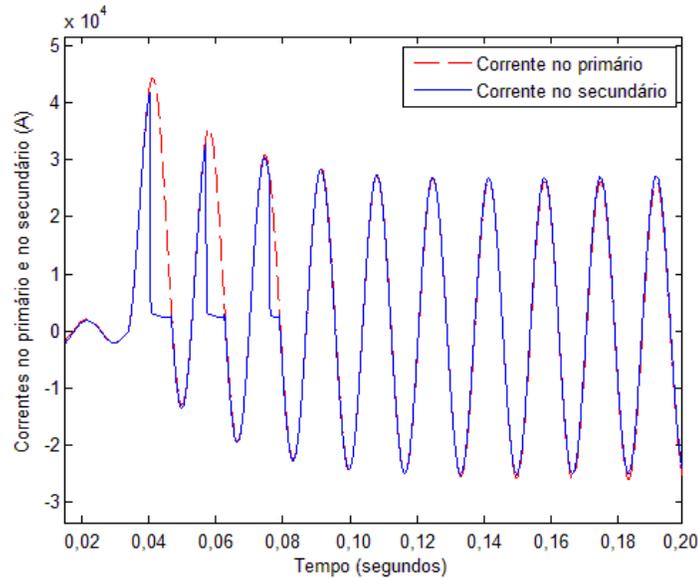
Núcleo	B_r (T)	λ_r (V.s)
Liga FeSi GO	1,62	0,81
Liga FINEMET [®]	0,24	0,12
Liga NANOPERM [®] (M-033)	0,07	0,035
Liga NANOPHY [®] (N3E1)	0,05	0,025
Liga NANOPHY [®] (N3E2)	0,20	0,10
Liga NANOPHY [®] (N3E3)	0,52	0,26

Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 74 e na Figura 75 são mostradas as formas de onda das correntes primária e secundária para os TC com núcleo de liga FeSi e liga nanocristalina NANOPHY[®] N3E1. Com a análise das figuras, percebe-se que a presença do fluxo remanescente influencia as formas de onda das correntes medidas no enrolamento secundário. Tal fato tem um maior destaque nos ensaios com as ligas nanocristalinas M-

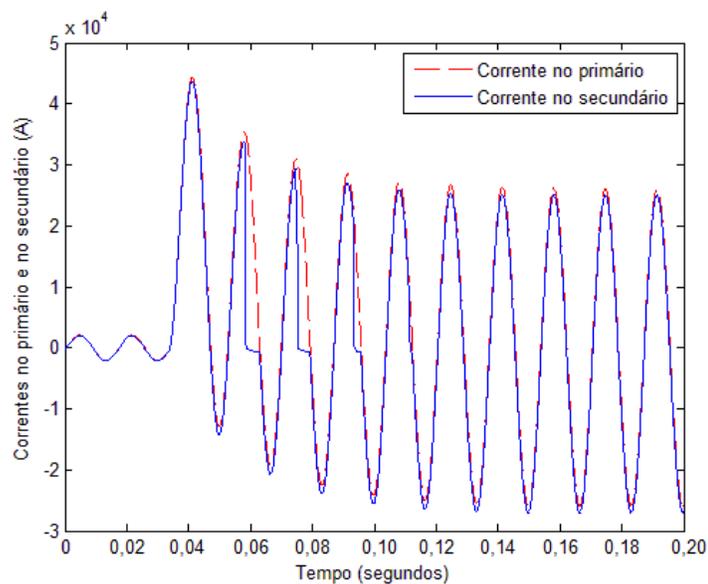
033 e N3E1, na qual a corrente secundária apresenta uma distorção menor que o núcleo de FeSi, mesmo com as ligas nanocristalinas possuindo uma menor densidade de fluxo de saturação. As menores distorções apresentadas pelas ligas M-033 e N3E1 decorre dos baixos fluxos remanescente apresentados por essas duas ligas nanocristalina. Ligas com baixo fluxo remanescente pode vir a ser utilizado em substituição aos TC com entreferro, o que garante a maior permeabilidade magnética e, portanto, um menor erro de fase.

Figura 74 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga FeSi antes e após uma falta com a presença de um fluxo remanescente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 75 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina N3E1 antes e após uma falta com a presença de um fluxo remanescente.



Fonte: Produzida pelo autor.

5.4. Avaliação do Tamanho e Massa dos TC

Na Tabela 14 são apresentadas as áreas geométrica e efetiva e as massas dos núcleos de ligas nanocristalina e FeSi.

Tabela 14 – Áreas geométrica e efetiva e massas dos núcleos sob ensaio.

Material do Núcleo	Área Geométrica (mm ²)	Área Efetiva (mm ²)	Massa (g)
FINEMET [®]	439,025 ± 0,014	320,488 ± 0,014	41,544 ± 0,01
FeSi	359,304 ± 0,014	341,339 ± 0,014	39,695 ± 0,01

Fonte: Produzida pelo autor.

Observando-se a Tabela 1, verifica-se que mesmo o núcleo de liga FINEMET[®] possuindo uma maior área geométrica, a sua área efetiva é menor que o núcleo de FeSi. Devido ao fator de empilhamento, o núcleo com liga nanocristalina possui uma área geométrica cerca de 30% maior que um núcleo de FeSi, para uma mesma área efetiva. No entanto, a massa do núcleo nanocristalino não aumenta nessa mesma proporção. Na Tabela 14, pode-se perceber que mesmo com as diferenças das áreas geométricas, as massas dos núcleos apresentaram valores próximos. Portanto, um núcleo de liga nanocristalina possui uma massa em torno de 10% maior que um núcleo de FeSi, para uma mesma área efetiva e mesmo comprimento médio.

No caso de dobrar a área da seção transversal do núcleo de um TC com liga nanocristalina, para ser utilizado como TC para serviços de proteção, o núcleo do TC apresenta uma área geométrica 260% maior que a área de um TC com FeSi e uma massa 2,2 vezes maior.

5.5. Ensaio com TC para Medição

Os resultados experimentais dos erros de fase estão apresentados na Tabela 15 e na

Tabela 16.

Tabela 15 - Erros de fase dos TC sob ensaios com uma corrente de 10% I_N .

	Erro (°)	Desvio padrão
FeSi	3,598	0,056
NANOPHY [®] N3E1	1,571	0,068
NANOPHY [®] N3E2	0,383	0,066
NANOPHY [®] N3E3	0,386	0,069

Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 16 - Erros de fase dos TC sob ensaios com uma corrente de 100% I_N .

	Erro (°)	Desvio padrão
FeSi	1,796	0,022
NANOPHY [®] N3E1	1,096	0,017
NANOPHY [®] N3E2	0,270	0,025
NANOPHY [®] N3E3	0,271	0,017

Fonte: Produzida pelo autor.

De acordo com a análise das tabelas 5 e 6, pode-se observar que a medida na qual a permeabilidade magnética dos núcleos magnéticos aumenta, diminui o erro de fase dos TC sob ensaio.

5.6. Influência da Carga Conectada ao Secundário

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os TC compostos por: FeSi, N3E1, N3E2 e N3E3.

Tabela 17 – Erro de fase dos núcleos de FeSi e as ligas nanocristalinas N3E1, N3E2 e N3E3.

Curto Circuito					
FeSi	0,779				
N3E1	0,273				
N3E2	0,124				
N3E3	0,079				
Carga com fp = 1					
	25%	50%	75%	100%	125%
FeSi	1,666	2,366	2,666	2,826	3,196
N3E1	0,609	0,996	1,226	1,396	1,796
N3E2	0,206	0,297	0,342	0,391	0,428
N3E3	0,180	0,254	0,344	0,363	0,409
Carga com fp = 0,9					
	25%	50%	75%	100%	125%
FeSi	1,096	1,396	1,796	1,796	2,186
N3E1	0,536	0,778	0,996	1,096	1,506
N3E2	0,171	0,210	0,272	0,270	0,347
N3E3	0,134	0,202	0,225	0,271	0,341
Carga com fp = 0,5					
	25%	50%	75%	100%	125%
FeSi	0,670	0,634	0,592	0,467	0,595
N3E1	0,365	0,464	0,581	0,542	0,710
N3E2	0,122	0,123	0,132	0,117	0,132
N3E3	0,098	0,134	0,144	0,109	0,125

Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise da Tabela 17, pode-se verificar que o erro de fase aumenta na medida em que a carga aumenta em módulo. O erro também aumenta quando a carga apresenta uma maior componente resistiva, ou seja, quando aumenta o fator de potência. Tal comportamento comprova os diagramas fasoriais apresentados nas Figuras 24 e 25.

Com relação a comparação entre os TC com ligas nanocristalinas e com liga FeSi, pode-se observar que quanto maior a permeabilidade menor será a influência da carga nos erros de fase do TC.

Devido à impedância de um relé digital ser praticamente resistiva, o seu uso poderia aumentar o erro de ângulo de fase, no entanto, o módulo da impedância do relé digital é baixo. Portanto, os relés digitais e os IED não influenciam de forma considerável no erro de ângulo de fase do TC.

5.7. Influência das Componentes Harmônicas nos Erros de Fase dos TC

Na Tabela 18 são apresentados os erros de fase para os TC sob ensaios submetidos a distorções de corrente.

Tabela 18 – Erros de fase para os TC com núcleo de FeSi e N3E3 submetidos a distorções de corrente.

	FeSi		N3E3	
	Erro (°)	Desvio Padrão	Erro (°)	Desvio Padrão
60 Hz	1,069	0,051	0,070	0,048
60 Hz + 3 ^a h	0,872	0,028	0,090	0,028
60 Hz + 5 ^a h	0,709	0,026	0,143	0,018
60 Hz + 7 ^a h	0,665	0,032	0,059	0,027
60 Hz + 9 ^a h	0,599	0,017	0,126	0,021

Fonte: Produzida pelo autor.

Com a análise da Tabela 18 é possível verificar que na medida em que aumenta a frequência da componente harmônica, o erro de fase no TC com núcleo FeSi diminui. O que comprova o fato de ao aumentar a frequência, a reatância de magnetização aumenta e consequentemente diminui o erro de fase. No entanto, a partir da mesma tabela, pode-se verificar que os erros de fase da liga nanocristalina N3E3 permanecem praticamente inalterados. Tal fato deve-se a corrente de excitação já ser pequena, quando comparada com a corrente nominal, então essa diminuição da corrente de excitação provocada pelo aumento da frequência não afeta com significância o erro de fase.

Como esses experimentos foram realizados com correntes baixas, 100 mA, a corrente de excitação do TC com núcleo de FeSi é relativamente alta. Por esse motivo, que

ao aumentar a frequência da componente harmônica foi possível visualizar a diminuição dos erros de fase. Na prática, ou seja, com o TC operando com correntes elevadas, as correntes de excitação são baixas, e nesse caso a influência é praticamente desprezível.

Na Tabela 19 são mostrados os erros para os TC com núcleo de FeSi e liga nanocristalina N3E3, submetidos ao sinal apresentado na Tabela 11.

Tabela 19 – Erros de fase para os TC com núcleos de FeSi e N3E3 submetidos a um sinal distorcido.

	60 Hz		Sinal distorcido	
	Erro (°)	Desvio padrão	Erro (°)	Desvio padrão
FeSi	1,069	0,051	1,113	0,048
N3E3	0,070	0,048	0,083	0,055

Fonte: Produzida pelo autor.

Podem-se observar a partir da Tabela 19 que levando em consideração o desvio padrão dos erros de fase, os erros permanecem praticamente inalterados para os dois TC.

Esse mesmo ensaio foi realizado para mais quatro TC com núcleos de: FeSi, FINEMET[®], FINEMET[®] duplo e núcleo misto (FINEMET[®] + FeSi). Os resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Erros de fase para os TC com núcleos de FeSi, FINEMET[®], FINEMET[®] duplo e núcleo misto (FINEMET[®] + FeSi) submetidos a um sinal distorcido.

	60 Hz		Sinal distorcido	
	Erro (°)	Desvio padrão	Erro (°)	Desvio padrão
FeSi	0,948	0,067	0,862	0,044
Finemet	0,162	0,059	0,171	0,042
Finemet Duplo	0,065	0,062	0,076	0,051
Misto	0,178	0,062	0,114	0,043

Fonte: Produzida pelo autor.

Novamente pode-se perceber que os erros de fase de todos os TC permaneceram praticamente inalterados. Comprovando que o erro de fase é pouco afetado pelas componentes harmônicas.

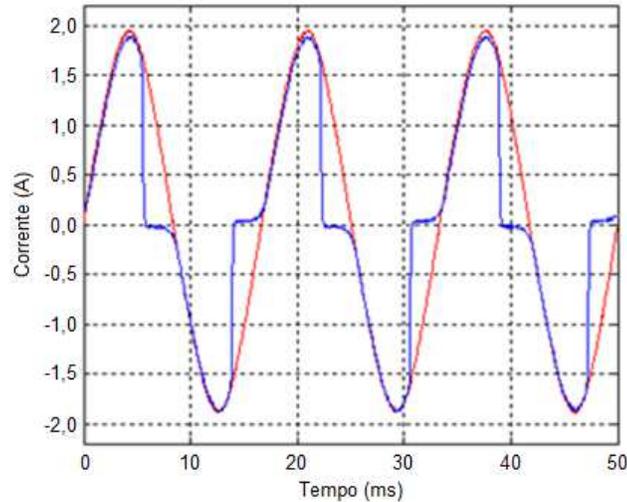
Outro fato que se deve levar em consideração são as perdas por corrente de Foucault, de acordo com a expressão 22, quanto maior a resistividade da liga menor serão as perdas. Portanto, devido à alta resistividade das ligas nanocristalinas, as perdas por correntes de Foucault são menores que as apresentadas nas ligas de FeSi.

5.8. Ensaio com TC para Proteção

Para avaliar o uso dos TC em serviços de proteção, os ensaios foram realizados com uma corrente no enrolamento primário de 20 vezes a corrente nominal, portanto, uma

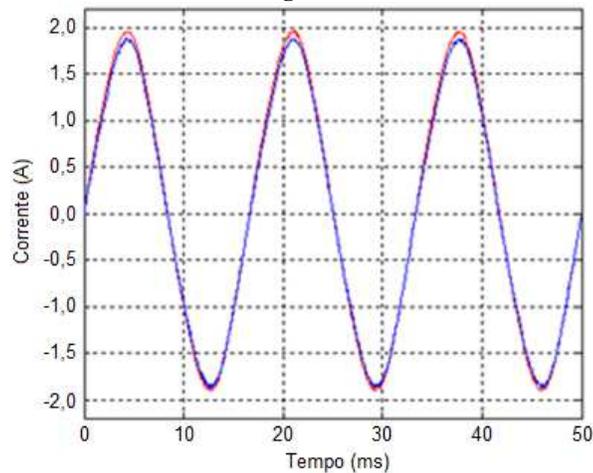
corrente de 2 A. Nas Figuras 71 e 72 são mostradas as correntes nos enrolamentos primário (vermelho) e secundário (azul) para os TC n° 3 e 5. A carga utilizada nos ensaios dos TC n° 3, 4 e 5 foi uma resistência de 1,7 Ω .

Figura 76 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC n° 3, constituído por um núcleo de liga nanocristalina N3E3.



Fonte: Produzida pelo autor.

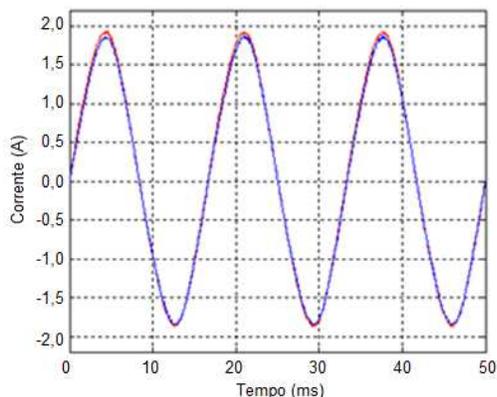
Figura 77 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC n° 5, constituído por um núcleo de liga FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

Pode-se perceber a presença da saturação no TC com núcleo de liga nanocristalina N3E3, enquanto que o TC com núcleo de FeSi está atuando na região linear. Com o intuito de aumentar o fluxo de enlace do TC com núcleo de liga nanocristalina N3E3, o TC n° 4 é constituído com dois núcleos N3E3 sobrepostos, dobrando a área da seção transversal, e conseqüentemente, o fluxo de enlace. Na Figura 78 são mostradas as correntes primária e secundária para o TC n° 4.

Figura 78 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC n° 4, dois núcleos de liga nanocristalina N3E3 sobrepostos.

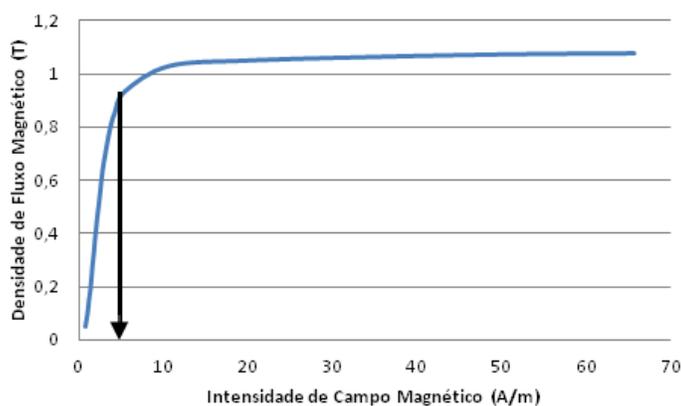


Fonte: Produzida pelo autor.

Com a análise da Figura 78, pode-se constatar que o aumento da área da seção transversal fez com que o TC com núcleo de liga nanocristalina N3E3 atuasse na região linear. Esse experimento comprovou as simulações realizadas. No entanto, esse resultado apenas pode ser constatado quando o TC está atuando com uma baixa intensidade de campo magnético.

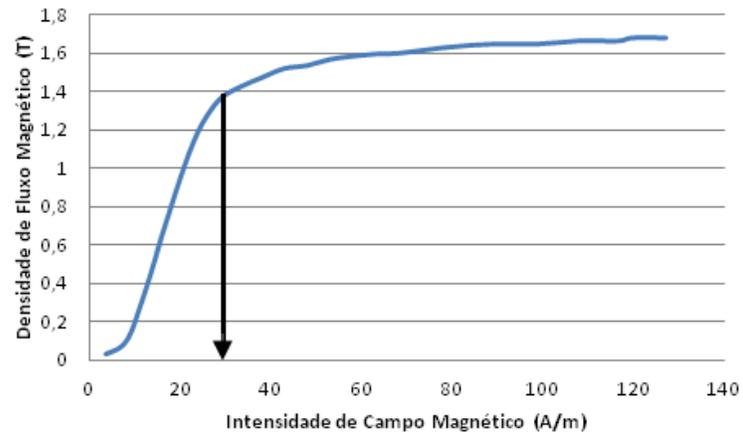
Nas Figuras 79 e 80 são apresentadas as curvas de magnetização inicial para liga nanocristalina N3E3 e a liga de FeSi. Com a análise das figuras, pode-se constatar que o ponto em que a liga nanocristalina atinge o joelho da curva de magnetização é de 5 A/m, enquanto, que a liga FeSi atinge o joelho em torno de 30 A/m. Ou seja, quando aumenta-se a área da seção transversal está aumentando o fluxo de enlace, no entanto a intensidade de campo magnético permanece a mesma. Portanto, em situações em que a intensidade de campo magnética não ultrapasse 5 A/m, a liga nanocristalina N3E3 pode ser utilizada em substituição a liga FeSi.

Figura 79 – Curva de magnetização inicial para a liga nanocristalina N3E3.



Fonte: Produzida pelo autor.

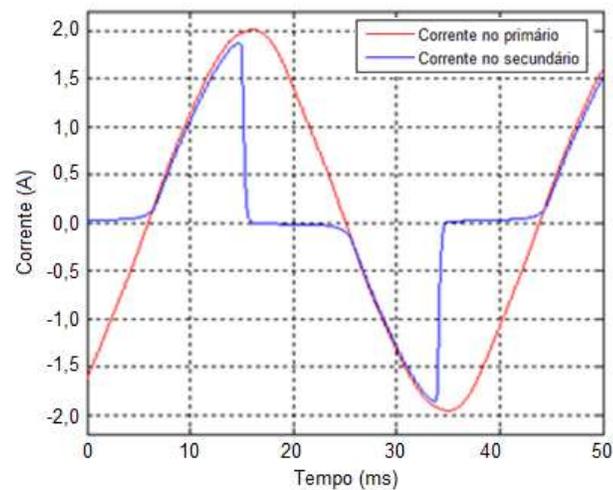
Figura 80 – Curva de magnetização inicial para a liga de FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

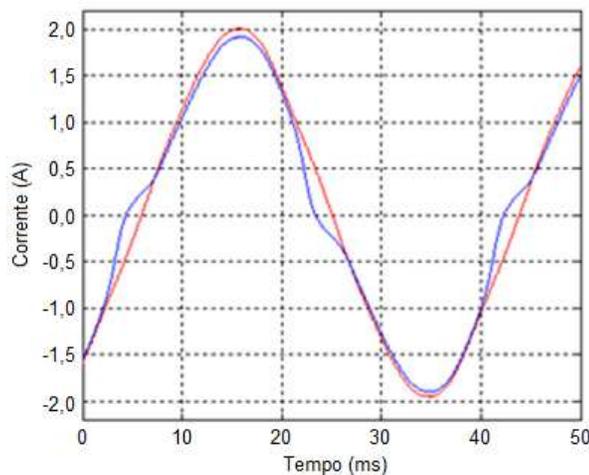
Para comprovar que a liga nanocristalina deve atuar na região linear para substituir uma liga de FeSi, foram realizados experimentos com os TC nº 6, 7 e 8. Nas Figuras 81 e 82, estão apresentados os resultados dos experimentos dos TC com núcleo de FeSi e liga nanocristalina FINEMET[®] (TC nº 8 e 6). Nos ensaios foram utilizados como carga uma resistência de 1,2 Ω .

Figura 81 - Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 4, composto por um núcleo liga nanocristalina FINEMET[®].



Fonte: Produzida pelo autor.

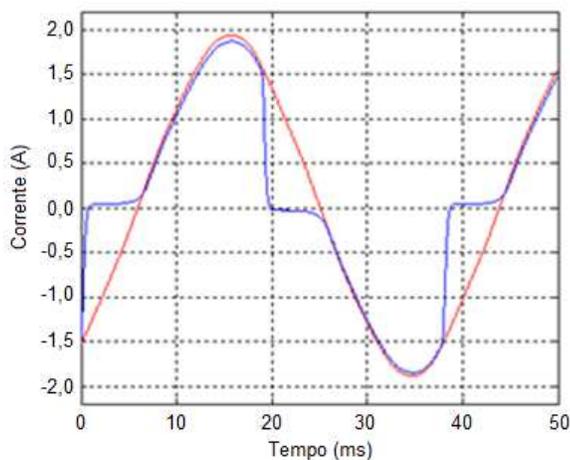
Figura 82 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC n° 6, composto por um núcleo de liga FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

Ao observar as Figuras 81 e 82, é possível constatar que o TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® apresenta um maior grau de saturação que o TC com núcleo de FeSi. Na Figura 83, é mostrado o ensaio para o TC n° 7, composto por dois núcleos de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.

Figura 83 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC n° 5, composto por dois núcleos de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos.



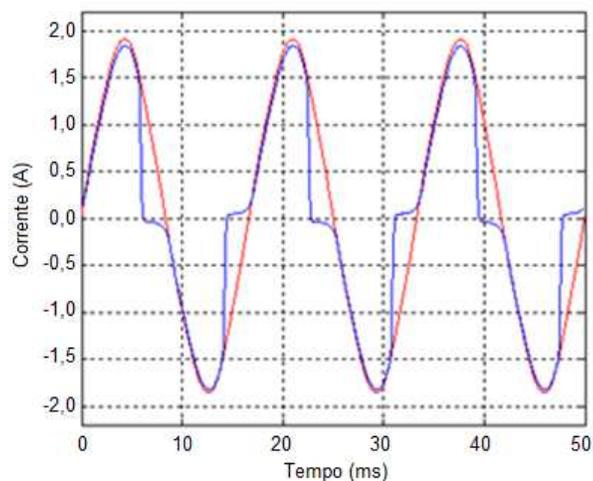
Fonte: Produzida pelo autor.

Com a análise das Figuras 81, 82 e 83, pode-se observar que aumentar a área da seção transversal não foi suficiente para obter os mesmos resultados do TC com núcleo de FeSi.

Para comprovar que ao manter a intensidade de campo magnético baixa, os TC com núcleos sobrepostos não apresentarão indícios de saturação, foram realizados ensaios

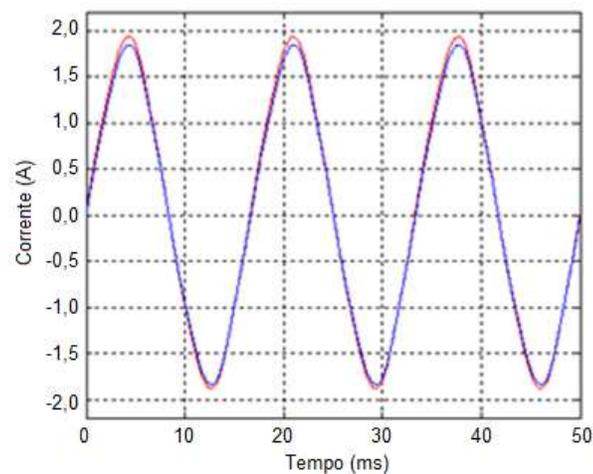
com os TC curto-circuitados. Nas Figuras 84, 85 e 86 são apresentados os ensaios para os TC nº 6, 8 e 7 curto-circuitados.

Figura 84 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 4, composto por um núcleo FINEMET® com o secundário curto-circuitado.



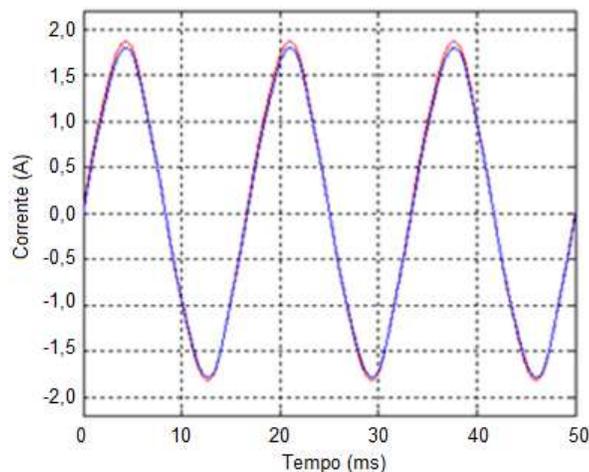
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 85 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC nº 6, composto por um núcleo de FeSi e secundário curto-circuitado.



Fonte: Produzida pelo autor.

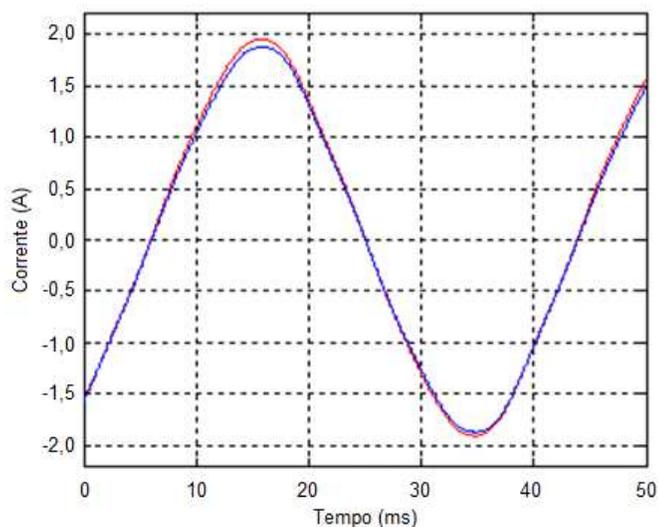
Figura 86 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do núcleo 5, composto por dois núcleos FINEMET® sobrepostos com o secundário curto-circuitado.



Fonte: Produzida pelo autor.

Diante dessa situação, foram realizados ensaios com o núcleo do TC sendo composto por dois núcleos sobrepostos, nesse caso cada núcleo é constituído por um material diferente (TC misto). O resultado para o TC misto, submetido a uma corrente de 2 A e a carga um resistor de $1,2 \Omega$, é apresentado na Figura 87.

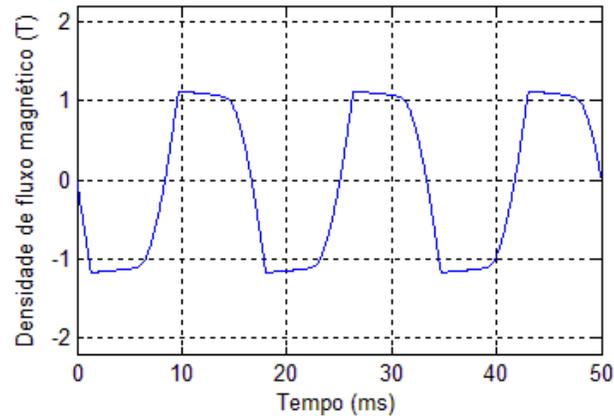
Figura 87 – Correntes nos enrolamentos primário e secundário do TC misto, composto por um núcleo FINEMET® e um núcleo de FeSi sobrepostos.



Fonte: Produzida pelo autor.

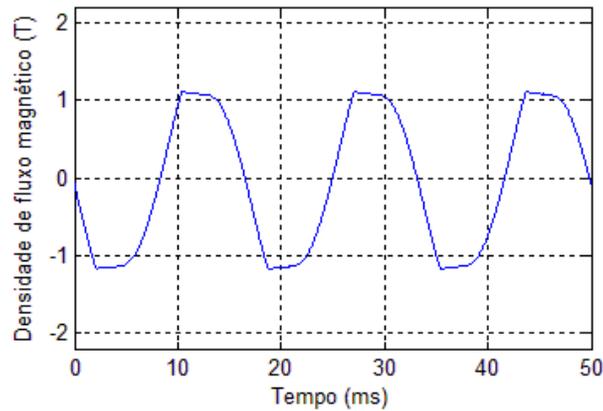
Analisando as Figuras 87 e 91, pode-se perceber que o TC com núcleo misto não apresenta saturação. Nas Figuras 88, 89, 90 e 91 são apresentadas as densidades de fluxo magnético obtidos de forma experimental para os TC nº 6, 7, 8 e 9.

Figura 88 - Densidade de fluxo magnético para o TC n° 4, núcleo de liga nanocristalina FINEMET® e corrente no enrolamento primário de 2 A.



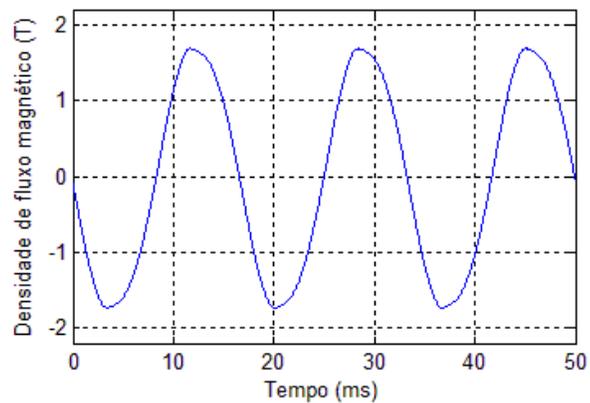
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 89 - Densidade de fluxo magnético para o TC n° 5, composto por dois núcleos de liga nanocristalina FINEMET® sobrepostos e corrente no enrolamento primário de 2 A.



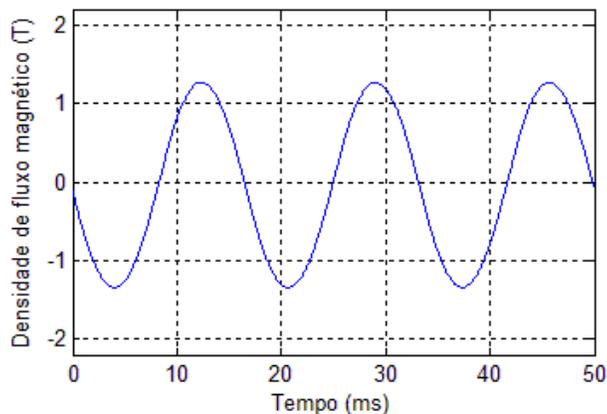
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 90 - Densidade de fluxo magnético para o TC n° 6, núcleo de FeSi e corrente no enrolamento primário de 2 A.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 91 - Densidade de fluxo magnético para o TC com núcleo misto, composto por um núcleo de liga FeSi e outro de liga FINEMET[®] sobrepostos e corrente no enrolamento primário de 2 A.



Fonte: Produzida pelo autor.

Com a análise das densidades de fluxo magnético fica comprovado que o TC misto está atuando na sua região linear, e por esse motivo não apresenta nenhuma distorção.

5.9. Ensaios com o TC de Núcleo Misto para Serviços de Medição e Proteção

Nas Tabelas 19 e 20 são apresentados os erros de fase, para os TC n° 6, 7, 8 e 9, submetidos a uma corrente primária de 10% e 100% da corrente nominal. Pode-se constatar pela análise das tabelas que o TC misto possui praticamente o mesmo erro dos TC com núcleo de liga nanocristalina. Portanto, pode ser usado para serviços de medição com a mesma vantagem, que é a diminuição do erro de ângulo de fase.

Tabela 21 - Erro de fase para os núcleos sob ensaio com 10% da corrente nominal, 10 mA.

	Erro (°)	Desvio Padrão
TC n° 8 - FeSi	2,227	0,294
TC n° 6 - FINEMET	0,113	0,099
TC n° 7 - FINEMET Duplo	-0,038	0,048
TC n° 9 - FINEMET/FeSi	0,248	0,083

Fonte: Produzida pelo autor.

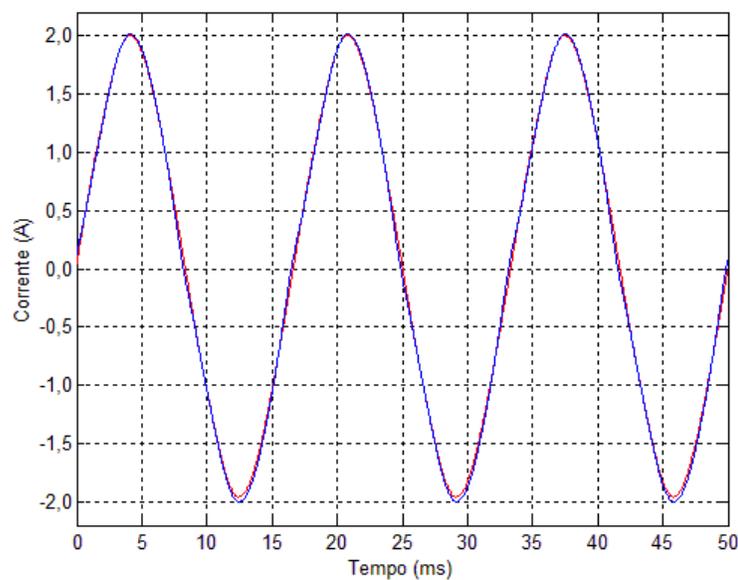
Tabela 22 - Erro de fase para os núcleos sob ensaio com 100% da corrente nominal, 100 mA.

	Erro (°)	Desvio Padrão
TC nº 8 - FeSi	0,781	0,031
TC nº 6 - FINEMET	0,229	0,024
TC nº 7 - FINEMET Duplo	0,151	0,025
TC nº 9 - FINEMET/FeSi	0,170	0,021

Fonte: Produzida pelo autor.

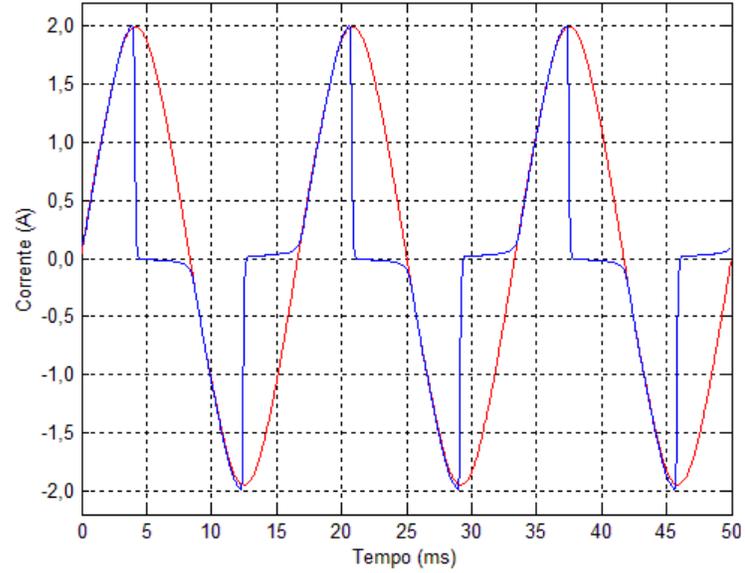
Nas Figura 92, 93, 94 e 95 são apresentadas as correntes primária e secundária dos TC, para a saturação por corrente alternada, ou seja, corrente no enrolamento primário de 2 A. Com a análise das Figuras citadas, pode-se afirmar que o núcleo misto não apresenta os efeitos da saturação.

Figura 92 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga FeSi.



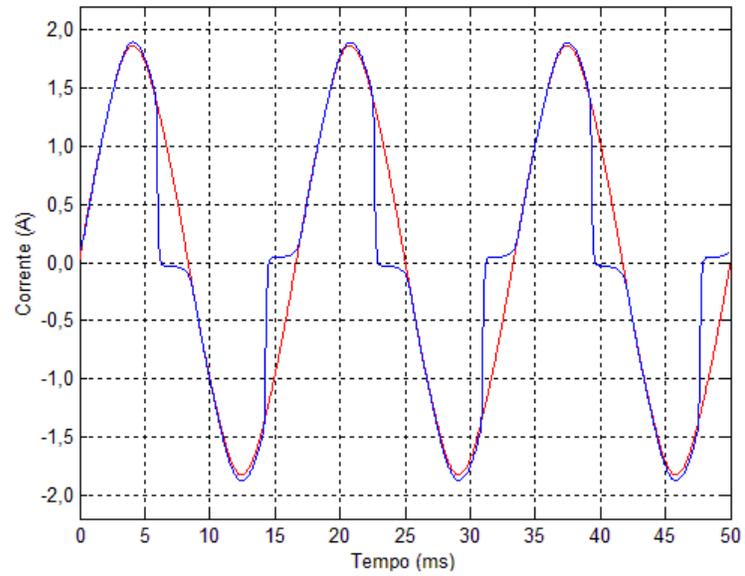
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 93 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET®.



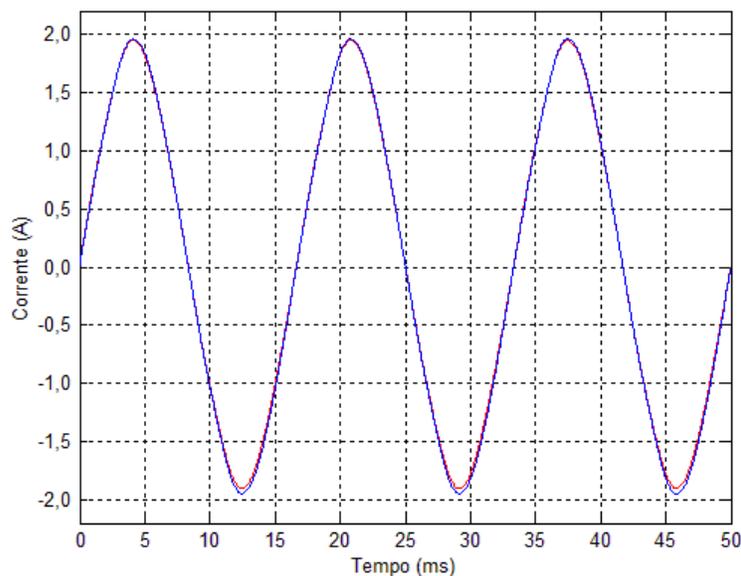
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 94 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET® com o dobro da área da secção magnética.



Fonte: Produzida pelo autor.

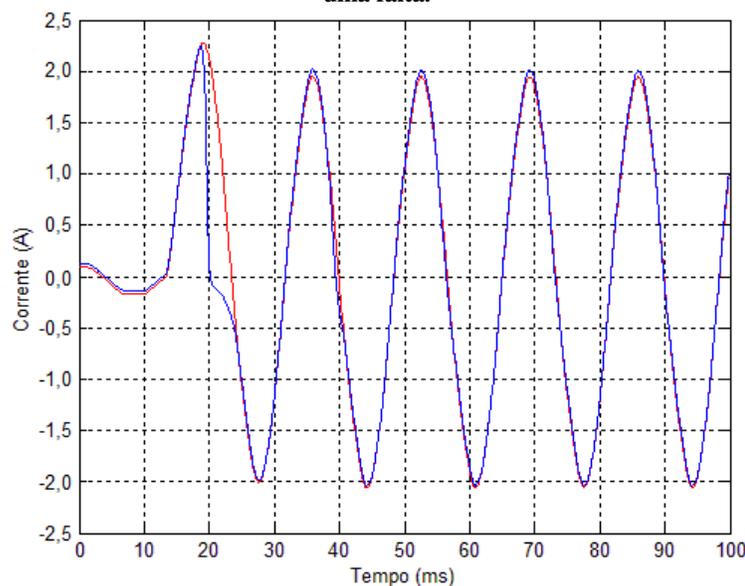
Figura 95 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo misto, um núcleo de liga nanocristalina FINEMET® e outro de FeSi.



Fonte: Produzida pelo autor.

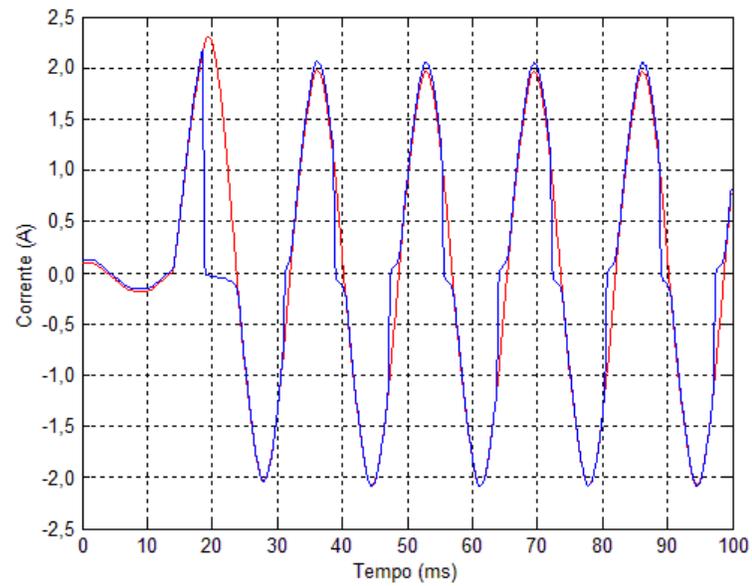
Já nas Figura 96, 97, 98 e 99 são apresentadas as formas de onda das correntes antes e após a ocorrência de uma falta, exemplificando a saturação por componente CC. Com a análise das figuras, novamente pode perceber que o TC misto possui resultados similares ao TC com liga FeSi. Portanto, pode-se concluir que o TC misto alia as qualidades da liga nanocristalina, no que se diz respeito à diminuição do erro de fase, com a qualidade da liga de FeSi, que é a alta densidade de saturação.

Figura 96 - Correntes primária e secundário do TC com núcleo de FeSi, antes e após a ocorrência de uma falta.



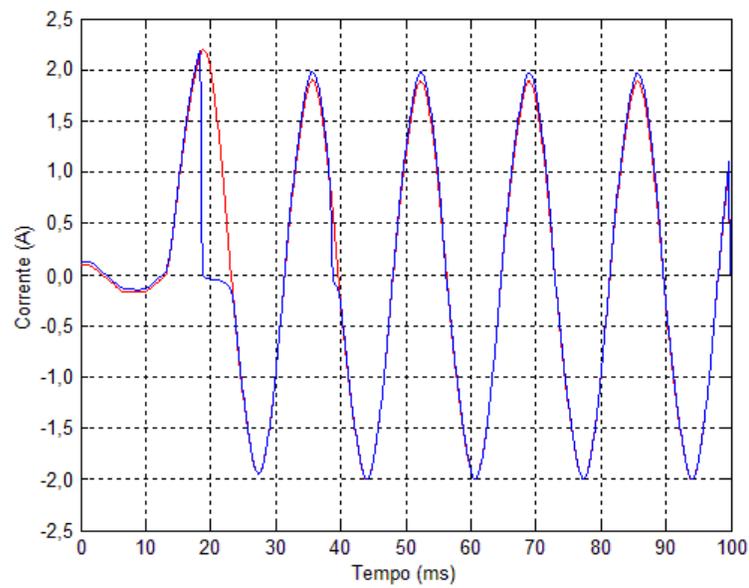
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 97 - Correntes primária e secundária do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET[®], antes e após a ocorrência de uma falta.



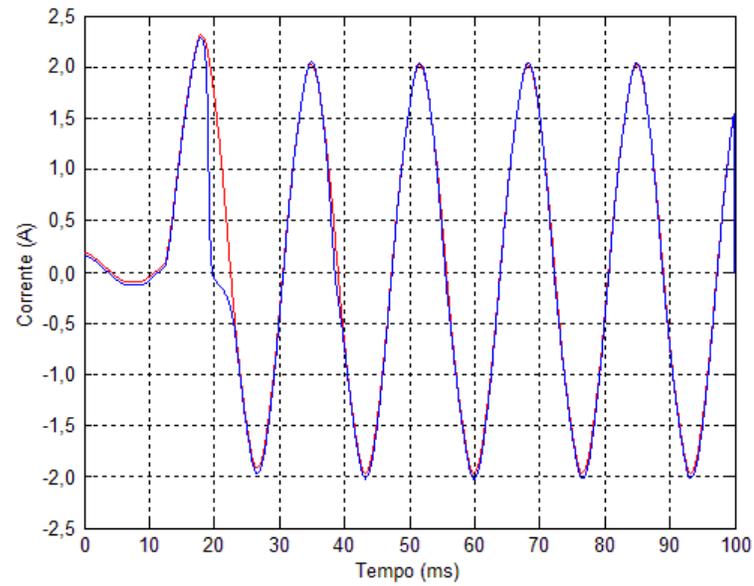
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 98 - Correntes primária e secundária do TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET[®] com o dobro da área da seção transversal, antes e após a ocorrência de uma falta.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 99 - Correntes primária e secundária do TC com núcleos sobrepostos, um núcleo de liga nanocristalina FINEMET[®] e outro de FeSi, antes e após a ocorrência de uma falta.



Fonte: Produzida pelo autor.

6. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os procedimentos realizados no intuito de avaliar a possibilidade da utilização de ligas nanocristalinas no núcleo magnético de transformadores de corrente, os quais poderão ser utilizados para serviços de medição e proteção.

Tanto nos estudos teóricos quanto nos ensaios experimentais verificou-se que as ligas nanocristalinas apresentam algumas propriedades magnéticas superiores aos materiais magneticamente moles tradicionais, como as ligas de FeSi. Estas propriedades são: alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coerciva e baixas perdas magnéticas.

A alta permeabilidade magnética das ligas nanocristalinas facilita o processo de magnetização do núcleo, exigindo valores pequenos de corrente de excitação. Como o erro de fase do TC depende da corrente de excitação, quanto maior for a permeabilidade do material magnético utilizado, menor será o erro do TC. Nos ensaios experimentais realizados foi possível comprovar a diminuição do erro de fase quando a permeabilidade magnética do material aumenta. Nos ensaios, a liga N3E3 obteve o menor erro de fase, fato devido a sua permeabilidade relativa ser na ordem de 150.000, enquanto a liga de FeSi possui uma permeabilidade na ordem de 30.000.

Devido à variedade das cargas conectadas no enrolamento secundário do TC, foram realizados estudos teóricos e experimentais, para verificar a influência da carga no erro de ângulo fase do TC. Baseado nesses estudos, verificou-se que a medida a carga aumenta em módulo, os erros de fase aumentam, mesmo comportamento é verificado quando o fator de potência da carga se torna unitário. Como a variação da carga influencia na corrente de magnetização do núcleo, essa mudança de carga tem uma menor discrepância do erro de fase para os TC com núcleo de liga nanocristalina.

Como o sistema elétrico não opera em regime puramente senoidal, foi realizada uma análise da influência das componentes harmônicas no erro de ângulo de fase. Pode-se constatar que, devido aos níveis das harmônicas comumente presentes no sistema elétrico, não há uma variação considerável nos erros de fase. A corrente primária distorcida influencia na corrente de excitação do TC, como os TC com núcleo de liga nanocristalina apresentam baixos valores de corrente de excitação, tais TC não sofrem influência significativa de correntes primárias distorcidas. Com relação às perdas por correntes de

Foucault nos TC com núcleos de ligas nanocristalinas, essas ligas apresentam dois fatores que minimizam as perdas: a alta resistividade da liga e o baixo fator de empilhamento.

A partir das simulações e experimentos realizados é possível comprovar a viabilidade da utilização de ligas nanocristalinas na confecção de núcleos de TC para proteção. No entanto, como algumas dessas ligas nanocristalinas possuem densidade de saturação em torno de 1,1 T é preciso aumentar a área da secção transversal, o que aumenta os custos do projeto. No entanto, apenas aumentar a área da secção transversal não garante a utilização das ligas nanocristalina em substituição as liga de FeSi. Para garantir a viabilidade, os TC têm que estar funcionando na região linear, e devido a características magnéticas das ligas nanocristalinas, a sua intensidade de campo magnético é menor para uma mesma densidade de fluxo magnético. O que pode limitar a carga conectada ao secundário.

Uma alternativa para a utilização de ligas nanocristalinas como núcleos de TC para proteção é a confecção no núcleo misto. Na qual, o núcleo é composto por dois materiais diferentes, nesse caso, um núcleo de liga nanocristalina e outro de liga FeSi. A caracterização magnética do núcleo misto comprovou que esse novo núcleo possui propriedades magnéticas intermediárias entre cada núcleo isolado. Ou seja, o núcleo misto possui uma maior permeabilidade magnética quando comparado com a liga de FeSi ($\mu_r \approx 79000$), e possui uma maior densidade de fluxo de saturação ($B_s \approx 1,4$ T), quando comparado com a liga nanocristalina.

Quando o TC com núcleo misto está atuando como TC de medição, a densidade de fluxo de operação é baixa, e prevalecem as características da liga nanocristalina. No caso de uma corrente primária elevada, o núcleo nanocristalina entra em saturação e prevalece nesse caso as características da liga de FeSi. Nos experimentos realizados nessa tese, foi possível comprovar a viabilidade da utilização do TC com núcleo misto, tanto para serviços de medição quanto para serviços de proteção.

6.1. Trabalhos Futuros

Como continuação do estudo aqui apresentado, propõe-se:

1. Realizar o tratamento estatísticos dos erros impostos pelos circuitos e equipamentos eletrônicos utilizados nas medições;
2. Modelar o TC para aplicações com a presença de componentes harmônicas;
3. Aplicar os conceitos de erro amostral e erro composto;

4. Viabilizar a construção de um protótipo que possa ser utilizado em um sistema elétrico;
5. Integrar o TC com núcleo de liga nanocristalina com os algoritmos de correção de correntes distorcidas.

Referências

1. YOSHIZAWA, Y.; OGUMA, S.; YAMAUCHI, K. New Fe-Based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. **Journal of Applied Physics**, n. 64, p. 6044-6046, 1988.
2. YOSHIZAWA, Y. Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-Based alloys. **Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials**, v. 1, p. 51-62, 1999.
3. DUWEZ, P. Metallic glasses - Historical background. **Topics in Applied Physics**, v. 46, p. 19-23, 1981.
4. FILHO, A. F. F.; HOMRICH, R. P. Transformador de corrente com metal amorfo. **Anais do 3º Seminário sobre Materiais Magnéticos**, São Paulo, p. 163-185, 1991.
5. 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.
6. HOMRICH, R. P. Transformador de corrente utilizando metal amorfo. (**Dissertação de Mestrado**). **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 1990.
7. BATISTA, T. C. **Transformador de corrente com núcleo de liga nanocristalina para medição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica e Informática. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2010.
8. MEDEIROS FILHO, S. **Medição de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1976.
9. WRIGHT, A. Current transformers - Their transient and steady state performance. **Chapman and Hall**, 1968.
10. MEDEIROS, E. P. et al. Estudo de verificação da susceptibilidade dos transformadores de corrente à saturação, mediante a corrente de curto-circuito. **I SME - Seminário de Manutenção da Eletrosul**, Florianópolis, Setembro 2003.
11. KANG, Y. C. et al. Compensation of the Distortion in the Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a CT. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, 2004. ISSN 4.
12. WISZNIEWSKI, A.; REBIZANT, W.; SCHIEL, L. Correction of Current Transformer Transient Performance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, 2008. ISSN 2.
13. PAN, J.; VU, K.; HU, Y. An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, 2004. ISSN 4.
14. KONG, F. et al. High Bs Fe_{84-x}Si₄B₈P₄Cu_x (x = 0-1.5) nanocrystalline alloys with excellent magnetic softness. **Journal of Applied Physics**, v. 109, p. 1-3, 2011.
15. FAN, X. et al. Fe-Based nanocrystalline FeBCCu soft magnetic alloys with high magnetic flux magnetic. **Journal of Applied Physics**, v. 109, 2011.
16. 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.
17. OHTA, M.; YOSHIZAWA, Y. Recent progress in high Bs Fe-Based nanocrystalline

- soft magnetic alloys. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, v. 44, p. 1-6, 2011.
18. MAKINO, A. et al. New excellent soft magnetic FeSiBPCu nanocrystallized alloys with high Bs of 1.9 T from nanohetero-amorphous phase. **IEEE Transactions on Magnetic**, v. 45, p. 4302-4305, 2009.
 19. SLEMON, G. R. **Equipamentos Magnetelétricos**. Porto Alegre: Bookman, 2004.
 20. BATISTELA, N. J. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.
 21. PINHO, L. C. A. B. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [S.l.]. 2009.
 22. GROSSNER, N. R. **Transformer for Electronic Circuits**. 2ª Edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1983.
 23. LEE, R. **Electronic Transformers and Circuits**. 2ª. ed. [S.l.]: Inc. John Wiley & Sons, 1955.
 24. AMAR, M. **Caractérisation et prédiction des pertes dans les tôles fer silicium soumises à des tensions non-sinusoidales, application au cas de la MLI**. Tese de Doutorado, École Supérieure d'Électricité, Université Paris VI. [S.l.]. 1994.
 25. JILES, D. C.; ATHERTON, D. L. Ferromagnetic hysteresis. **IEEE Transactions on Magnetics**, p. 2183-2185, 1983.
 26. HAYT, W. H. **Eletromagnetismo**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos, 1983.
 27. LANDGRAF, F. J. G. et al. **Aços para Fins Elétricos**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. 1997.
 28. BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetics materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 1, p. 621-630, 1988.
 29. 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.
 30. 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.
 31. BERTOTTI, G. et al. On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe. **Journal de Physique**, v. 9, p. 385-388, 1985.
 32. GOURISHANKER, V. **Electro-Mechanical Energy Conversion**. Pennsylvania: International Textbook Company, 1965.
 33. SINNECKER, J. P. Materiais magnéticos doces e materiais ferromagnéticos amorfos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 22, n. 3, 2000.
 34. MARIANA, N. A.; MAY, J. E.; KURI, S. E. Ligas Finemet nanocrystalizadas a partir de precursores amorfos. **Revista Escola de Minas**, Abril/Junho 2004.
 35. GUEDES, C. J. Medidores de energia elétrica - especificação e padronização. **V Encontro Regional sobre Medição de Energia Elétrica**, 1988.
 36. IEC 60044-1. Instrument transformer - Part 1: Current transformers. **International Electrotechnical Commission: IEC**, 2003.
 37. MELLO, F. P. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Santa Maria: [s.n.], v. 7,

- 1979.
38. BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying - Principles and Applications**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2006.
 39. JÚNIOR, O. S. K. Saturação de transformadores de corrente - um estudo de caso. **VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle**, Rio de Janeiro, 28-01 Junho 2005.
 40. ASHTON, N. Protective transformers. In: MACDONALDS; JANE'S **Power System Protection**. [S.l.]: MacDonald and Co Ltd, 1975.
 41. DAVID, C. Y. et al. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 2, p. 189-194, 2001.
 42. BRUCE, R. G.; WRIGHT, A. Remanent flux in current-transformer cores. **Proceedings IEE**, v. 113, n. 5, p. 915-920, Maio 1966.
 43. SANTOS, E. M. **Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2011.
 44. VIAWAN, F. A. et al. Effect of current sensor technology on distance protection. **Power Systems Conference and Expositions**, p. 1-7, Março 2009.
 45. MAKINO, A. Nanocrystalline Soft Magnetic Fe-Si-B-P-Cu Alloys With High B of 1.8-1.9T Contributable to Energy Saving. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 4, p. 1331-1335, 2012.
 46. MAKINO, A. et al. FeSiBPCu nanocrystallins soft magnetic alloys with high Bs of 1.9 tesla produced by crystallizing hetero-amorphous phase. **Materials Transactions**, v. 50, p. 204-209, 2009.
 47. HOJO, T. **Transformadores para instrumentos**. Virtus Consultoria e Serviços Ltda. São Paulo, p. 48. 2005.
 48. IEEE STD. 519. IEEE Recommended Practices and Requerements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
 49. DUGAN, R. C. **Eletrical Power Systems Quality**. 2ª Edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
 50. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. **Procedimentos de rede: sub-módulo 2.8**, 2011.
 51. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**, 2012.
 52. CATALIOTTI, A. et al. Characterization of current transformers in the presence of harmonic distortion. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 2074-2078, 2008.
 53. CATALIOTTI, A. et al. A novel approach to current transformer characterization in the presence of harmonic distortion. **IEEE Transactons on Intrumentation and Measurement**, v. 58, n. 5, p. 1446-1453, 2009.
 54. CATALIOTTI, A. et al. Frequency response of measurement current transformers. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 1254-1258, 2008.
 55. BRITO, L. C. G. **Avaliação dos Erros dos Transformadores de Corrente em**

- medições de Sincrofasores e em suas Aplicações.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.
56. EDISON ELECTRIC INSTITUTE. **Handbook for Electricity Metering.** Washington: Edison Electric Institute, 2002.
 57. PEREIRA, F. A. **Modelagem de Transformadores de Corrente e Correção de Correntes Distorcidas no Enrolamento Secundário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica e Informática. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2012.
 58. GUERRA, F. C. F. **Modelos de Transformadores de Corrente para Estudos em Baixas Frequências.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica e Informática. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.
 59. HERZER, G. Grain structure and magnetism of nanocrystalline ferromagnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 25, p. 3327-3329, 1989.
 60. HASEGAWA, N.; SAITO, M. Soft magnetic properties of microcrystalline Co-M-C (M: group IVA approximately VIA elements) films with high thermal stability. **Journal of the Japan Institute of Metals**, v. 54, p. 1270-1278, 1990.
 61. KATAOKA, N. et al. Soft magnetic properties of bcc Fe-Au-X-Si-B (X = early transition metal) alloys with fine grain structure. **Transactions on the Japan Institute of Metals**, v. 30, p. 947-950, 1989.
 62. NAKANISHI, K.; SHIMIZU, O.; YOSHIDA, S. Magnetic properties of Fe-X-N (X = Zr, Hf, Nb, Ta) films. **Journal of Magnetic Society of Japan**, v. 15, p. 371-374, 1991.
 63. SUSUKI, K. et al. High saturation magnetization and soft magnetic properties of bcc Fe-Zr-B alloys with ultrafine grain structure. **Mater. Trans. JIM**, v. 31, p. 743-746, August 1990.
 64. FUJII, Y. et al. Magnetic properties of crystalline Fe-P-C-Cu-X alloys. **J. Appl. Phys.**, v. 70, p. 6241-6143, November 1991.
 65. MAKINO, A. et al. Low core loss of a bcc Fe₈₆Zr₇B₆Cu₁ alloy with nanoscale grain size. **Materials Transactions, JIM**, v. 32, n. 6, p. 551-556, 1991.
 66. SLAWSKA-WANIEWSKA, H. A.; GUTOWSKI, M.; LACHOWICS, H. K. Superparamagnetism in a nanocrystalline Fe-Based metallic glass. **Phys. Rev. B**, v. 46, p. 14594-14597, 1992.
 67. TOMIDA, T. Crystallization of Fe-Si-B-Ga-Nb amorphous alloy. **Materials Science and Engineering: A**, **A179-A180**, p. 521-525, 1994.
 68. DEGRO, J. et al. Magnetic properties of nanocrystalline FeCuNb(Sb/W)SiB alloys. **Transactions on Magnetics**, v. 30, n. 2, p. 499-501, 1994.
 69. LEE, J. S. et al. The magnetic properties of ultrathin FeBNbCu nanocrystalline alloy. **IEEE Transactions on Magnetic**, v. 31, n. 6, p. 3901-3903, 1995.
 70. PARK, J. Y. et al. The magnetic properties of ultrathin Fe-Al-Nb-B-Cu nanocrystalline alloys. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 32, n. 5, 1996.
 71. NAITOH, Y. et al. Applications of nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B (M = Zr, Nb) alloys. **NanoStructured Materials**, v. 8, n. 8, p. 987-995, 1997.
 72. WILLARD, M. A. et al. Structure and magnetic properties of (Fe_{0,5}Co_{0,5})₈₈Zr₇B₄Cu₁ nanocrystalline alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 84,

- n. 12, p. 6773-6777, 1998.
73. IWANABE, H. et al. Thermal stability of the nanocrystalline Fe-Co-Hf-B-Cu alloy. **Journal of Applied Physics**, v. 85, n. 8, p. 4424-4426, 1999.
 74. MITROVIC, N. S.; DJUKIC, S. R.; DJURIC, S. B. Crystallization of the Fe-Cu-M-Si-B (M = Nb, V) amorphous by direct-current joule heating. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 36, n. 5, p. 3858-3862, 2000.
 75. BORREGO, J. M. et al. Crystallization of Co-containing Finemet alloys. **Journal of Non-Crystalline Solids**, n. 287, p. 120-124, 2001.
 76. HASIAK, M. et al. Microstructure and magnetic properties of nanocrystalline Fe-Zr-B alloy. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 239, p. 506-508, 2002.
 77. MAKINO, A. et al. Structure and magnetic properties of (Co, Fe)-based nanocrystalline soft magnetic materials. **J. Appl. Phys.**, v. 91, n. 10, p. 8420-8422, 2002.
 78. MAKINO, A.; BITOH, T. As-quenched and nanocrystallized structure for Nb-poor Fe-Nb-B-P-Cu soft magnetic alloys melt spun in air. **J. Appl. Phys.**, v. 93, p. 6522-6524, 2003.
 79. YOSHIZAWA, Y. et al. Magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co-Cu-M-Si-B alloys (M: Nb, Zr). **Materials Science and Engineering A375-377**, p. 207-212, 2004.
 80. YOSHIZAWA, Y.; OGAWA, Y. Magnetic properties of high Bs nanocrystalline FeCoCuNbSiB alloys. **IEEE Transactions on Magnetic**, v. 41, n. 10, p. 3271-3273, 2005.
 81. BAHRAMI, A. et al. Structural and soft magnetic properties of nanocrystalline Fe₈₅Si₁₀Ni₅ powders prepared by mechanical alloying. **Materials Letters**, n. 60, p. 1068-1070, 2006.
 82. SHIH, J. C. et al. Grain growth process of two-phase nanocrystalline soft magnetic materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 304, p. 693-696, 2006.
 83. MAKINO, A. et al. Improvement of soft magnetic properties by simultaneous addition of P and Cu for nanocrystalline FeNbB alloys. **J. Appl. Phys.**, v. 101, p. 1-3, 2007.
 84. MURACA, D. et al. FINEMET type alloy without Si: structural and magnetic properties. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 320, p. 1639-1644, 2008.
 85. MAKINO, A. et al. New excellent soft magnetic FeSiBPCu Nanocrystallized alloys with high Bs of 1.9 T from nanohetero-amorphous phase. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 45, n. 10, 2009.
 86. GONZÁLES, A. et al. thermal and structural study of nanocrystalline Fe(Co)NiZrB alloys prepared by mechanical alloying. **Journal Materials Science**, n. 45, p. 557-561, 2010.
 87. FANLI, K. et al. Effect of P to B concentration ratio on soft magnetic properties in FeSiBPCu nanocrystalline alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 111, n. 7, p. 07A311-07A311-3, 2012.
 88. URATA, A. et al. Low core loss of non-Si quaternary Fe_{83.3}B₈P₈Cu_{0.7} nanocrystalline alloy with Bs of 1.7 T. **Journal of Applied Physics**, v. 111, n. 7, p. 07A335-07A335-3, 2012.

89. URATA, A. et al. Magnetic properties and structure of Fe_{83.3}-85.8B_{7.0}-4.5P₉Cu_{0.7} nanocrystalline alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 113, n. 17, p. 17A311-17A311-3, 2013.
90. WEN, Z. et al. Effect of magnetic field annealing on magnetic properties for nanocrystalline (Fe_{1-x}Cox)_{78.4}Si₉B₉nb_{2.6}Cu₁ alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 113, n. 17, p. 17A320-17A320-3, 2013.
91. TAKENAKA, K.; NISHIJIMA, M.; MAKINO, A. Effect of Metalloid Elements on the Structures and Soft Magnetic Properties in Fe_{85.2}Si_xB_{14-x-y}PyCu_{0.8} Alloys. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 50, p. 1-4, 2014.
92. ZHANG, Y.; SHARMA, P.; MAKINO, A. Effects of Cobalt Addition in Nanocrystalline Fe_{83.3}Si₄B₈P₄Cu_{0.7} Soft Magnetic Alloy. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 50, p. 1-4, 2014.
93. DRAXLER, K.; STYBLFKOVFI, R. Use of nanocrystalline materials for current transformer construction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, p. 447-448, 1996.
94. 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.
95. 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.
96. KWICZALA, J.; KASPERCZYK, B. Composite Cores in Current Transformers. **16th International Conference on Composite Materials**, Kyoto, 2007. 1-5.
97. YOSHIZAWA, Y. **Magnetic core for current transformer, current transformer and watt-hour meter**. US 2009/0184705 A1, 23 Julho 2009.
98. 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.
99. 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.
100. NBR 6856. Transformador de Corrente - Especificação. **Associação de Normas Técnicas: ABNT**, Rio de Janeiro, 1990.
101. NBR 6821. Transformador de Corrente - Método de Ensaio. **Associação de Normas Técnicas: ABNT**, 1992.
102. JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY - JCGM. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, n. 1, Setembro 2008.
103. CHOWDHURY, A. H.; GRADY, W. M.; FUCHS, E. F. An investigation of the harmonic characteristics of transformer excitation current under nonsinusoidal supply voltage. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, 1999.
104. STOUT, M. B. Curso básico de Medidas Elétricas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. 2, 1974.