



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

## **Transformador de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina para Medição**

Dissertação submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Proponente: Thiago de Carvalho Batista

Orientadores: Benedito Antonio Luciano e Raimundo Carlos Silvério Freire

Campina Grande, Agosto de 2010



B333t Batista, Thiago de Carvalho  
Transformador de corrente com nucleo de liga nanocristalina para medicaçao / Thiago de Carvalho Batista. - Campina Grande, 2010.  
52 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Eletrica e Informatica.

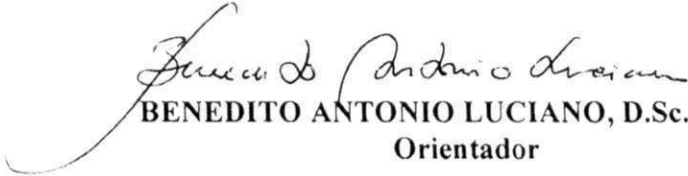
1. Transformador de Corrente 2. Novos Materiais Magneticos 3. Ligas Nanocristalinas 4. Sensores Magneticos 5. Dissertacao I. Luciano, Benedito Antonio, Dr. II. Freire, Raimundo Carlos Silverio, Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.314.224.8(043)

TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO DE LIGA NANOCRISTALINA  
PARA MEDIÇÃO

THIAGO DE CARVALHO BATISTA

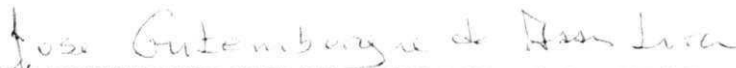
Dissertação Aprovada em 30.08.2010

  
BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG  
Orientador

  
RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Orientador

  
WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG  
Componente da Banca

  
FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, D.Sc., UFCG  
Componente da Banca

  
JOSÉ GUTEMBERGUE DE ASSIS LIRA, D.Sc., UFCG  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
AGOSTO - 2010

## DEDICATÓRIA

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

## AGRADECIMENTOS

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

Aos professores Raimundo Carlos Silvério Freire, José Gutemberg de Assis Lira, Edson Guedes e, principalmente, ao meu orientador Benedito Antonio Luciano, pela enorme paciência.

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 CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

À Hitachi Metals Ltd. (Japão) e à TOROID do Brasil pela doação dos núcleos toroidais.

À CHESF pela concessão de auxílios financeiros e experimentais para o enriquecimento de minha vida acadêmica e profissional.

## RESUMO

Neste trabalho são apresentadas algumas considerações sobre a aplicação de ligas nanocristalinas em núcleos toroidais de transformadores de corrente empregados para fins de medição. Tomando como base as propriedades eletromagnéticas desses materiais, 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 do transformador de corrente. A partir dos resultados obtidos, percebe-se que o emprego de ligas nanocristalinas nos núcleos desses equipamentos pode contribuir para a redução dos erros de fase, melhorando, dessa forma, a classe de exatidão.

## **ABSTRACT**

In this work is presented some considerations about the application of nanocrystalline alloys in toroidal cores for current transformers used for measurement purposes. Based on the electromagnetic properties of these materials, such as high relative magnetic permeability, saturation flux density of magnetic, high resistivity and low hysteresis losses, are discussed the ways in which these characteristics affect the performance of the current transformer. From these results, it can be concluded that the use of nanocrystalline alloys in the cores of these devices can contribute to the reduction of phase errors, improving thus the accuracy class.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	I
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	II
<b>RESUMO</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>SUMÁRIO</b> .....	V
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	VII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	IX
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	X
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
3.1. MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	3
3.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	3
3.1.2. DOMÍNIOS MAGNÉTICOS.....	5
3.1.3. ANISOTROPIA MAGNÉTICA .....	5
3.1.4. MAGNETOSTRIÇÃO .....	6
3.1.5. LAÇO <i>B</i> <i>VERSUS</i> <i>H</i> .....	6
3.1.6. PERDAS MAGNÉTICAS .....	8
3.1.7. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO <i>B</i> <i>VERSUS</i> <i>H</i> .....	9
3.1.8. MATERIAIS MAGNETICAMENTE MOLES.....	12
3.1.8.1. FERRITES.....	12
3.1.8.2. LIGAS DE FERRO-SILÍCIO .....	12
3.1.8.3. LIGAS AMORFAS .....	13
3.1.8.4. LIGAS NANOCRISTALINAS.....	14
3.2. TRANSFORMADOR DE CORRENTE .....	19
3.2.1. CLASSIFICAÇÃO .....	20
3.2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....	21
3.2.3. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS.....	21
3.2.4. ERROS DE RELAÇÃO E DE ÂNGULO DE FASE.....	23
3.2.5. PRECAUÇÕES NO EMPREGO DOS TRANSFORMADORES E CORRENTE .....	24
3.2.6. ERROS DOS TC EM REGIME NÃO-SENOIDAL.....	25
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
4.1. CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE NÚCLEOS TOROIDAIS MAGNETICAMENTE MOLES UTILIZANDO UM INTEGRADOR ANALÓGICO .....	26
4.2. CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE NÚCLEOS TOROIDAIS MAGNETICAMENTE MOLES UTILIZANDO UM INTEGRADOR DIGITAL .....	30
4.3. PROJETO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	31
4.4. ENSAIOS PARA ENQUADRAMENTO DOS TC NOS PARALELOGRAMOS DE EXATIDÃO .....	34
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35



5.1. CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE NÚCLEOS TOROIDAIS MAGNETICAMENTE MOLES ..	35
5.2. COMPARAÇÃO ENTRE OS CIRCUITOS COM INTEGRADOR ANALÓGICO E DIGITAL.....	35
5.3. ENQUADRAMENTO DOS TC SOB ENSAIO NOS PARALELOGRAMOS DE EXATIDÃO .....	37
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>46</b>
<b>7. TRABALHOS REALIZADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>8. TEMA PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	4
FIGURA 3.2 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS A) DIREÇÕES DE MAGNETIZAÇÃO DE UM DOMÍNIO MAGNÉTICO B) CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO RELACIONADA COM AS DIREÇÕES DE MAGNETIZAÇÃO DE UM DOMÍNIO MAGNÉTICO .....	5
FIGURA 3.3 REGIÕES DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO.....	7
FIGURA 3.4 – LAÇO $B$ VERSUS $H$ .....	7
FIGURA 3.5 – LAÇOS MENORES E PERMEABILIDADE INCREMENTAL .....	8
FIGURA 3.6 – INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DO CAMPO MAGNÉTICO APLICADO SOBRE AS PERDAS MAGNÉTICAS .....	9
FIGURA 3.7 – CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DO LAÇO $B$ VERSUS $H$ .....	9
FIGURA 3.8 – FAMÍLIA DE LAÇOS $B$ VERSUS $H$ E CURVA DE MAGNETIZAÇÃO .....	11
FIGURA 3.9 – RELAÇÃO ENTRE A PERMEABILIDADE RELATIVA E A DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO $B$ , DE VÁRIOS MATERIAIS MAGNETICAMENTE MOLES .....	18
FIGURA 3.10 – FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO INSTALADO .....	19
FIGURA 3.11 – LIGAÇÃO DO TC .....	20
FIGURA 3.12 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM TODOS OS PARÂMETROS REFLETIDOS AO PRIMÁRIO .....	22
FIGURA 3.13 – DIAGRAMA FASORIAL DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE .....	22
FIGURA 4.1. CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DO LAÇO $B$ VERSUS $H$ .....	26
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O CONDICIONAMENTO DOS SINAIS $V_H$ E $V_O$ .....	27
FIGURA 4.3. PONTOS DO LAÇO $B$ VERSUS $H$ .....	28
FIGURA 4.4 - EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE NÚCLEOS TOROIDAIS MAGNETICAMENTE MOLES.....	29
FIGURA 4.5 – TELA DE APRESENTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO PARA O EQUIPAMENTO DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA, CORRENTE DE EXCITAÇÃO .....	29
FIGURA 4.6 - TELA DE APRESENTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO PARA O EQUIPAMENTO DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA, TENSÃO INDUZIDA .....	30
FIGURA 4.7 - TELA DE APRESENTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO PARA O EQUIPAMENTO DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA, LAÇO $B$ VERSUS $H$ .....	30
FIGURA 4.8 - CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DO LAÇO $B$ VERSUS $H$ COM INTEGRAÇÃO DIGITAL .....	31
FIGURA 4.9 – DIMENSÕES DO NÚCLEO TOROIDAL DE LIGA NANOCRISTALINA, FINEMET® ...	31

FIGURA 4.10 – DIMENSÕES DO NÚCLEO TOROIDAL DE FeSi GO.....	31
FIGURA 4.11 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DA LIGA NANOCRISTALINA FINEMET® .....	33
FIGURA 4.12 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL DA LIGA FeSi GO.....	34
FIGURA 4.13 – MONTAGEM PARA ENQUADRAMENTO DOS TC SOB ENSAIO NOS PARALELOGRAMOS DE EXATIDÃO.....	34
FIGURA 5.1 – TENSÃO INDUZIDA $V_1$ OBTIDA UTILIZANDO O CIRCUITO DA FIGURA 4.8.....	36
FIGURA 5.2 – TENSÃO INTEGRADA ATRAVÉS DE UMA ROTINA COMPUTACIONAL.....	36
FIGURA 5.3 – TENSÃO INDUZIDA $V_0$ .....	36
FIGURA 5.4 – FOTO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	37
FIGURA 5.5 – MONTAGEM EXPERIMENTAL EM DETALHES .....	38
FIGURA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DO TC DE LIGA NANOCRISTALINA SOB ENSAIO A 100% DA CORRENTE NOMINAL.....	39
FIGURA 5.7 – ERRO AMOSTRAL DO TC COM NÚCLEO DE LIGA NANOCRISTALINA SOB 100% DA CORRENTE NOMINAL .....	39
FIGURA 5.8 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DO TC DE LIGA NANOCRISTALINA SOB ENSAIO A 10% DA CORRENTE NOMINAL.....	40
FIGURA 5.9 – ERRO AMOSTRAL DO TC COM NÚCLEO DE LIGA NANOCRISTALINA SOB 10% DA CORRENTE NOMINAL .....	40
FIGURA 5.10 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DO TC DE FeSi SOB ENSAIO A 100% DA CORRENTE NOMINAL.....	41
FIGURA 5.11 – ERRO AMOSTRAL DO TC COM NÚCLEO DE FeSi SOB 100% DA CORRENTE NOMINAL .....	41
FIGURA 5.12 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES PRIMÁRIAS E SECUNDÁRIAS DO TC DE FeSi SOB ENSAIO A 10% DA CORRENTE NOMINAL.....	42
FIGURA 5.13 – ERRO AMOSTRAL DO TC COM NÚCLEO DE FeSi SOB 10% DA CORRENTE NOMINAL .....	42
FIGURA 5.14 – PARALELOGRAMO DE EXATIDÃO CLASSE 0,3 PARA A LIGA NANOCRISTALINA FINEMET .....	44
FIGURA 5.15 – PARALELOGRAMO DE EXATIDÃO CLASSE 0,6 PARA A LIGA NANOCRISTALINA FINEMET .....	44
FIGURA 5.16 – PARALELOGRAMO DE EXATIDÃO CLASSE 0,3 PARA A LIGA FeSi GO.....	45
FIGURA 5.17 – PARALELOGRAMO DE EXATIDÃO CLASSE 0,6 PARA A LIGA FeSi GO.....	45

**Lista de Tabelas**

TABELA 3.1 – DESENVOLVIMENTO DAS LIGAS NANOCRISTALINAS .....	16
TABELA 4.1 – ORDEM DE GRANDEZA DAS PERDAS DA BOBINA DE CORRENTE DE ALGUNS INSTRUMENTOS ELÉTRICOS EMPREGADOS COM TC, 5 A, 60 Hz.....	32
TABELA 5.1 – PERMEABILIDADE MAGNÉTICA MÁXIMA E DENSIDADE DE SATURAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO PARA DIVERSOS MATERIAIS SOB ENSAIO .....	35
TABELA 5.2 – ERROS DE RELAÇÃO E DE FASE DOS TC SOB ENSAIO.....	43
TABELA 5.3 – ERROS ABSOLUTOS DOS TC SOB ENSAIO .....	46

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
APFIM	- Atom Probe Field Ion Microscope
CCC	- Cúbica de Corpo Centrado
CFC	- Cúbica de Face Centrada
DEE	- Departamento de Engenharia Elétrica
FCR	- Fator de Correção da Relação
FFT	- Fast Fourier Transform
GNO	- Grãos Não Orientados
GO	- Grãos Orientados
IEC	- International Electrotechnical Commission
LEIAM	- Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas
LIMC	- Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas
NBR	- Normas Técnicas Brasileiras
TC	- Transformador de Corrente
UFCG	- Universidade Federal de Campina Grande
$B$	- densidade de fluxo magnético
$H$	- intensidade de campo magnético
$P$	- Perdas Magnéticas
$P_{hist}$	- Perdas por Histerese
$P_{parasita}$	- Perdas por Correntes Parasitas
$P_{adic}$	- Perdas Adicionais
$T_x$	- Temperatura de Cristalização
$\beta$	- Ângulo de Fase
$\varepsilon$	- Erro
$\mu$	- Permeabilidade Magnética
$\chi_m$	- Susceptibilidade Magnética

## 1. Introdução

O desenvolvimento de novos materiais magnéticos proporciona tanto o surgimento de novas aplicações em dispositivos eletromagnéticos como a substituição do material magnético em dispositivos já projetados e comercializados. O primeiro passo na busca de aplicações para os novos materiais magnéticos é a determinação de suas propriedades magnéticas, visando seu uso a determinadas aplicações. Nesse particular, é essencial que novos materiais bem como novas tecnologias, sejam submetidos a um período de avaliação quanto à viabilidade em determinada aplicação, explicitando as suas vantagens e desvantagens.

Dentre os novos materiais magnéticos desenvolvidos nas últimas décadas destacam-se as ligas amorfas e as ligas nanocristalinas [1,2]. O surgimento desses novos materiais possibilitou, dentre outras melhorias, a diminuição das perdas no material magnético e da força coerciva, assim como o aumento da permeabilidade magnética relativa.

Os transformadores de corrente são equipamentos desenvolvidos para serem empregados em sistemas elétricos de medição, controle e proteção. Os TC transformam, mediante os princípios da indução eletromagnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes que circulam no secundário, segundo uma relação de transformação. Normalmente, o enrolamento primário do TC é constituído de poucas espiras ao contrário do seu secundário que contém um elevado número de espiras. Portanto, os TC são equipamentos que estão diretamente relacionados com o desenvolvimento de novos materiais magnéticos, pois seu principal elemento constitutivo é um núcleo magnético. Por isso, a cada surgimento de novos materiais magnéticos estudos são realizados para proporcionar a viabilização do emprego desses materiais no projeto de novos transformadores de corrente.

Teoricamente, o emprego de materiais magnéticos com baixas perdas, alta permeabilidade magnética e baixa força coerciva em transformadores de corrente destinados a serviços de medição em sistemas elétricos, proporcionam como vantagens tanto a eficiência energética do dispositivo como a redução dos erros de medição.

Um dos trabalhos pioneiros no Brasil, que utiliza materiais obtidos mediante processo de solidificação rápida em núcleos de TC's, foi a dissertação de mestrado, apresentada por Roberto Petry Homrich [3], na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Nesse estudo,

Petry utilizou a liga amorfa de composição  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$  fabricada pela empresa norte-americana *Allied-Signal*.

Os estudos com liga nanocristalina em núcleos de TC foram iniciados com o pesquisador Benedito Antonio Luciano e seus colaboradores [4,5], da Universidade Federal de Campina Grande, utilizando a liga nanocristalina de nome comercial FINEMET<sup>®</sup>, de composição química  $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ .

Nesta dissertação, um dos principais objetivos é o aprofundamento dos estudos sobre a aplicação de núcleos de ligas nanocristalinas em transformadores de corrente para serviços de medição. Para tanto, este trabalho está organizado da seguinte maneira: na Secção 2 são apresentados os objetivos da dissertação; na Secção 3 é realizada uma revisão bibliográfica sobre os materiais magnéticos e os transformadores de corrente (TC); na Secção 4 são apresentados os materiais e métodos para a realização dos ensaios experimentais; na Secção 5 são mostrados os resultados e as discussões e na Secção 6 são apresentadas as conclusões.

## **2. Objetivos**

1. Efetuar estudos sobre os transformadores de corrente com núcleo toroidal, destinados aos serviços de medição de circuitos elétricos;
2. Desenvolver um equipamento que viabilize a caracterização magnética dos núcleos toroidais magneticamente moles em estudo;
3. Executar ensaios comparativos entre dois transformadores de corrente, um com núcleo magnético convencional de FeSi e outro com núcleo de liga nanocristalina, visando a influência do material magnético no erro de fase e, conseqüentemente, na classe de exatidão.

### **3. Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 Materiais Magnéticos**

##### **3.1.1 Classificação dos Materiais Magnéticos**

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

Os materiais diamagnéticos não possuem momento de dipolo magnético permanente e na presença de um campo magnético são fracamente magnetizados na direção oposta do campo magnético aplicado. Esses materiais são caracterizados por possuírem susceptibilidade magnética negativa e de valor muito pequeno, o que resulta numa permeabilidade relativa ligeiramente menor que a unidade. A causa desta reação está associada com a lei de Lenz segundo a qual pequenas correntes localizadas são induzidas no interior do material, que cria suas próprias forças magnéticas em oposição ao campo variável aplicado. Como exemplos de materiais diamagnéticos têm-se: o cobre e o hélio.

Os materiais paramagnéticos possuem momento de dipolo magnético permanente. Na ausência do campo magnético os dipolos estão orientados aleatoriamente não havendo neste caso magnetização. Na presença de um campo magnético externo magnetizam-se na mesma direção do campo magnético aplicado, com módulo da magnetização induzida proporcional ao campo. Esses materiais possuem susceptibilidade magnética positiva, entre  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ , e permeabilidade relativa um pouco maior que a unidade. Como exemplos de materiais paramagnéticos têm-se: o sódio e o alumínio.

Os materiais ferromagnéticos possuem campos 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. Pode ser citados como exemplos de materiais ferromagnéticos: o ferro, cobalto, níquel e muitos tipos de aços.

Nos materiais antiferromagnéticos sua estrutura é organizada de modo que os momentos de dipolo magnético permanentes de átomos alternados do cristal alinham-se em direções opostas, resultando numa magnetização nula na ausência de um campo externo. Sua susceptibilidade magnética é positiva e menor do que as dos materiais ferromagnéticos, permitindo uma permeabilidade relativa maior que a unidade. Acima de uma temperatura



crítica, Temperatura de Neel, o material se torna paramagnético. Exemplos de materiais antiferromagnéticos são os óxidos de manganês e os óxidos de ferro (FeO).

Os materiais ferrimagnéticos possuem campos magnéticos atômicos que se orientam uns em direção ao campo magnético aplicado e outros na direção oposta, porém como as intensidades dos momentos são diferentes, os momentos na direção são mais fortes, eles não se cancelam o que resulta numa magnetização do material, mesmo sem a aplicação de um campo magnético. Mesmo apresentando uma permeabilidade relativa maior que a unidade, sua estabilidade térmica não é tão consistente como os materiais ferromagnéticos. Como exemplos de materiais ferrimagnéticos, podem ser citados o óxido de ferro (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e alguns ferrites.

Em geral, a susceptibilidade  $\chi_m$  ou a permeabilidade magnética  $\mu$  podem ser utilizadas para classificar os materiais magnéticos em termos de suas propriedades magnéticas ou de seu comportamento magnético. Um material é considerado não-magnético se a sua susceptibilidade magnética for nula ( $\chi_m = 0$  ou  $\mu = 1$ ). Ele é magnético se isso não se verificar. O espaço livre, o ar e materiais com  $\chi_m = 0$  (ou  $\mu \cong 1$ ) são considerados meios não-magnéticos.

Na Figura 3.1 é apresentada, em diagrama de blocos, a classificação dos materiais magnéticos: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos [6].

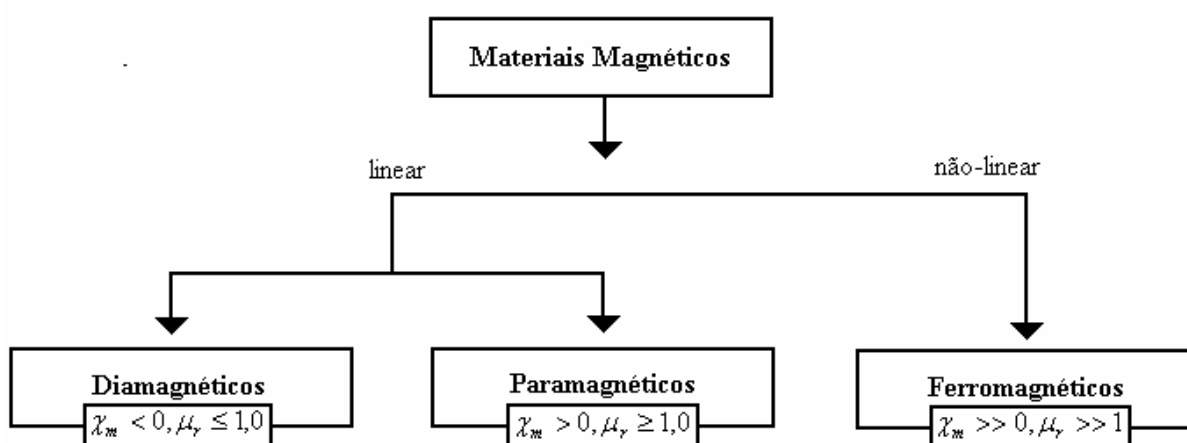


Figura 3.1 – Classificação dos Materiais Magnéticos

Na Figura 3.1 a permeabilidade relativa  $\mu_r$  é definida como sendo a relação entre a permeabilidade magnética do material e a permeabilidade magnética do ar ( $\mu_0$ ) ou vácuo, conforme a expressão 3.1:

$$\mu_r = \frac{\mu_{mat}}{\mu_0} \quad (3.1)$$

### 3.1.2 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 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 mesmos. 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.

### 3.1.3 Anisotropia Magnética

A anisotropia magnética é um dos princípios mais importantes para melhorar o desempenho dos materiais. As curvas de magnetização mudam consideravelmente segundo a direção do campo magnético aplicado.

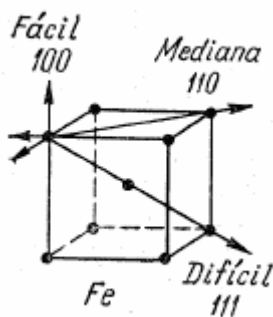


Figura 3.2 – Direções de magnetização de um domínio magnético

Uma amostra de ferro, como apresentada na Figura 3.2, possui estrutura cúbica de corpo centrado, na qual os momentos magnéticos de um domínio são mais facilmente alinhados quando o campo magnético está direcionado numa das seis direções [100], correspondentes às arestas do cubo. Quando um campo magnético  $\vec{H}$  é aplicado, seguindo uma direção [100], as paredes dos domínios magnéticos se movem de tal forma a fazer com que os domínios magnéticos com vetor magnetização na mesma direção de  $\vec{H}$  cresçam e aqueles domínios com magnetização contrária à direção de  $\vec{H}$  diminuam, desse modo, fazendo com que a magnetização do material cresça rapidamente e atinja a saturação com um campo

aplicado de intensidade muito pequena. Para os mesmos valores de campo magnético aplicado na direção [111] a magnetização resultante é bem menor, o que se deve ao fato da direção [111] ser de difícil magnetização.

### 3.1.4 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 variações 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 magnetostricção e, normalmente, duas vezes o da frequência da fonte de alimentação elétrica [7].

### 3.1.5 Laço $B$ versus $H$

O processo de magnetização de um material ferromagnético sob a influência de um campo externo se reduz a [8]:

- 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 3.3 esses dois fenômenos podem ser observados. Na região de permeabilidade magnética inicial ( $\mu_i$ ), região em destaque na Figura 3.3, 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 3.4. 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 [8].

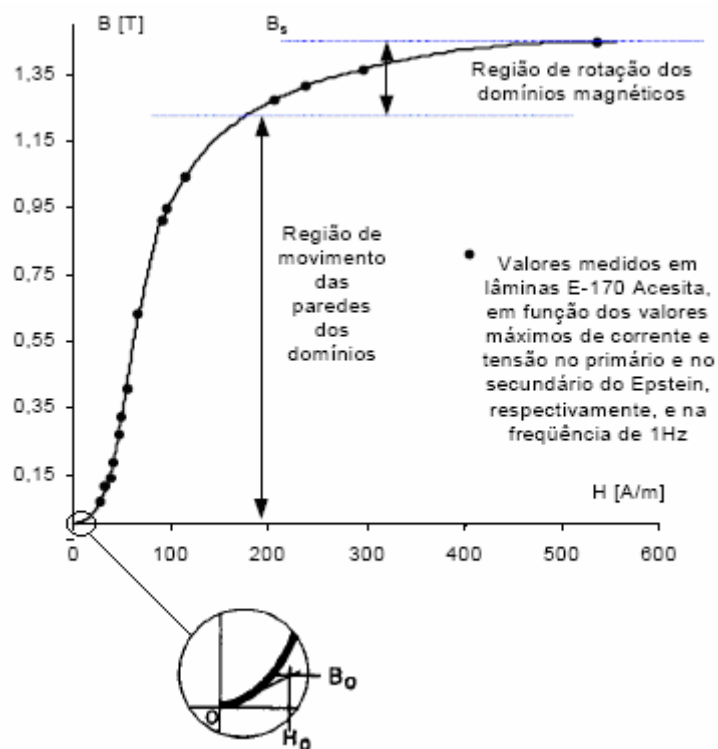


Figura 3.3 Regiões da Curva de Magnetização [9]

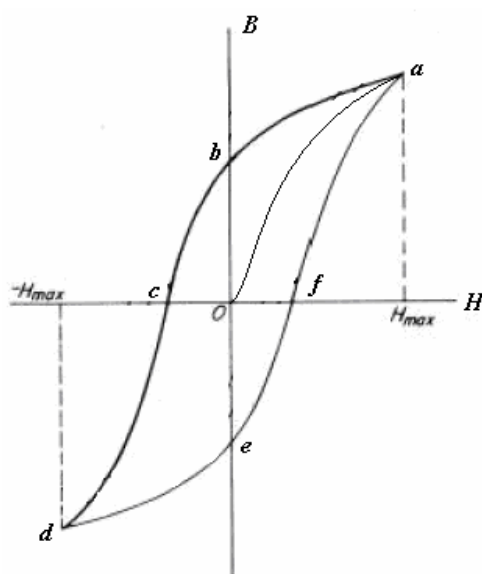


Figura 3.4 – Laço  $B$  versus  $H$

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 3.4). A esta curva fechada, obtida quando o material se acha em estado de magnetização cíclica, dá-se o nome de **laço  $B$  versus  $H$** .

Caso o material ferromagnético sob ensaio seja submetido a um campo magnético com um nível CC, ocorre o aparecimento de laços menores, A-B<sub>m</sub>, conforme mostrado na Figura 3.5. Assim, a permeabilidade incremental,  $\mu_{\Delta}$ , pode ser definida como sendo a relação entre a variação de densidade de fluxo magnético do laço menor ( $\Delta B$ ) e a variação do campo magnético do laço menor ( $\Delta H$ ) [10].

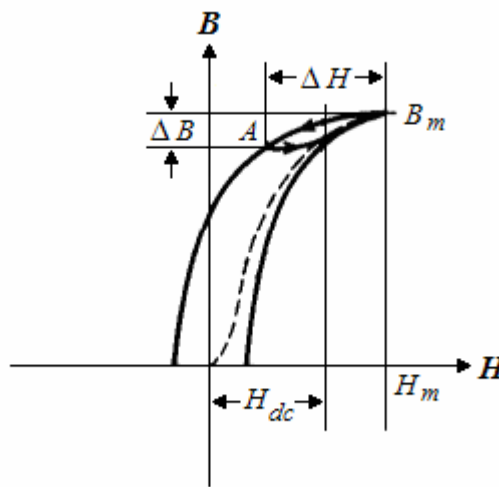


Figura 3.5 – Laços menores e permeabilidade incremental [11]

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (3.1)$$

### 3.1.6 Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas em um núcleo ferromagnético podem ser divididas em três componentes, de acordo com a expressão 3.2 [12,13,14].

$$P_{total} = P_{hist} + P_{parasita} + P_{adic} \quad (3.2)$$

- 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: 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.

Na figura 3.6 pode-se observar a influência da frequência do campo magnético aplicado sobre as perdas magnéticas no material.

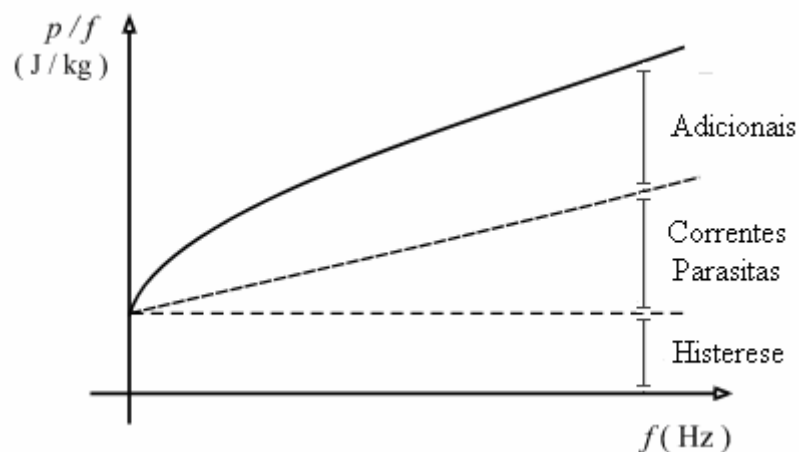


Figura 3.6 - Influência da frequência do campo magnético aplicado sobre as perdas magnéticas

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.

### 3.1.7 Determinação Experimental 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 3.7.

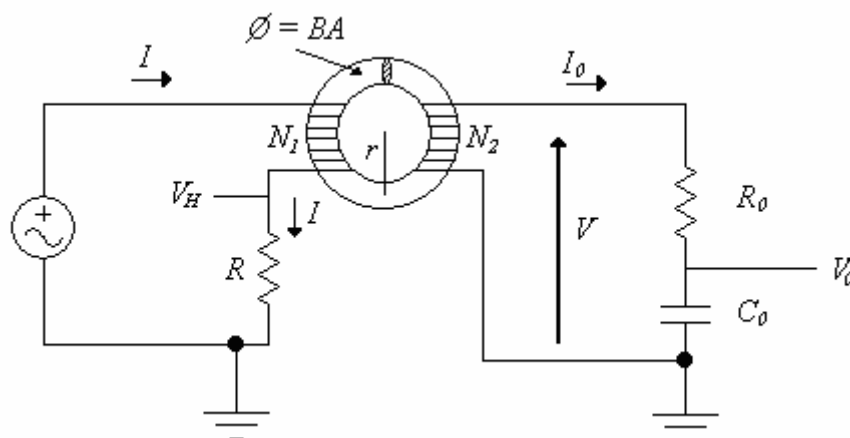


Figura 3.7 – Circuito para determinação do laço  $B$  versus  $H$

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 [15],

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma NI \quad (3.3)$$

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

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H 2\pi r = NI \quad (3.4)$$

$$H = \left[ \frac{N_1}{2\pi r} \right] I \quad (3.5)$$

Analisando-se a expressão 3.5 pode-se observar que o campo magnético é diretamente proporcional à corrente que circula pelas espiras  $N_1$  do toroide. Essa corrente pode ser dada em função de  $V_H$  segundo a Lei de Ohm

$$H = \left[ \frac{N_1}{2\pi r} \right] \frac{V_H}{R} = \left[ \frac{N_1}{2\pi r R} \right] V_H \quad (3.6)$$

Segundo a lei de Faraday, um campo magnético variável produz uma força eletromotriz. O cálculo dessa força eletromotriz é estabelecido pela expressão 3.7.

$$fem = N \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.7)$$

na qual, o fluxo magnético é dado por:

$$\phi = B.A \quad (3.8)$$

Na relação 3.8 a área da seção transversal do toroide é representada por  $A$ .

Substituindo a relação 3.8 na equação 3.7, obtêm-se:

$$fem = V = NA \frac{dB}{dt} \quad (3.9)$$

Para o circuito da Figura 3.7, observa-se que, considerando um  $R_0 \gg X_{C_0}$  tem-se a tensão  $V$  como sendo dada por:

$$I_0 = \frac{V}{R_0} \quad (3.10)$$

Substituindo 3.8 e 3.9 na expressão da tensão no capacitor  $C_0$ , é obtida a relação 3.11.

$$V_0 = \frac{1}{C_0} \int I_0 dt = \frac{1}{R_0 C_0} \int V dt = \frac{N_2 A}{R_0 C_0} \int \frac{dB}{dt} dt = \left[ \frac{N_2 A}{R_0 C_0} \right] B \quad (3.11)$$

Portanto, pode-se obter o laço  $B$  versus  $H$  em função de  $V_0$  versus  $V_H$ , pois os valores correspondentes de  $B$  e  $H$  são obtidos apenas pela multiplicação de constantes.

O circuito apresentado na Figura 3.7 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 variar o valor da corrente  $I$  a partir do zero, fazendo surgir uma família de laços  $B$  versus  $H$  (laços menores), como é mostrada na Figura 3.8. A ligação das extremidades dos laços  $B$  versus  $H$ , mostrada como uma linha pontilhada na Figura 3.8, é chamada de curva inicial de magnetização.

Conforme pode ser observado na Figura 3.8, 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.

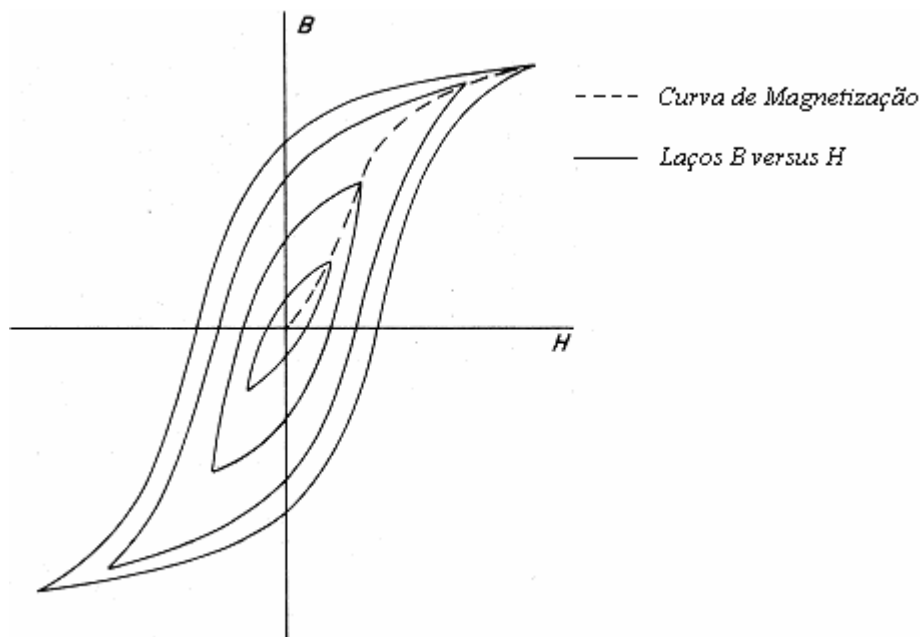


Figura 3.8 – Família de Laços  $B$  versus  $H$  e Curva de Magnetização

A permeabilidade magnética  $\mu$  é dada pela relação 3.12.



$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.12)$$

### 3.1.8 Materiais Magneticamente Moles

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

#### 3.1.8.1 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 adequadas.

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.

#### 3.1.8.2 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 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 encarecer o ferro e 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. Sua permeabilidade magnética nessa direção pode ser cerca de duas vezes maior que nas chapas de tipo clássico, e as perdas no ferro muito menores [16].

### 3.1.8.3 Ligas Amorfas

As primeiras ligas amorfas foram obtidas por volta de junho de 1959, pelo professor Pol Duwez e seus colaboradores, no *Califórnia Institute of Technology (Caltech)*, Pasadena, USA. Em 1965, Duwez obteve as primeiras ligas amorfas com propriedades ferromagnéticas, porém, essa liga tinha como desvantagem ser muito quebradiça. Essa desvantagem começou a ser superada em 1974, quando Chen e Polk passaram a introduzir elementos como o silício e o alumínio às ligas, tornando-as mais resistentes, o que levou ao interesse dos metalurgistas em todo o mundo [1].

A partir de 1970, as técnicas existentes para a obtenção dos metais vítreos conseguiam produzir fitas de poucos milímetros de largura. No ano de 1973 um processo veio romper essa limitação o processo *melt-spinning*, que produz fitas longas e contínuas, esse processo pode ser de dois tipos: *free-flight melt-spinning* e *chill-block melt-spinning*. Já em 1979 um outro processo de fundição, chamado fundição em fluxo planar, veio a permitir a fabricação de ligas com espessura entre 20 e 100  $\mu\text{m}$  e largura de até 30 cm [17].

As estruturas amorfas, também denominadas de 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, 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 [18].

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, 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 [18].

#### **3.1.8.4 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. No mesmo ano, Yoshizawa conseguiu obter experimentalmente a primeira amostra de uma estrutura nanocristalina. Posteriormente, baseado na teoria aleatória da anisotropia, o princípio de suavização magnética acompanhado pela redução do grão à escala nanométrica foi explicado por Herzer [19]. 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  $\mu\text{m}$  de espessura. As

fitas amorfas foram enroladas na forma de toroides e em seguida submetidas a um tratamento térmico, com temperaturas variando entre 673 K à 923 K, durante 1h, sob atmosfera de gás nitrogênio. Esse processo poderia ocorrer com a presença de um campo magnético aplicado sobre a amostra toroidal, no sentido transversal ou longitudinal, sendo medidas durante o ensaio características como: curva  $B-H$ , permeabilidade magnética relativa, perdas no núcleo e temperatura de cristalização ( $T_x$ ) [2].

Para analisar o processo de evolução microestrutural da liga nanocristalina,  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$  ( comercialmente conhecida como FINEMET<sup>®</sup> ), foi utilizado 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, detectam-se a formação de aglomerados com alguns nanômetros de comprimento ricos em cobre, estruturas denominadas de *clusters*.

Quando as fitas de ligas amorfas são submetidas a um recozimento de 1h na temperatura de cristalização, constata-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 feito abaixo da temperatura de cristalização. Ainda nessa fase, 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  $Fe_{73,5} Cu_1 Nb_3 Si_{15,5} B_7$ , comercialmente denominada de NANOPERM<sup>®</sup>.

As ligas nanocristalinas só passaram a ser exploradas pelos pesquisadores devido a suas características favoráveis para determinadas aplicações no início dos anos 90. Na escala industrial as duas indústrias pioneiras foram: a *Nanophase Technologies* (Darien, IL) e a *Nanodyn, Inc.* (New Brunswick, NJ). Atualmente, algumas empresas européias e japonesas estão fabricando materiais nanocristalinos, como a *ULTRAN* (Olten, Suíça), a *PSI Ltd.* (Polegate, East Sussex, Reino Unido), a *FSU* (Talinn, Latvia), a *HITACHI* (Japão) e a *VAC* (Hanau, Alemanha)[17]

Na tabela 3.1 é apresentado um levantamento relativo aos principais trabalhos publicados sobre ao desenvolvimento das ligas nanocristalinas no período de 1988 a 2010.

Tabela 3.1 – 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> [2]	Melt quenching (Sputtering)
Co-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc]	1989	Hasegawa <i>et al.</i> [20]	Sputtering
Fe-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc]			Sputtering
Fe-Au-Nb-Si-B	1989	Kataoka <i>et al.</i> [21]	Melt quenching
Fe-M-N [M: Hf, Zr, Ta, etc]	1990	K. Nakanishi <i>et al.</i> [22]	Sputtering
Fe-M-B [M: Hf, Zr, Nb, etc]	1990	Suzuhi <i>et al</i> [23].	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Cu-P-C-Ge	1990	Fujii <i>et al.</i> [ 24]	Melt quenching
Fe-Zr-B-Cu	1991	A. Makino <i>et al.</i> [25]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Cr-Cu-Nb-Si-B	1992	A. Ślawska-Waniewska <i>et al.</i> [26]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Ga-Si-Nb-B	1993	T. Tomida [27]	Melt quenching
Fe-Cu-Nb-Sb-Si-B	1994	J. Degro <i>et al.</i> [28]	Single-roller
Fe-Cu-W-Si-B			
Fe-B-Nb-Cu	1995	J. S. Lee <i>et al.</i> [29]	Melt-spinning
Fe-Al-Nb-B-Cu	1996	J. Y. Park <i>et al.</i> [30]	Single-roller Melt-spinning
Fe-Zr-B-Cu	1997	Y. Naitoh <i>et al.</i> [31]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe- Co-Zr-B-Cu	1998	M. A. Willard <i>et al.</i> [32]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-M-B-Cu [M: Zr, Nb, e/ou Hf]	1999	Iwanabe <i>et al.</i> [33]	Melt-spinning
Fe-Cu-M-Si-B (M: Nb, V)	2000	N. S. Mitrovic <i>et al.</i> [34]	Melt quenching (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-Si-B-Cu-Nb	2001	J. M. Borrego <i>et al</i> [35].	Melt-spinning
Fe-Zr-B	2002	M. Hasiak <i>et al.</i> [36]	Melt-spun
Co-Fe-Zr-B-Cu	2002	A. Makino <i>et al</i> [37]	Arc-melting
Fe-Nb-B-P-Cu	2003	A. Makino e T. Bitoh [38]	Arc-melting (sob atmosfera inerte)
Fe-Co-Cu-M-Si-B (M: Nb, Zr)	2004	Y. Yoshizawa <i>et al.</i> [39]	Melt-spinning

Fe-Co-Cu-Nb-Si-B	2005	Y. Yoshizawa e Ogawa [40]	Melt-spinning
Fe-Si-Ni	2006	A. Bahrami <i>et al.</i> [41]	Mechanical Alloying (sob atmosfera controlada)
Fe-Zr-B-Cu	2006	J. C.-h. Shih <i>et al.</i> [42]	Melt-spinning (sob atmosfera inerte)
Fe-Nb-B-P-Cu	2007	A. Makino <i>et al.</i> [43]	Arc-melting (sob atmosfera inerte)
Fe-Ge-Nb-B-Cu	2008	D. Muraca <i>et al.</i> [44]	Melt-spinning
Fe-Si-B-P-Cu	2009	A. Makino <i>et al.</i> [45]	Melt-spun
Fe-(Co)-Ni-Zr-B	2010	A. González <i>et al.</i> [46]	Mechanical Alloying (sob atmosfera controlada)

O interesse pelas ligas nanocristalinas decorre da sua alta permeabilidade magnética relativa, baixa força coerciva, combinado com uma alta densidade de fluxo magnético. A redução dos grãos à escala nanométricas é o ponto chave para as características magneticamente moles das ligas nanocristalinas.[18]

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 ( $\mu_r$ ) também é afetada com a adição de Cu, neste caso com o aumento da sua concentração, a permeabilidade aumenta. Para uma concentração de 1% de Cu o  $\mu_r$  é aproximadamente  $10^5$  comparada com as ligas amorfas a base de Co.[18]

A dependência do tamanho do grão na fase ccc também esta ligada à adição de Nb na liga, pois com o aumento da concentração de Nb o diâmetro diminui. A adição combinada de Cu e Nb é importante para a obtenção de uma liga homogênea e de grãos ultrafinos.[18]

Ligas nanocristalinas como as FINEMET<sup>®</sup>, Fe-Cu-Nb-Si-B, têm apresentado 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 deles são comparáveis ou menores 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 numa ampla faixa de temperaturas [47].

Na Figura 3.9 observa-se a relação entre a permeabilidade relativa e a densidade de fluxo magnético  $B$ , de vários materiais magneticamente moles. A liga FINEMET<sup>®</sup> possui alta permeabilidade relativa combinada com uma alta densidade de fluxo magnético, superior aos materiais convencionais.

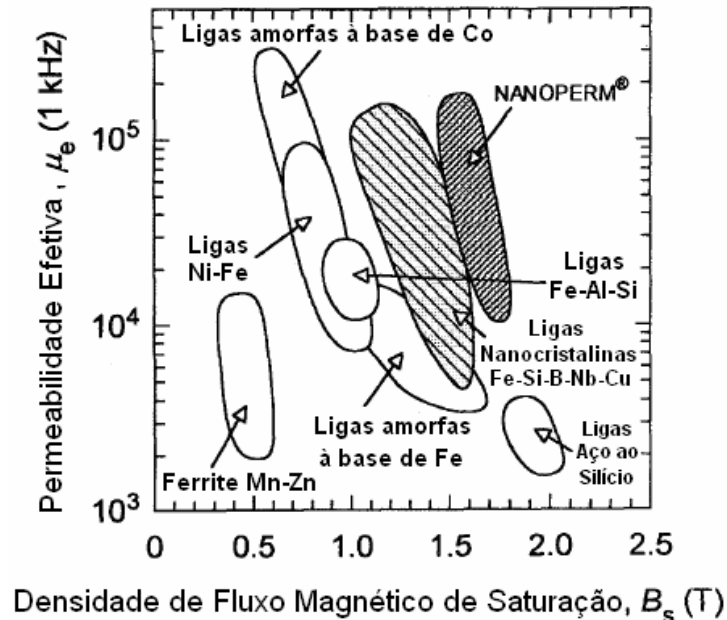


Figura 3.9 – Relação entre a permeabilidade relativa e a densidade de fluxo magnético  $B$ , de vários materiais magneticamente moles. [48]

O elevado valor da permeabilidade e da resistividade ( $135 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ), baixa força coerciva, boa estabilidade térmica e indução de saturação superior a 1,20 T, conferem às ligas nanocristalinas diferentes possibilidades de aplicações em dispositivos eletroeletrônicos, tais como: núcleos enrolados para atenuação de interferência eletromagnética, transformadores de pulso, transformadores de corrente, componentes para fontes chaveadas, conversores de frequência para acionamento de máquinas elétricas, indutores, sensores, reatores saturáveis, transformadores para altas frequências e cabeçotes magnéticos [48,49,29,50,16,4,5,51,52,53,54,55,56].

Uma das aplicações tecnológicas de ligas nanocristalinas foi o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto do nível de degradação dos para-raios baseado na medição e análise harmônica da sua corrente de fuga [57]. Para a medição da corrente, foi empregado um sensor indutivo não-invasivo, baseado na alta permeabilidade magnética apresentada pelas ligas nanocristalina. As informações disponibilizadas pelo sistema referenciado podem ser enumeradas como sendo: a medição da corrente de fuga nos para-raios, decomposição da corrente total nas componentes capacitiva e resistiva e obtenção da componente de terceira harmônica. Nesse sistema, os dados obtidos são enviados para a sala de controle da

subestação utilizando um sistema de comunicação sem fio, baseado no protocolo de comunicação ZigBee, operando na frequência de 2,4 GHz. Na Figura 3.10 é apresentada uma foto do sistema instalado na subestação Campina Grande II da CHESF.



Figura 3.10 - Fotografia do sistema de medição instalado [57]

### 3.2 Transformador de Corrente

Os transformadores de corrente são equipamentos projetados e construídos para serem empregados em sistemas elétricos de medição, controle e proteção. O transformador de corrente, ou simplesmente TC, é um transformador na qual o enrolamento primário é constituído de poucas espiras e condutor de secção transversal 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. Portanto, baseados nas leis de Faraday e Ampère, 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 estimar a corrente que circula pelo enrolamento primário, conforme ilustrado na Figura 3.11.



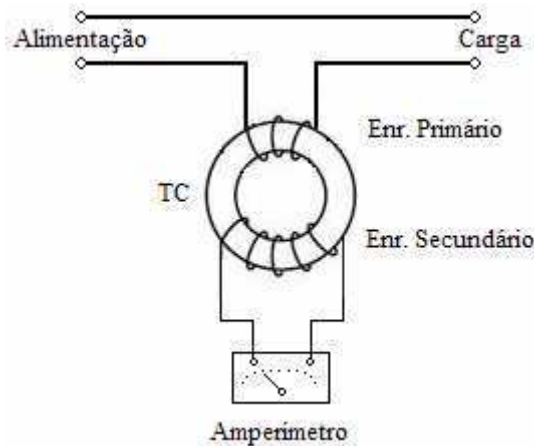


Figura 3.11 – Ligação do TC

A disposição dos enrolamentos na Figura 3.11 é apenas esquemática, na realidade, o primário e o secundário estão enrolados do mesmo lado do núcleo, de modo a manter o fluxo de dispersão entre os enrolamentos em quantidade pequena.

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 levou 17 países, entre 1923 e 1958, a produzirem 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 [58]. Atualmente, as normas vigentes para transformadores de corrente no Brasil são: NBR-6821 (Método de ensaio) e a NBR-6856 (Especificação).

### 3.2.1 Classificação

Os transformadores de correntes podem ser classificados em dois tipos:

- Transformadores de Corrente para serviços de medição: utilizados para auxiliar na medição de correntes ou energia em alta tensão, são caracterizados pela sua alta exatidão (classes: 0,3, 0,6 e 1,2) e baixa corrente de saturação (4 vezes a corrente nominal).
- Transformadores de Corrente para serviços de proteção: utilizados para proteção de circuitos de alta tensão, são caracterizados pela baixa exatidão (classes: 2,5, 5 e 10) e elevada corrente de saturação (da ordem de 10 a 20 vezes a corrente nominal).

### 3.2.2 Características Construtivas

Os transformadores de corrente podem ser de diversos tipos:

- tipo barra;
- tipo enrolado;
- tipo janela;
- tipo bucha;
- tipo núcleo dividido;
- tipo com vários enrolamentos primários;
- tipo com vários núcleos secundários;
- tipo derivação no secundário.

Os 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.

Já os TC 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 cheio de 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 cheio de óleo mineral. O enrolamento primário é envolvido por uma blindagem eletrostática, cuja finalidade é uniformizar o campo elétrico.

### 3.2.3 Características Elétricas

O circuito elétrico equivalente, refletido ao primário, para o TC é apresentado na Figura 3.12. 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.

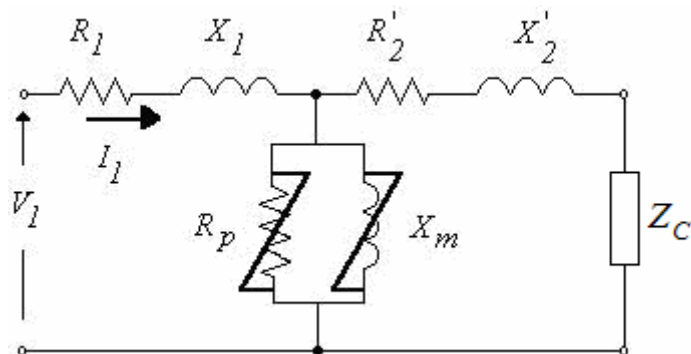


Figura 3.12 – Circuito elétrico equivalente de um transformador de corrente com todos os parâmetros refletidos ao primário.

Na Figura 3.13 é apresentado o diagrama fasorial do TC.

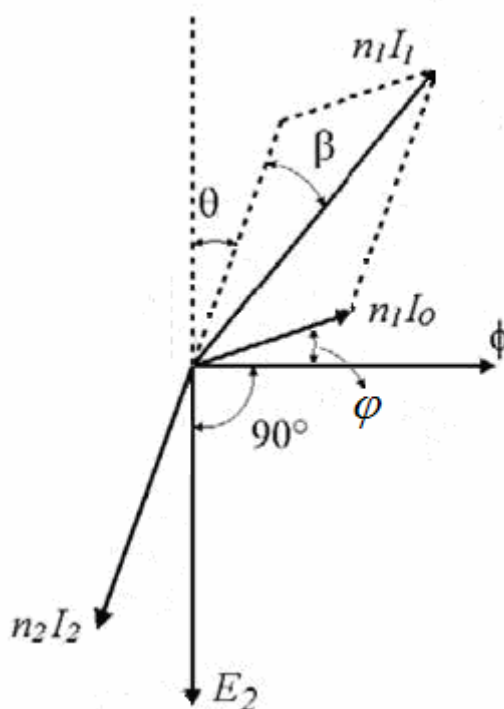


Figura 3.13 – Diagrama fasorial do transformador de corrente

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

A expressão 3.13 é obtida projetando-se os fasores sobre  $n_1I_1$ .

$$n_1I_1 = n_2I_2 \cos \beta + n_1I_0 \cos(90^\circ - \theta - \varphi - \beta) \quad (3.13)$$

Ao se dividir ambos os lados na equação 3.13 por  $n_1I_2$  é obtida a expressão 3.14.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \cos \beta + n_1 \frac{I_0}{I_2} \text{sen}(\theta + \varphi + \beta) \quad (3.14)$$

Sendo  $\beta$  normalmente um ângulo muito pequeno (da ordem de um grau ou menos), a relação das correntes assume o valor aproximado mostrado na equação 3.15.

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{n_2}{n_1} \left[ 1 + \frac{I_0}{I_1} \text{sen}(\theta + \varphi) \right] \quad (3.15)$$

A relação de espiras  $n_2/n_1$  pode ser considerada como a relação aproximada do TC. A segunda parcela no colchete é uma correção que mostra o efeito da componente de excitação da corrente primária sobre a relação das correntes. O termo corretivo depende da relação  $I_0/I_1$ , portanto, 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. O ângulo  $\varphi$ , 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.

O ângulo  $\beta$ , denominado ângulo de fase, pode ser obtido pela análise da Figura 3.12, equação 3.16 [59].

$$\beta \cong \frac{I_0}{I_1} \cos(\theta + \varphi) \quad \text{rad} \quad (3.16)$$

### 3.2.4 Erros de Relação e de 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 medidas em laboratório. Essa pequena diferença entre essas relações se deve 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 3.15 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. A relação nominal das correntes é frequentemente usada nas medidas e nos cálculos que não requerem grande exatidão. Desse modo, é denominado erro de relação de um TC a diferença entre a relação verdadeira e a relação nominal. 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 3.17.

$$FCR = \frac{RELAÇÃO VERDADEIRA}{RELAÇÃO NOMINAL} \quad (3.17)$$

O ângulo de fase do TC é o ângulo pelo qual  $I_2$  deixa de estar defasado de  $180^\circ$  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.

A redução do erro de um TC consiste na idéia 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. Outro método utilizado é utilizar um núcleo magnético com alta permeabilidade magnética.

### 3.2.5 Precauções no Emprego dos Transformadores de Corrente

Os TC são utilizados com a bobina secundária conectada a instrumentos de medição, como: amperímetros, bobinas de corrente de wattímetros, bobinas de relés de corrente etc. Devido a esses instrumentos serem de baixa impedância, o TC opera praticamente como se estivesse em curto-circuito. Desse modo, as espiras do secundário geram um fluxo desmagnetizante no núcleo, fazendo com que a densidade de fluxo no núcleo seja baixa. Portanto, um TC nunca deve ter o seu secundário aberto enquanto o seu primário estiver alimentado por corrente elétrica, pelo seguinte motivo: o elevado valor da tensão induzida no enrolamento secundário, pois não havendo o efeito desmagnetizante da corrente no secundário, todo o fluxo magnético circulante no núcleo seria produzido pela corrente

primária, causando perigo de morte para os operadores do quadro de manobra, perdas elevadas no núcleo, podendo destruir os materiais dielétricos e causar a queima do TC.

Normalmente, os TC são dotados de uma chave para curto-circuitar o secundário, a qual deve ser fechada antes de abrir o secundário para retirada do instrumento de medição ou efetuar outras alterações no circuito secundário.

### 3.2.6 Erros dos TC em Regime Não-Senoidal

O enquadramento dos TC nos paralelogramos de exatidão, definidos por normas nacionais e internacionais, só é possível sob condições puramente senoidais. Porém, nas condições reais de utilização dos TC nos sistemas elétricos, essa situação não ocorre, pois sempre há presença de componentes harmônicas nesses sistemas. Desse modo, têm-se uma necessidade da realização de estudos para análise desses equipamentos de medição em regime não senoidal.

Geralmente, nas normas não são apresentadas as definições nem os valores máximos admissíveis para erros de TC em regime estacionário não senoidal. Neste caso, se a corrente é amostrada em intervalos regulares, define-se “erro amostral” conforme a expressão 3.18 [60,61].

$$\varepsilon_k = 100 \cdot \frac{\frac{i_{1k}}{K_N} - i_{2k}}{I_{2N}}, \quad k = 1, 2, \dots, N_a, \quad (3.18)$$

na qual  $i_{1k}$  e  $i_{2k}$  são os valores da corrente primária e secundária em cada instante de aquisição;  $K_N$  é a relação nominal do TC;  $I_{2N}$  é a corrente nominal;  $N_a$  é o número de amostras considerado.

O erro composto para avaliar a precisão do TC é apresentado na expressão 3.19.

$$\varepsilon_c = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} \left( \frac{i_{1k}}{K_N} - i_{2k} \right)^2}}{I_{2N}} \quad (3.19)$$

## 4. Materiais e Métodos

Os ensaios para a caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles foram desenvolvidos no âmbito do laboratório de instrumentação e metrologia

científicas – LIMC. Enquanto, os ensaios para o enquadramento dos TC nos paralelogramos de exatidão foram realizados no laboratório de eletrônica industrial e acionamento de máquinas – LEIAM. Ambos os laboratórios são partes integrantes do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – DEE/UFCG.

#### 4.1 Caracterização Magnética de Núcleos Toroidais Magneticamente Moles Utilizando um Integrador Analógico

Para a realização experimental do levantamento do laço  $B$  versus  $H$  utilizou-se o princípio apresentado no circuito da Figura 3.7. Porém, com um estágio de amplificação de corrente, como mostrado na Figura 4.1, pois o gerador de funções utilizado não fornece a corrente necessária para a saturação dos núcleos toroidais ferromagnéticos em estudo [62].

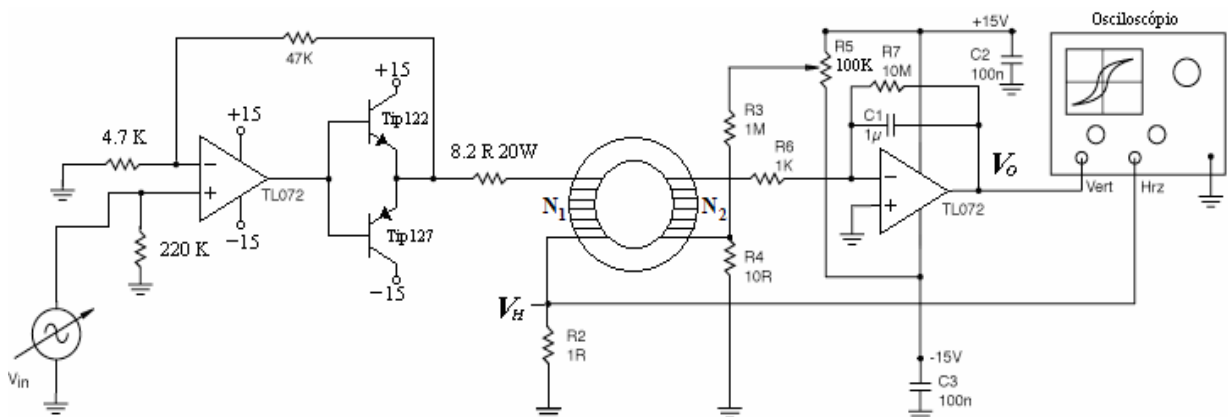


Figura 4.1. Circuito para determinação do laço  $B$  versus  $H$ .

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 4.1, 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  $V_0$  no canal 2 (vertical). Operando o osciloscópio no modo XY, são exibidos os gráficos  $V_0$  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 4.1 e 4.2.

$$B = \left[ \frac{R_6 C_1}{N_2 A_e} \right] V_0 \quad (4.1)$$

$$H = \left[ \frac{N_1}{l_e R_2} \right] V_H \quad (4.2)$$

Nessas 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.

Para a automatização da caracterização magnética dos núcleos toroidais foi desenvolvido um equipamento controlado por microcontrolador capaz de fornecer: a permeabilidade magnética relativa, a força coerciva, a intensidade de campo magnético e a densidade de fluxo magnético [63,64,65]. O condicionamento dos sinais analógicos  $V_0$  e  $V_H$  para a digitalização é realizado conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 4.2.

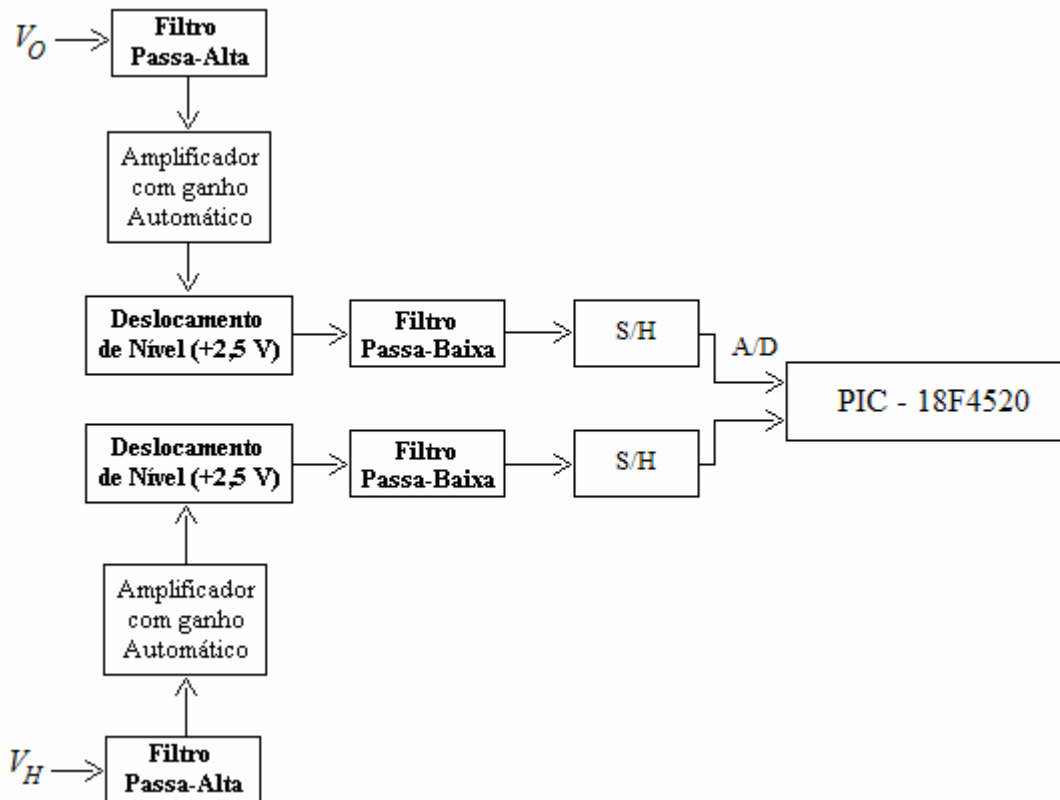


Figura 4.2 – Diagrama de blocos para o condicionamento dos sinais  $V_H$  e  $V_0$

No circuito utilizado para implementar esse diagrama de blocos foi utilizado o microcontrolador PIC-18F4520. O filtro passa-alta é utilizado apenas para retirar o nível DC do sinal e tem frequência de corte de 0,5 Hz. Como a frequência do laço  $B$  versus  $H$  em estudo é de 60 Hz, através da análise da  $FFT$  dos sinais  $V_0$  e  $V_H$ , constatou-se a importância de se considerar até a 10ª harmônica. Portanto, o filtro passa baixa tem frequência de corte de 600



Hz, sendo utilizado para diminuir a influência de ruídos. Pelo teorema de Nyquist, a frequência de amostragem tem que ser no mínimo duas vezes maior que a frequência mais alta contida em um sinal. Desse modo, a frequência de amostragem deve ser de, no mínimo, 1200 Hz. No entanto, na implementação final, visando uma melhor resolução, um período de amostragem de 0,1515 ms foi utilizado, correspondendo uma frequência de amostragem de 6,6 kHz.

Com a aquisição e a discretização dos sinais analógicos de interesse, a análise dessas variáveis pode ser feita. Para obtenção da permeabilidade magnética relativa foram empregadas as expressões 4.1 e 4.2. Como os sinais  $V_0$  e  $V_H$  estão discretizados, bastou apenas determinar a maior amplitude de cada sinal e substituir nas correspondentes equações.

Observa-se na Figura 4.3 que não existe um ponto para o valor de  $B$  igual a zero; o que existe são valores próximos de zero (pontos 1 e 2). Para se estimar o valor da força coerciva ( $H_C$ ) usou-se uma interpolação linear entre pontos 1 e 2. Na Figura 4.4 é apresentado o equipamento desenvolvido.

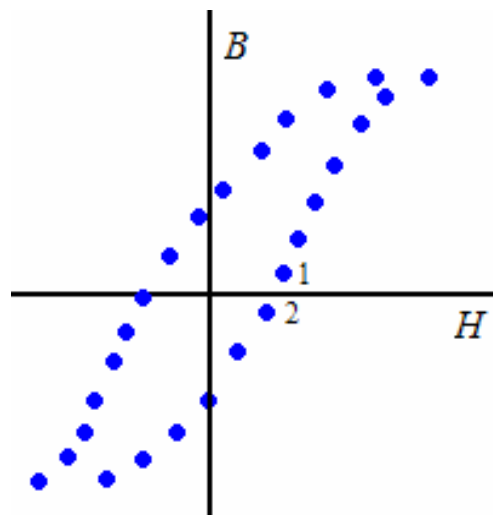


Figura 4.3 - Pontos do laço  $B$  versus  $H$



Figura 4.4 - Equipamento para caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles.

Para a visualização das variáveis fornecidas pelo equipamento de caracterização magnética em um microcomputador, um *software* foi desenvolvido, possibilitando a visualização das formas de ondas da corrente de excitação e da tensão induzida no enrolamento secundário e do laço  $B$  versus  $H$ . A tela de apresentação do *software* é mostrado nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

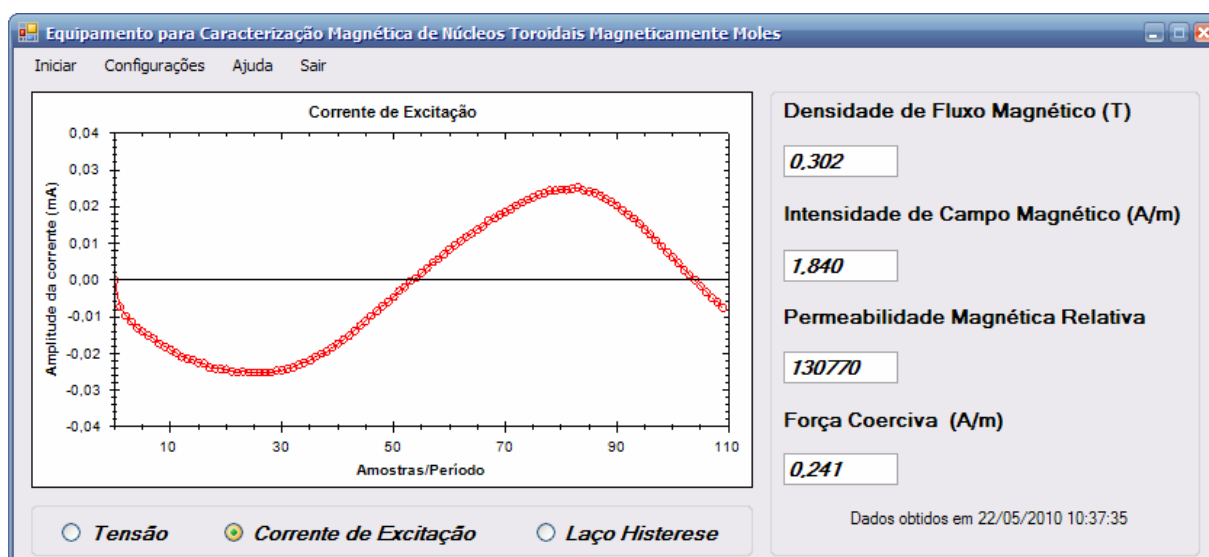


Figura 4.5 - Tela de apresentação do *software* desenvolvido para o equipamento de caracterização magnética, corrente de excitação.

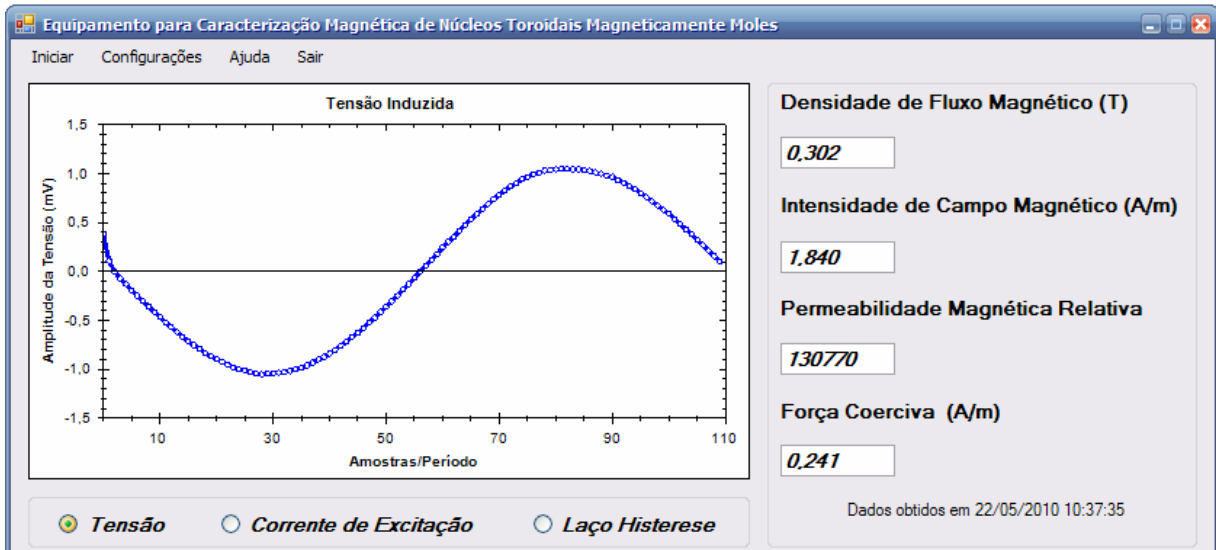


Figura 4.6 - Tela de apresentação do *software* desenvolvido para o equipamento de caracterização magnética, tensão induzida.

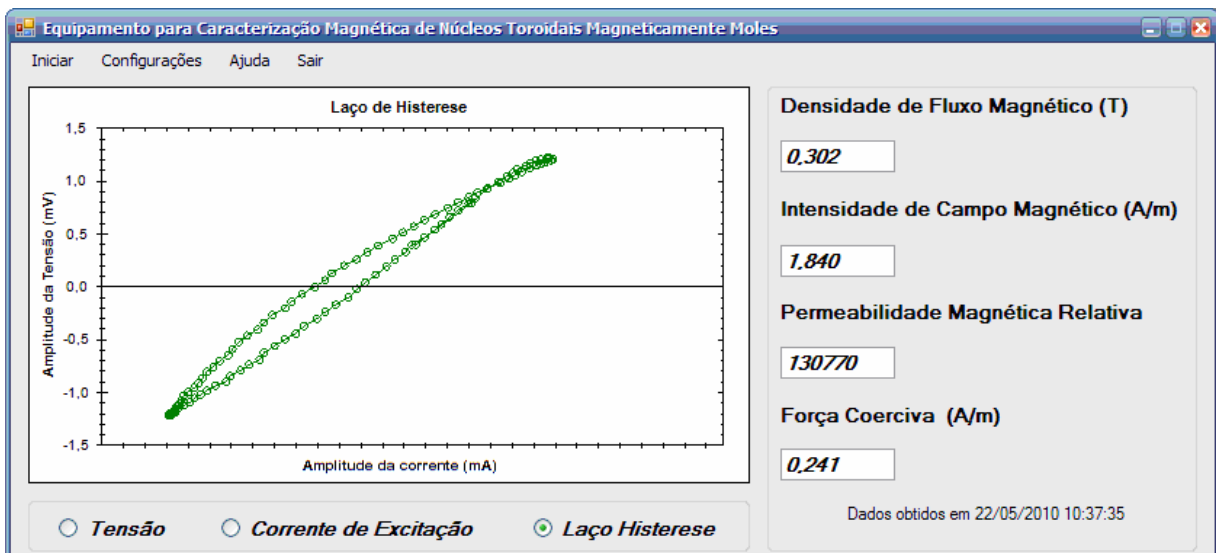


Figura 4.7 - Tela de apresentação do *software* desenvolvido para o equipamento de caracterização magnética, laço  $B$  versus  $H$ .

## 4.2 Caracterização Magnética de Núcleos Toroidais Magneticamente Moles Utilizando um Integrador Digital

Para a comparação entre a integração analógica, na qual são utilizados capacitor e resistor, e a integração digital, na qual são utilizadas rotinas computacionais, foi utilizado o mesmo circuito apresentado na Figura 4.1 sem o integrador analógico, conforme mostrado no Figura 4.8. Nesse caso, o sinal analógico  $V_I$  foi condicionado de forma idêntica ao sinal  $V_O$  e integrado pelo *software* desenvolvido, através do método de integração trapezoidal.

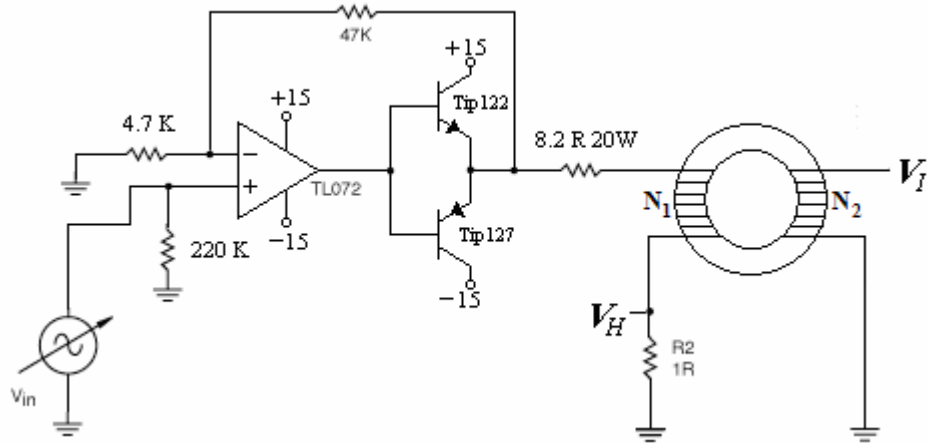
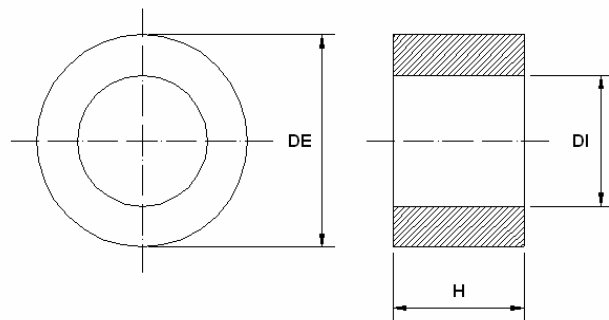


Figura 4.8. Circuito para determinação do laço  $B$  versus  $H$  com integração digital

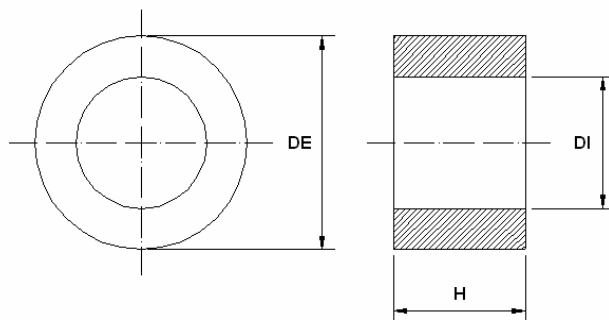
### 4.3 Projeto dos Transformadores de Corrente

Os núcleos toroidais que foram utilizados nos transformadores de corrente são: núcleo de liga nanocristalina de nome comercial FINEMET<sup>®</sup> FT-3KM F6045G e de composição química:  $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$  e o núcleo de Fe-3,2%Si GO E-004. As dimensões dos núcleos são mostradas nas Figuras 4.9 e 4.10.



$$\mathbf{DE = 63,5 \text{ mm} \quad DI = 38,5 \text{ mm} \quad H = 23 \text{ mm}}$$

Figura 4.9 – Dimensões do núcleo toroidal de liga nanocristalina, FINEMET<sup>®</sup>.



$$\mathbf{DE = 59 \text{ mm} \quad DI = 43 \text{ mm} \quad H = 24 \text{ mm}}$$

Figura 4.10 – Dimensões do núcleo toroidal de FeSi GO.

O projeto desses TC teve a limitação tanto da disponibilidade dos núcleos toroidais de liga nanocristalina e de FeSi GO quanto da intensidade de corrente elétrica que irá circular pelo enrolamento primário. Portanto, nesse caso, o primeiro passo para o projeto do TC foi a determinação do número de espiras do enrolamento secundário.

A bitola do condutor do enrolamento secundário do TC foi dimensionada para uma densidade de corrente  $J$  igual a  $3,9 \text{ A/mm}^2$  sob corrente nominal de  $5 \text{ A}$ . Desse modo, a área da secção transversal do condutor é de  $1,28 \text{ mm}^2$ , o que corresponde comercialmente a um fio 16 AWG. O número máximo de espiras que podem ser enroladas no núcleo toroidal de menor diâmetro interno, no caso o núcleo da FINEMET<sup>®</sup>, são 80 espiras. Como nesse caso, o TC tem um enrolamento primário e um enrolamento secundário, a medida que é enrolado o primeiro enrolamento, o diâmetro interno diminui, portanto o segundo enrolamento só pode ter 72 espiras. Desse modo, foi definido como 72 o número de espiras do enrolamento secundário.

O TC será destinado para utilização em serviços de medição e será do tipo enrolado. A relação nominal do transformador é de 1:1, ou seja, corrente no primário de  $5 \text{ A}$  e corrente no secundário de  $5 \text{ A}$ . A relação 1:1 foi definida por limitação da fonte de tensão utilizada nos experimentos.

Na tabela 4.1 é apresentada à ordem de grandeza das perdas da bobina de corrente de alguns instrumentos elétricos empregados com TC, submetidos a uma corrente no secundário de  $5 \text{ A}$  na frequência fundamental de  $60 \text{ Hz}$ .

Tabela 4.1 – Ordem de grandeza das perdas da bobina de corrente de alguns instrumentos elétricos empregados no secundário do TC,  $5 \text{ A}$ ,  $60 \text{ Hz}$  [66].

<b>Instrumentos</b>	<b>VA</b>	<b>W</b>	<b>var</b>
Medidor de kWh	0,7 a 2,0	0,5 a 1,6	0,4 a 1,5
Medidor de kvarh	0,7 a 2,0	0,5 a 1,6	0,4 a 1,5
Wattímetro	1,0 a 2,5	0,5 a 0,7	0,9 a 2,4
Varímetro	1,0 a 2,5	0,5 a 0,7	0,9 a 2,4
Amperímetro	1,2 a 3,0	1,0 a 1,5	0,9 a 2,5
Fasímetro	2,5 a 3,6	2,2 a 2,6	1,0 a 2,5

A partir da análise da tabela 4.1, pode-se determinar a potência do TC que está sendo projetado. Como nenhum instrumento ultrapassa a potência de  $4 \text{ VA}$ , o TC será projetado com uma potência aparente ( $S$ ) de  $5 \text{ VA}$ .

Para obter-se o número de espiras do enrolamento do TC é necessária a definição da frequência ( $f$ ) de operação do TC, da potência aparente ( $S$ ) do TC, da densidade de fluxo magnético de operação ( $B_{op}$ ), da área da secção magnética do núcleo toroidal ( $S_m$ ) e da corrente nominal. Como nesse caso, já foi definida a frequência de operação (60 Hz), o número de espiras (72), a potência aparente (5 VA), a corrente nominal (5 A) e as dimensões das secções dos núcleos toroidais, não resta nenhuma variável livre; portanto, pode-se apenas ser estimado o ponto de operação da densidade de fluxo magnético do núcleo em estudo.

A partir da relação 5.3 estima-se o  $B_{op}$  dos TC. O resultado obtido foi  $B_{op} = 0,45$  T para o TC com núcleo de liga nanocristalina e  $B_{op} = 0,33$  T para o TC com núcleo de FeSi GO. Através da análise das Figuras 4.11 e 4.12 comprova-se que ambos os TC irão operar na região linear.

$$N_2 = \frac{S}{4,44 \cdot I_2 \cdot B_{op} \cdot S_m \cdot f} \quad (5.3)$$

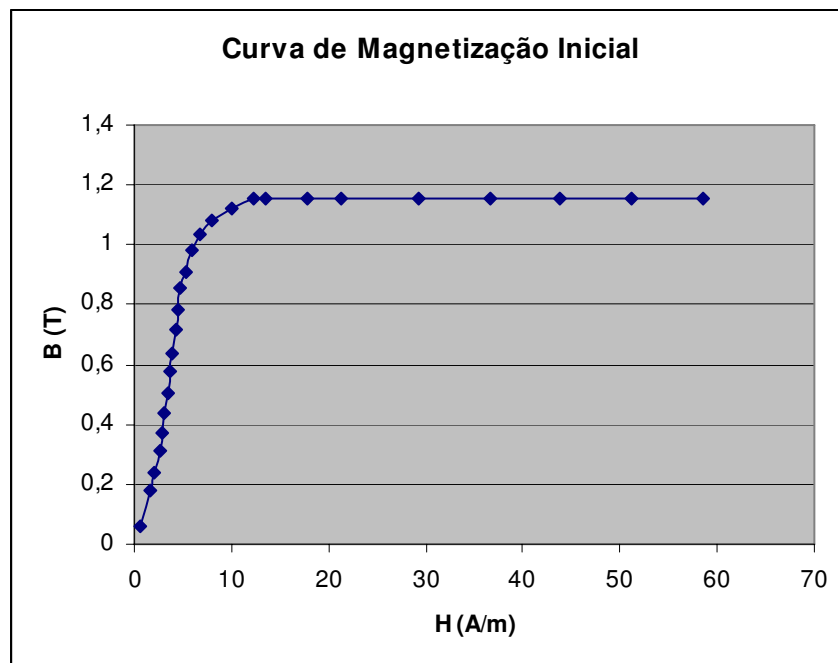


Figura 4.11 – Curva de Magnetização Inicial da Liga Nanocristalina FINEMET®

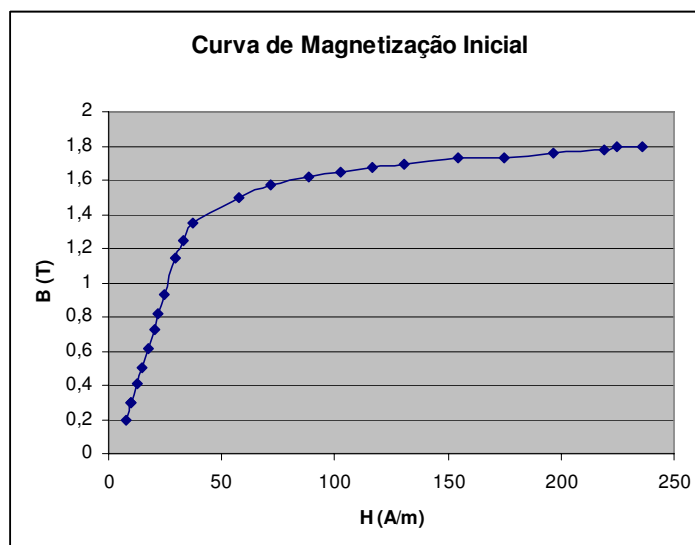


Figura 4.12 – Curva de Magnetização Inicial da Liga FeSi GO

#### 4.4 Ensaios para enquadramento dos TC nos paralelogramos de exatidão

Os ensaios para enquadramento dos TC nos paralelogramos de exatidão foram realizados seguindo a norma da ABNT - NBR 6856. O circuito para a realização dos experimentos é mostrado no diagrama da Figura 4.13. O material utilizado foi: fonte de tensão - California Instruments Modelo: 3001 iX, sensor de corrente – Agilent 1146A, osciloscópio – Agilent DSO7014A, impedância R – quatros resistores de  $50 \Omega/200 \text{ W}$ .

Como os TC foram projetados para uma potência de 5 VA, a norma NBR 6856 padroniza a impedância Z como sendo: resistência de  $0,18 \Omega$  e indutância de  $0,232 \text{ mH}$  em ensaios a 60 Hz. Para tal propósito, devido as limitações de cargas padrão, foram utilizados dois indutores em paralelo de  $0,5 \text{ mH}$  cada, resultando em uma indutância total de  $0,25 \text{ mH}$  e 9 resistores de  $1,5 \Omega$  ligados em paralelo, totalizando uma resistência total de  $0,195 \Omega$ . O valor da resistência total foi obtido utilizando-se um multímetro.

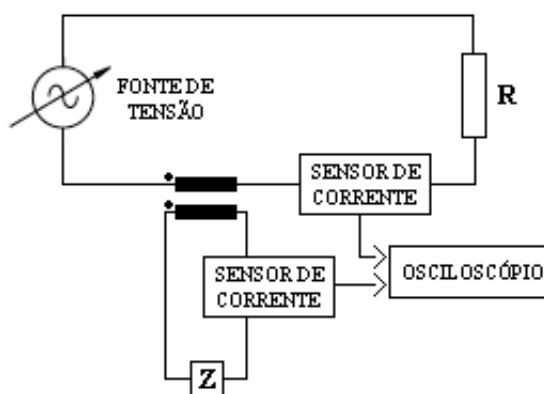


Figura 4.13 – Montagem para enquadramento dos TC sob ensaio nos paralelogramos de exatidão

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1 Caracterização Magnética de Núcleos Toroidais Magneticamente Moles

Na tabela 5.1 são apresentadas a permeabilidade magnética máxima e a densidade de saturação de fluxo magnéticos para diversos materiais sob ensaio, na frequência de 60 Hz. Os materiais apresentados na coluna 1 da Tabela 5.1 são os seguintes: NT27-TH50 (ferrite MnZn), M-033 e M-006 (liga nanocristalina NANOPERM<sup>®</sup>), N3E3 (liga nanocristalina, de composição básica: FeSiBNbCu), a liga FINEMET<sup>®</sup>, e a liga Fe-3,2%Si GO.  $L_e$  e  $A_e$  são, respectivamente, o comprimento médio da trajetória do fluxo magnético no interior do núcleo e a área efetiva da sessão transversal do núcleo.

Tabela 5.1 – Permeabilidade magnética máxima e densidade de saturação de fluxo magnético para diversos materiais sob ensaio

Núcleos Toroidais	$L_e$ (mm)	$A_e$ (mm <sup>2</sup> )	60Hz	
			$\mu_r$ máx	$B_{SAT}$ (T)
M-033	63,4	36	30012	1,09
NT27 TH-50	67,54	64,5	7308	0,32
N3E3	102	90	185707	0,94
M-006	102	90	33494	0,96
FINEMET	164,9	115	142000	1,15
FeSi GO	160,22	157,44	30994	1,79

A partir dos resultados mostrados na tabela 5.1, pode-se destacar que as ligas nanocristalinas apresentam permeabilidade magnética superior ao ferrite MnZn e a liga FeSi de grãos-orientados. Porém, dependendo da composição química da liga nanocristalina suas características magnéticas são afetadas. Por isso, se torna importante não apenas citar que um material é uma liga nanocristalina e sim a composição dessa liga nanocristalina.

### 5.2 Comparação entre os Circuitos com Integrador Analógico e Digital

A tensão induzida  $V_I$ , obtida utilizando o circuito da Figura 4.8, é apresentada na Figura 5.1. A tensão  $V_I$  ao ser integrada por uma rotina computacional é mostrada na Figura 5.2.



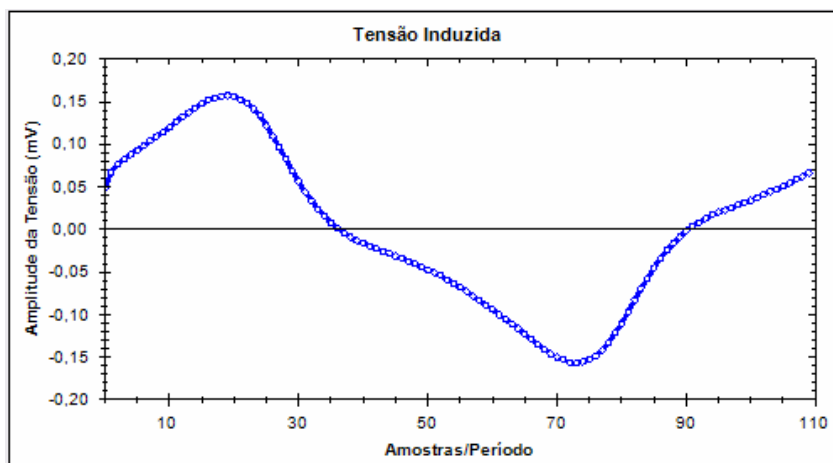


Figura 5.1 – Tensão induzida  $V_1$  obtida utilizando o circuito da Figura 4.8

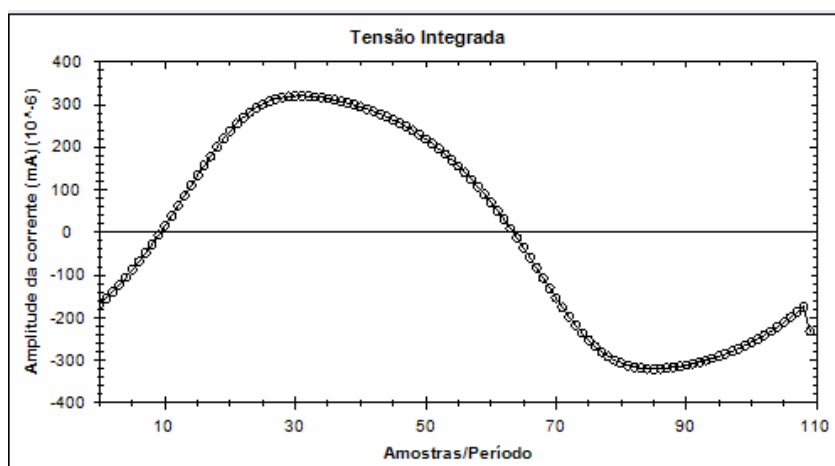


Figura 5.2 – Tensão integrada através de uma rotina computacional

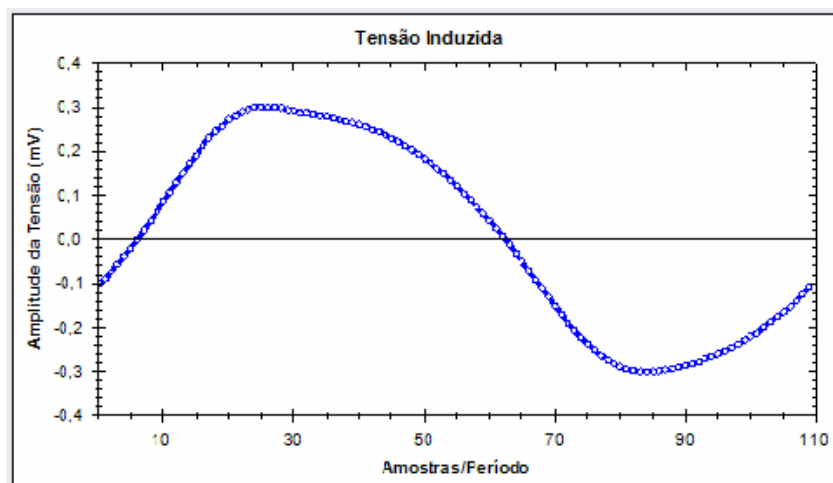


Figura 5.3 – Tensão induzida  $V_0$

Na Figura 5.3 é mostrada a tensão induzida  $V_0$ , obtida a partir do circuito da Figura 4.1, na qual foi utilizado um integrador analógico. A partir da análise das Figuras 5.2 e 5.3 pode-se perceber que os resultados obtidos com a integração analógica e digital têm formas

de onda semelhantes, na qual a única diferença é a amplitude dos sinais. Porém, para obter a densidade de fluxo magnético  $B$  a integração analógica utiliza a equação 4.1, enquanto na integração digital utiliza-se a equação 5.1.

$$B = \left[ \frac{1}{N_2 A_e} \right] \int V_t dt = \left[ \frac{1}{N_2 A_e} \right] V_I \quad (5.1)$$

Como o valor de  $R_6$  e  $C_1$  da expressão 4.1 são respectivamente 1 k $\Omega$  e 1  $\mu$ F, o seu produto é 0,001. Portanto, a tensão induzida  $V_0$  têm amplitude 1000 vezes maior do que a amplitude da tensão induzida  $V_1$  integrada. Desta forma, analisando-se as figuras 5.2 e 5.3 pode-se perceber que o máximo da tensão  $V_1$  integrada é próximo de  $300 \cdot 10^{-6}$  mV e o máximo da tensão induzida  $V_0$  é próximo de 0,3 mV, exatamente 1000 vezes maior. Pode-se, então, concluir que para um laço  $B$  versus  $H$  de 60 Hz, uma frequência de amostragem de 6,6 kHz é suficiente para realizar a integração de forma digital.

### 5.3 Enquadramento dos TC sob Ensaio nos Paralelogramos de Exatidão

A montagem feita para o enquadramento dos TC nos paralelogramos de exatidão segue o circuito da Figura 4.13. Na Figura 5.4 é mostrada a montagem experimental utilizada no laboratório de eletrônica industrial e acionamento de máquinas – LEIAM/DEE/UFCG, e na Figura 5.5 é apresentada, em diagrama de blocos, os detalhes do experimento.

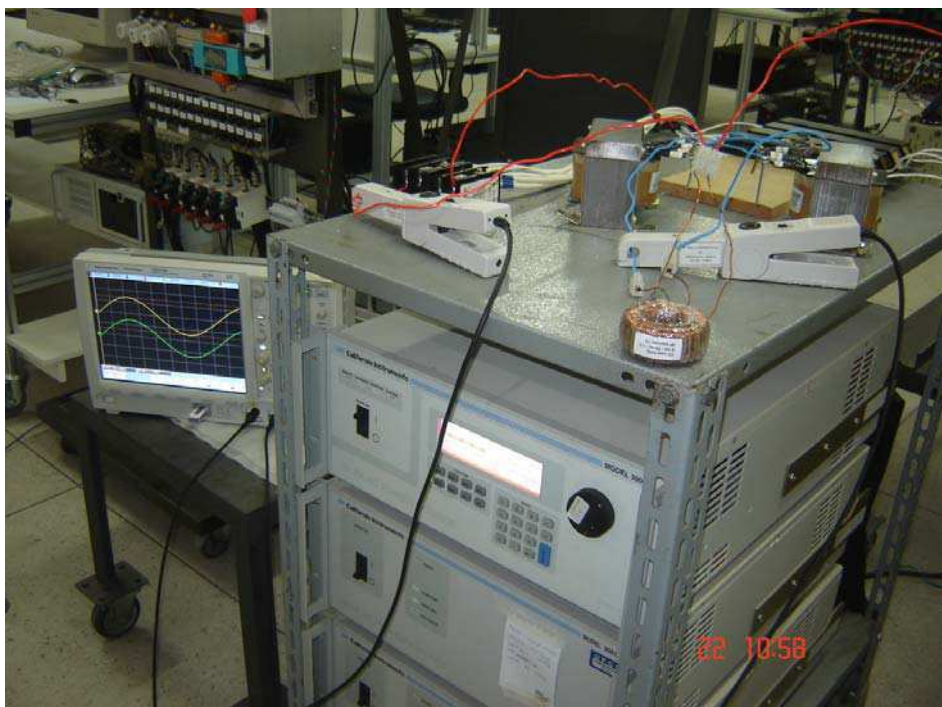


Figura 5.4 – Foto da montagem experimental

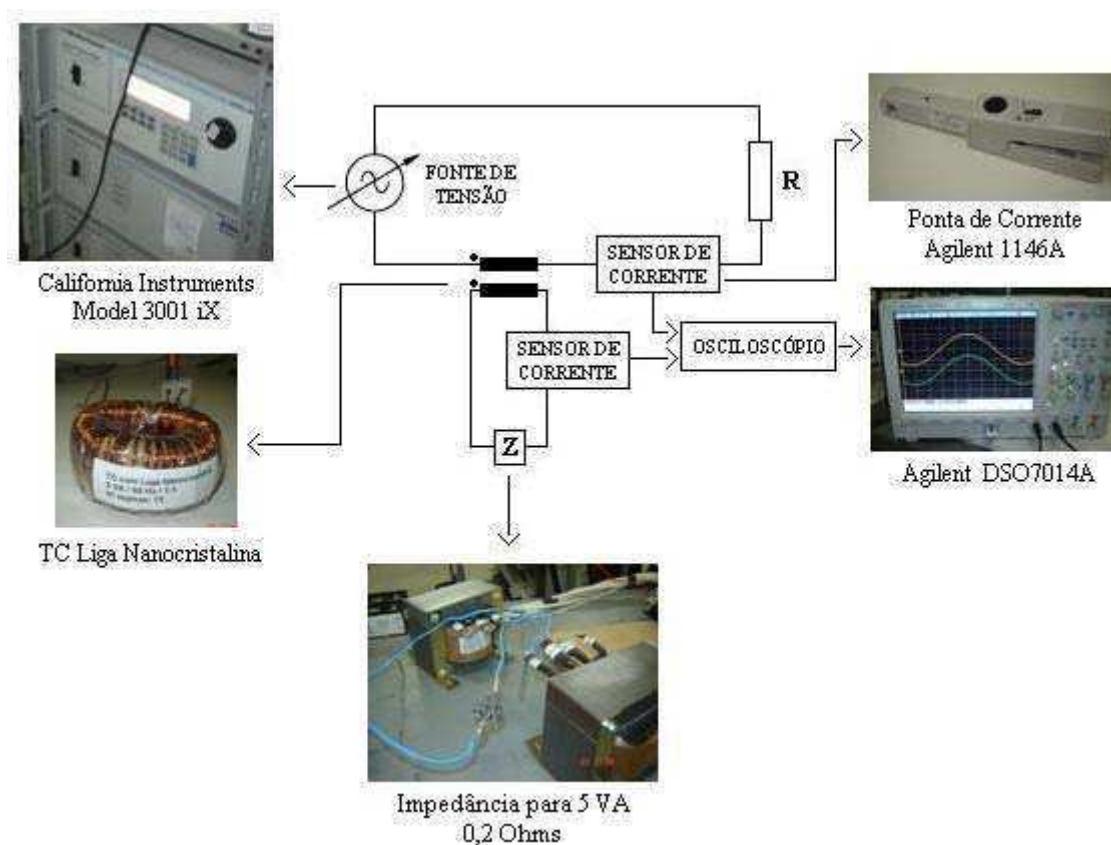


Figura 5.5 – Montagem experimental em detalhes

Sendo a corrente nominal dos TC sob ensaio de 5 A, os ensaios foram realizados com correntes relativas a 10% e 100% da corrente nominal, ou seja, 0,5 A e 5 A de corrente no primário do TC. Nas figuras 5.6 a 5.13 são apresentadas as formas de onda das correntes nos enrolamentos primário e secundário para os ensaios de 10 e 100% da corrente nominal do TC, assim como o erro amostral associado a cada experimento.

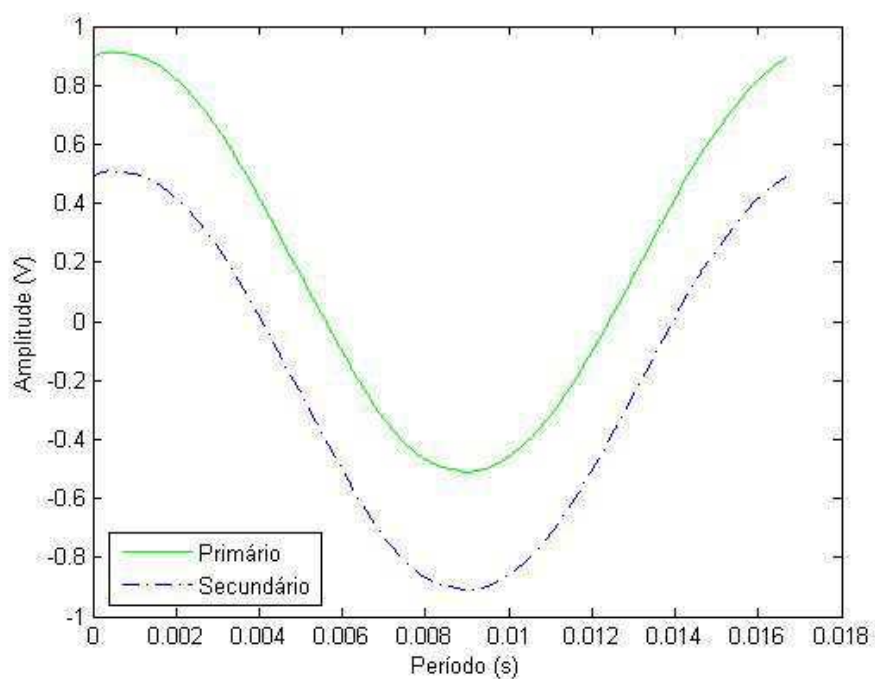


Figura 5.6 – Comparação entre as correntes primárias e secundárias do TC de liga nanocristalina sob ensaio a 100% da corrente nominal

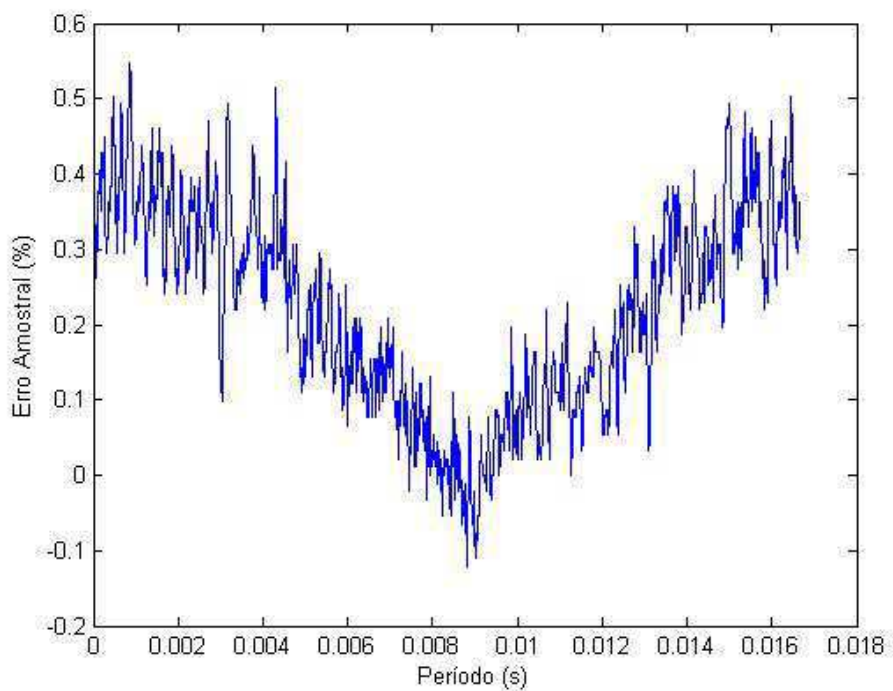


Figura 5.7 – Erro amostral do TC com núcleo de liga nanocristalina sob 100% da corrente nominal

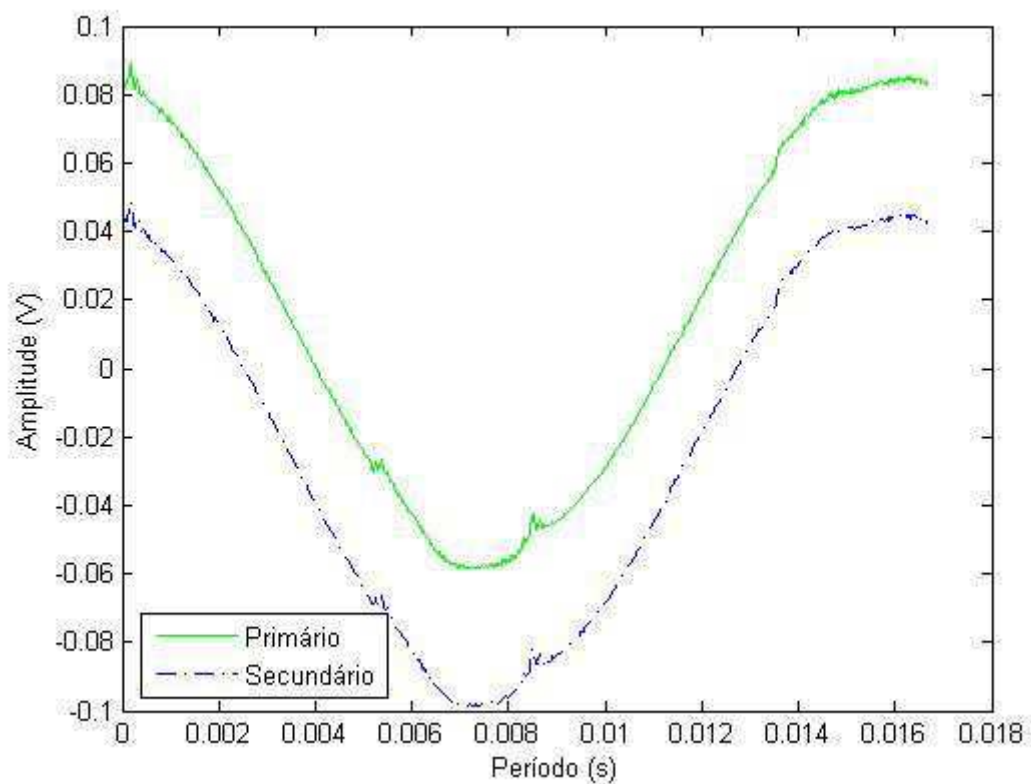


Figura 5.8 – Comparação entre as correntes primárias e secundárias do TC de liga nanocristalina sob ensaio a 10% da corrente nominal

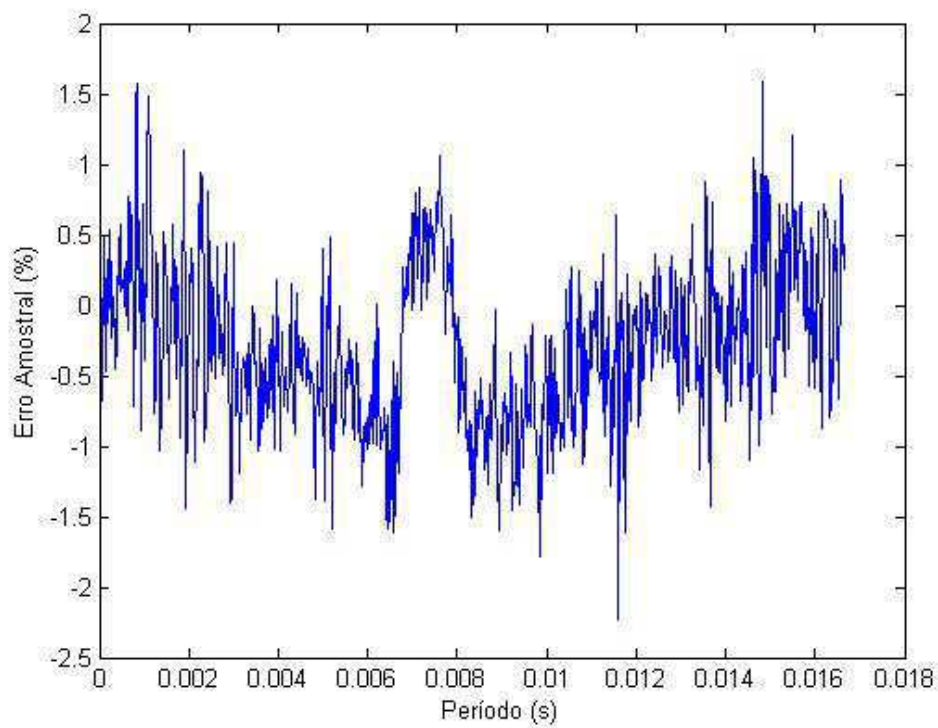


Figura 5.9 – Erro amostral do TC com núcleo de liga nanocristalina sob 10% da corrente nominal

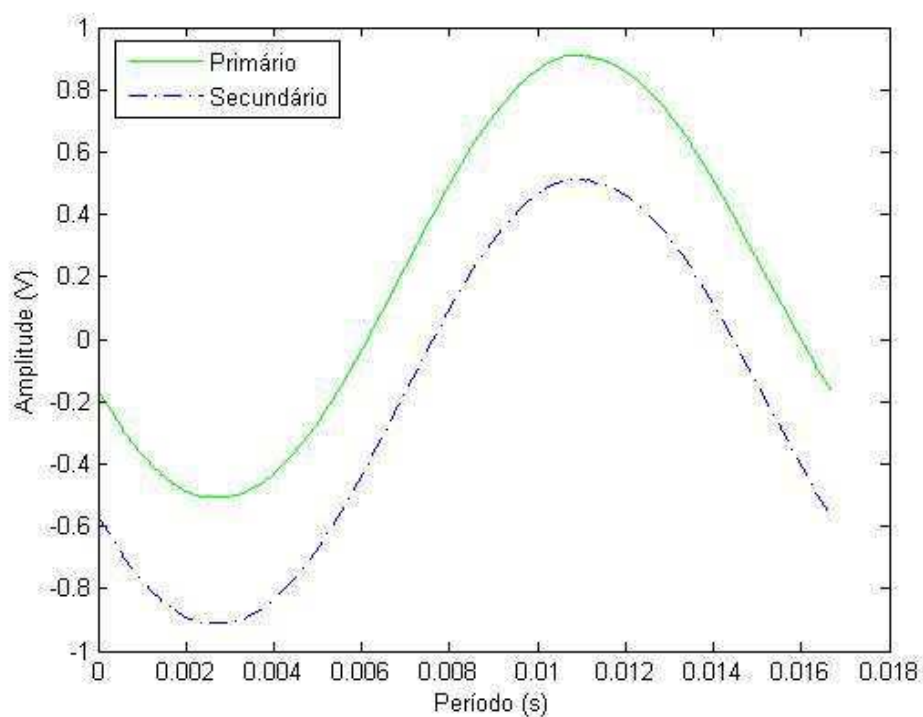


Figura 5.10 – Comparação entre as correntes primárias e secundárias do TC de FeSi sob ensaio a 100% da corrente nominal

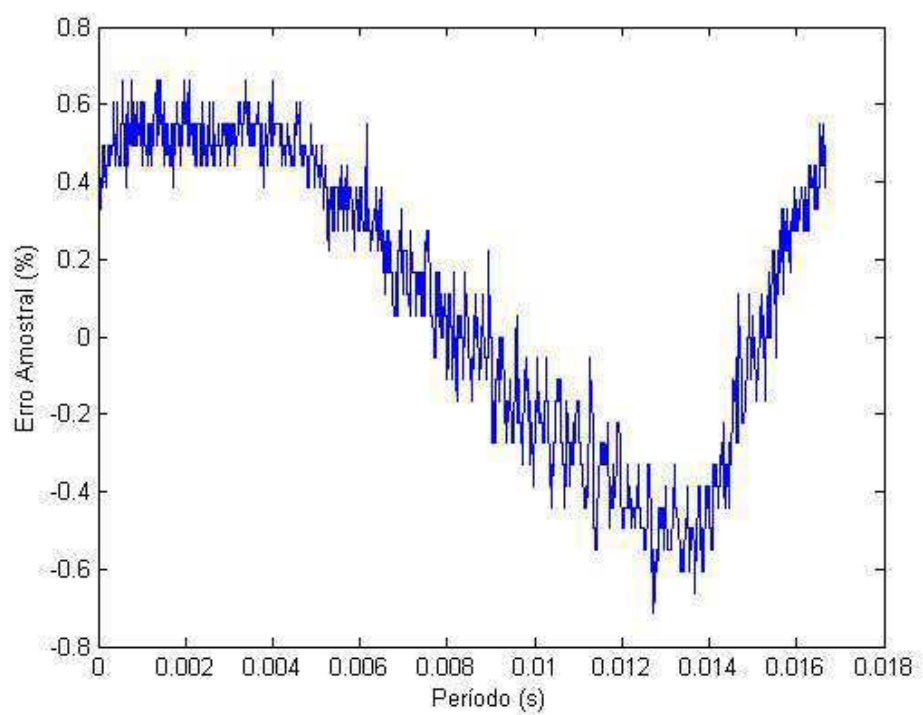


Figura 5.11 – Erro amostral do TC com núcleo de FeSi sob 100% da corrente nominal

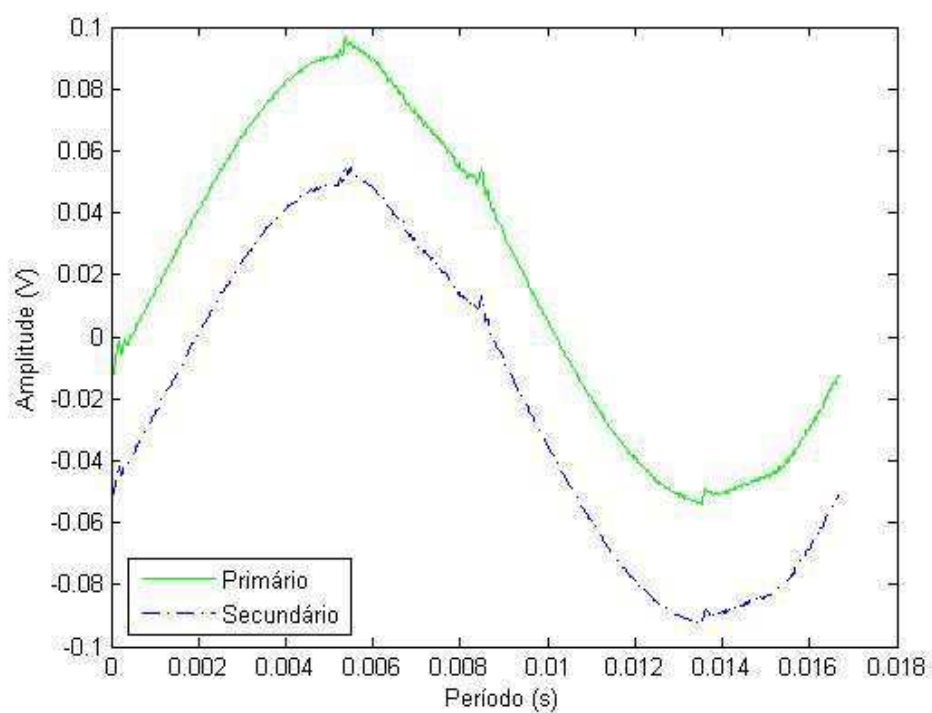


Figura 5.12 – Comparação entre as correntes primárias e secundárias do TC de FeSi sob ensaio a 10% da corrente nominal

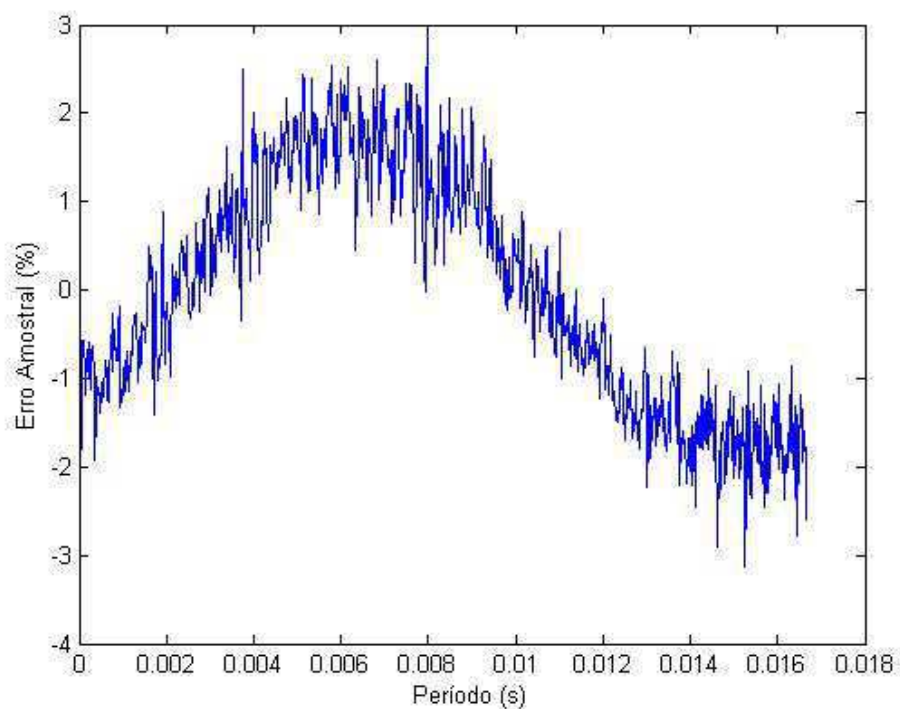


Figura 5.13 – Erro amostral do TC com núcleo de FeSi sob 10% da corrente nominal

A partir da análise das Figuras 5.6 a 5.13 pode-se construir a Tabela 5.2. Observa-se na Tabela 5.2 que os erros de ângulo de relação e de ângulo de fase são menores para o TC com núcleo de liga nanocristalina, e essa diferença é mais evidenciada para os ensaios a 10% da corrente nominal, tal diferença é justificada pela maior permeabilidade magnética das ligas nanocristalinas, fazendo com que a corrente de magnetização seja menor. Desse modo, o erro de ângulo de fase,  $\beta$ , é reduzido.

Uma observação adicional: como os enrolamentos primário e secundário dos TC foram enrolados a mão, mesmo essa execução sendo feita com muito cuidado, as espiras não ficam igualmente espaçadas, possibilitando caminhos para os fluxos de dispersão o que contribui para o aumento do erro de relação do TC. Para reduzir tal efeito, os enrolamentos das bobinas devem ser executados com máquinas especializadas, como as utilizadas nas fábricas de transformadores para instrumentos: TC e TP.

Tabela 5.2 – Erros de relação e de fase dos TC sob ensaio

	Erro de Relação		Erro de Ângulo de Fase	
	10%	100%	10%	100%
<b>Liga Nanocristalina</b>	0,689%	0,212%	1,28'	1,30'
<b>FeSi - GO</b>	1,209%	0,253%	14,31'	5,86'

Com os resultados contidos na Tabela 5.2 podem-se enquadrar os TC nos paralelogramos de exatidão. Na Figura 5.14 é ilustrado o paralelogramo para a classe de exatidão 0,3 com os resultados para o TC com núcleo de liga nanocristalina FINEMET. Para 100% da corrente nominal o TC se enquadra na classe 0,3. Porém, para 10% da corrente nominal o erro de relação fica fora do paralelogramo. Na Figura 5.15 é mostrado o TC no paralelogramo para a classe 0,6; nessa classe, o TC se enquadra tanto para 10% quanto para 100% da corrente nominal.



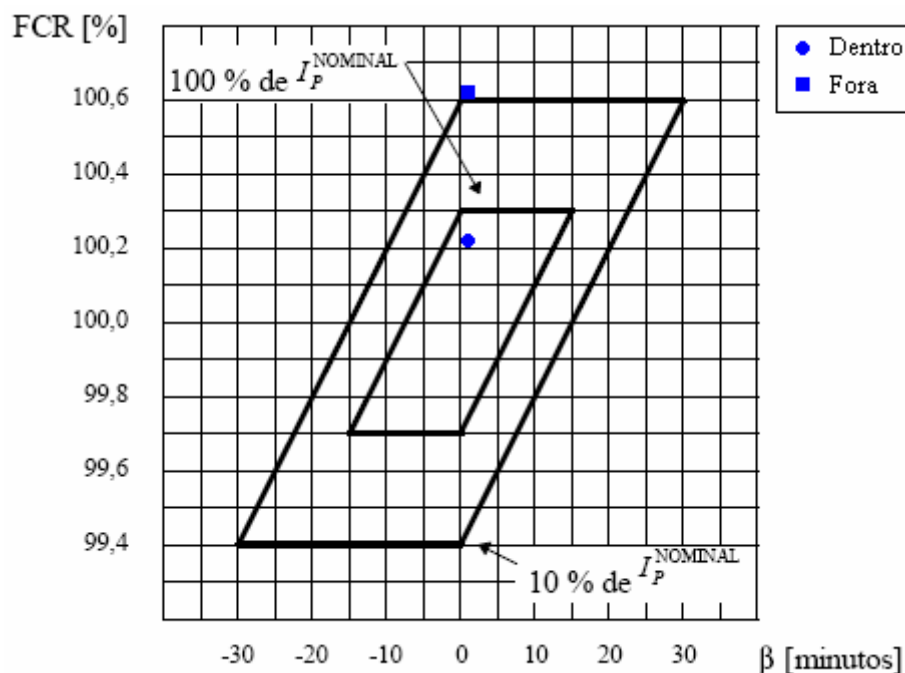


Figura 5.14 – Paralelogramo de exatidão classe 0,3 para a liga nanocristalina FINEMET

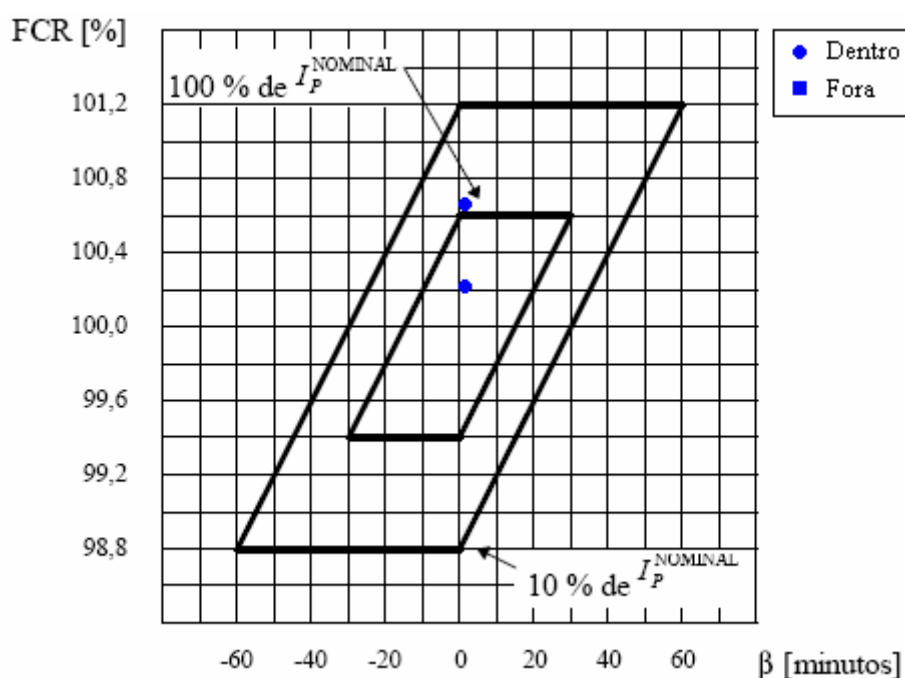


Figura 5.15 – Paralelogramo de exatidão classe 0,6 para a liga nanocristalina FINEMET

Na Figura 5.16 é ilustrado o paralelogramo para a classe de exatidão 0,3 com os resultados para o TC com núcleo de liga FeSi GO. Para 100% da corrente nominal o TC se enquadra na classe 0,3. Porém, para 10% da corrente nominal o erro de relação fica fora do paralelogramo. Na Figura 5.15 é mostrado o TC no paralelogramo para a classe 0,6; nessa

classe, o TC se enquadra perfeitamente para 100% da corrente nominal, no entanto, para 10% da corrente nominal o TC fica praticamente dentro do paralelogramo.

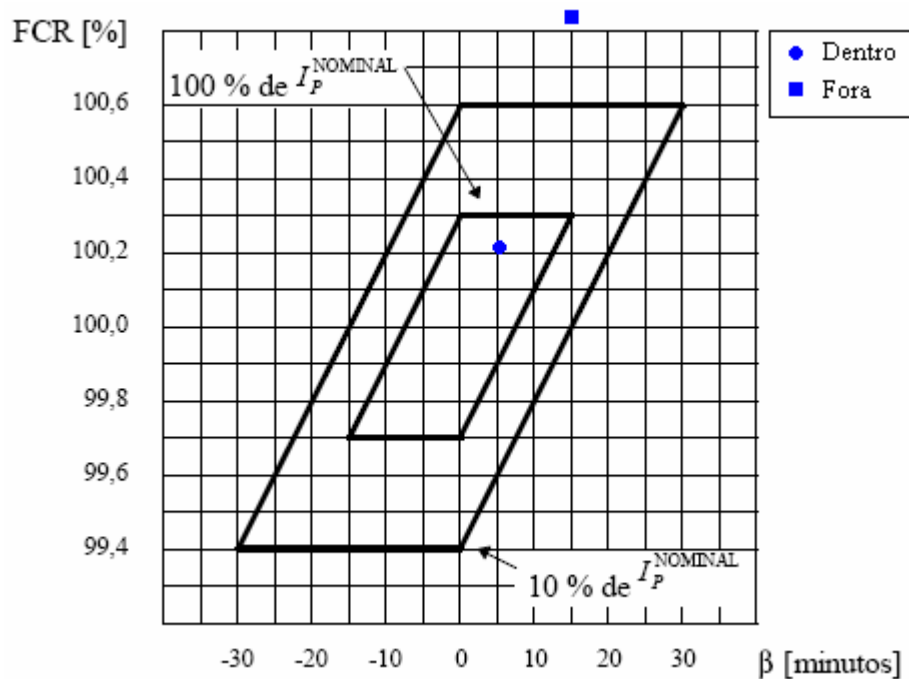


Figura 5.16 – Paralelogramo de exatidão classe 0,3 para a liga FeSi GO

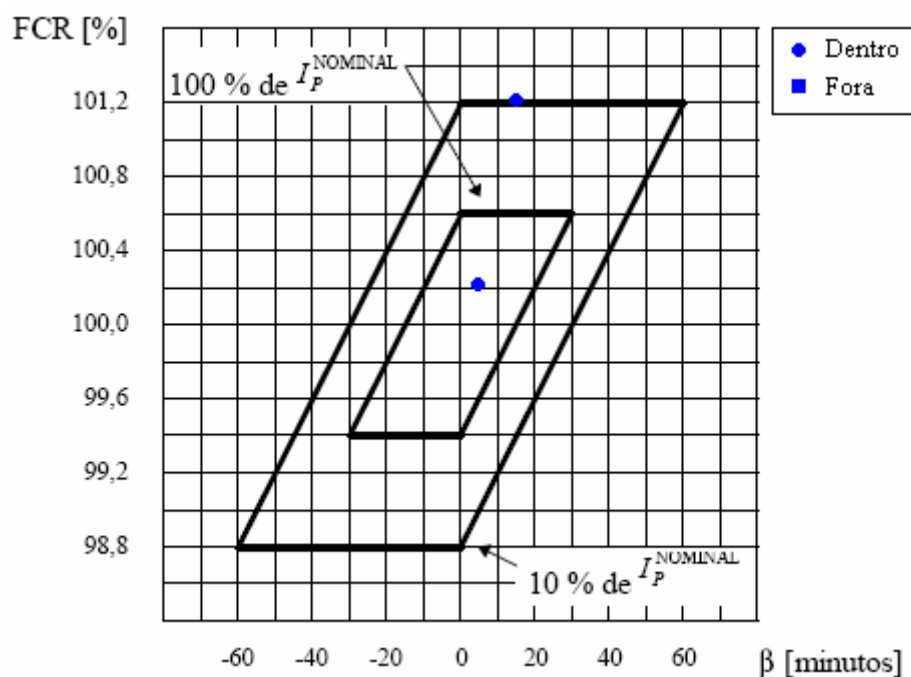


Figura 5.17 – Paralelogramo de exatidão classe 0,6 para a liga FeSi GO

De acordo com a análise dos paralelogramos fica comprovada a influência do fluxo de dispersão quando os enrolamentos não são enrolados de formas simétrica e igualmente

espaçadas. Pois, apenas os erros de relação ficaram fora dos paralelogramos para a classe de exatidão 0,3.

Os erros compostos obtidos a partir da expressão 3.19 são apresentados na Tabela 5.3. Pode-se observar que os erros compostos para os TC com núcleo de ligas nanocristalinas são menores que os erros para os TC com núcleo ligas FeSi GO. Devido ao fato deste método de avaliação ser apresentado como uma proposição e as pesquisas nessa área estarem sendo desenvolvidas, a comparação com os outros resultados obtidos com experimentos realizados sob mesmas condições se tornou inviável. Desse modo, a contribuição desta dissertação é para a comparação com resultados que venham a ser adquiridos em novos experimentos, principalmente em avaliações com excitação não senoidais, para a comparação com os erros em regime senoidal e não senoidal.

Tabela 5.3 – Erros compostos dos TC sob ensaio

	<b>Erro Composto</b>	
	10%	100%
<b>Liga Nanocristalina</b>	0,5815%	0,2363%
<b>FeSi - GO</b>	1,2046%	0,3552%

## 6. Conclusões

Comparativamente aos materiais ferromagnéticos convencionais (FeSi e ferrite mole), verificou-se que as ligas nanocristalinas apresentam algumas propriedades magnéticas superiores. Estas propriedades são: alta permeabilidade magnética relativa, alta densidade de saturação de fluxo magnético 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.

Adicionalmente, a linearidade da característica  $BH$ , apresentada por algumas ligas nanocristalinas, abaixo do joelho da curva inicial de magnetização, resulta numa relação entrada/saída adequada para utilização em sensores de correntes de baixa intensidade, como por exemplo, em sensores de correntes de fuga em pára-raios de óxido de zinco.

A frequência de amostragem de 6,6 kHz, utilizada no equipamento desenvolvido para a caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles se mostrou suficiente para realizar a integração digital da tensão induzida pelo enrolamento secundário.

Partindo-se dos resultados dos ensaios experimentais realizados, pode-se verificar que o TC com núcleo toroidal de liga nanocristalina apresenta menores valores de ângulo de fase (erro de fase), quando comparado com o TC com núcleo toroidal de FeSi, de características nominais idênticas, o que confirma a expectativa apresentada nos estudos analíticos.

A justificativa para o melhor desempenho do TC com núcleo toroidal de liga nanocristalina, em termos de ângulo de fase, deve-se ao fato de a permeabilidade magnética da liga nanocristalina  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$  ser superior à permeabilidade magnética da liga de Fe-3,2%Si GO, o que resulta em menores valores das componentes das correntes de magnetização e de perdas no núcleo.

## 7. Trabalhos Realizados

1. LUCIANO, B. A.; **BATISTA, T. C.**; FREIRE, R. C. S.; LIRA, J. G. A; CASTRO, W. B. Projeto e realização de um equipamento microcontrolado para caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas. CD ROM Anais CBECiMat2008, p. 7374-7385, 2008.
2. LUCIANO, B. A.; **BATISTA, T. C.**; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B.; CAMACHO, M. A. G. Medições das perdas e da corrente de excitação em transformadores monofásicos de baixa potência com núcleo de liga amorfa: antes e depois do processo de oxidação. In: CD ROM do 8º *Seminário Internacional de Metrologia Elétrica*. João Pessoa - PB, Brasil, 2009.
3. LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; INÁCIO, R. C.; **BATISTA, T. C.**; CAMACHO, M. A. G. Eficiência energética associada aos transformadores com núcleo de liga amorfa. In: CD ROM Anais do Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Belém-PA, p.1-5, 2009.
4. **BATISTA, T. C.**; LIRA, J. G. A; FREIRE, R. C. S.; LUCIANO, B. A.; GUERRA, F. C. F.; INÁCIO, R. C. Sistema automático de baixo custo para ensaios de perdas em núcleos de transformadores monofásicos. Artigo submetido ao INDUSCON 2010, evento a ser realizado em São Paulo – SP, de 8 a 10 de novembro de 2010.
5. LUCIANO, B. A.; **BATISTA, T. C.**; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, W. B. Aplicações de ligas nanocristalinas em dispositivos eletroeletrônicos. Artigo submetido ao 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, a ser realizado em Campos de Jordão – SP, de 21 a 25 de novembro de 2010.

## 8. Tema para Trabalhos Futuros

Como tema para futuros trabalhos é proposto estudos sobre as aplicações de materiais magneticamente moles obtidos pelo método da solidificação rápida (ligas amorfas e ligas nanocristalinas) como elementos dos núcleos de sensores de corrente elétrica, temperatura, pressão, velocidade, dentre outras grandezas de interesse.

### Referências

- [1] P. Duwez, “Metallic glasses – Historical background”, Topics in Applied Physics, Vol. 46, p.19-23, 1981.
- [2] Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, “New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure”, Journal of Applied Physics 64, pp. 6044-6046, 1988.
- [3] R. P. Homrich, “Transformador de corrente utilizando metal amorfo”, (Dissertação de Mestrado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.
- [4] B. A. Luciano, J. M. Cavalcanti de Albuquerque, W. B. Castro e C. R. M. Afonso, “Nanocrystalline material in toroidal cores for current transformer: analitical study and computational simulations”, Materials Research, vol. 8, No. 4, pp. 1-14 , Oct./Dec. 2005.
- [5] B. A. Luciano, R. C. S. Freire, J. G. A. Lira, G. Fontgalland e W. B. Castro, “Transformador de corrente com núcleo toroidal de liga nanocristalina”, Anais do 6o Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, Montevideú, Uruguai, Noviembre de 2005.
- [6] M. N. O. Sadiku, “Elementos de eletromagnetismo”, Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [7] G. R. SLEMON, “Equipamentos magnetelétricos”, Vol. 1. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1974, 240 p.
- [8] J. V. Filardo, “Perdas Magnéticas”, Tese Doutorado submetida à Universidade Federal do Paraná, 2001.
- [9] N. J. Batistela, “Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas Aço ao Silício”, Tese Doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [10] N. R. Grossner, “Transformer for Electronic Circuits”, McGraw-Hill Book Company, 2ª Ed, 1983.
- [11] R. Lee, “Electronic Transformers and Circuits”, Inc. John Wiley & Sons, 2ª Ed, 1955.
- [12] G. Bertotti, “General properties of power losses in soft ferromagnetic materials”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, ed. 1, pp. 621 – 630, 1988.
- [13] D. Lin, P. Zhou, W. N. Fu, Z. Badics, Z. J. Cendes, “A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, ed. 2, pp. 1318 – 1321, 2004.
- [14] N. Matsushita, D. Kim, M. Abe, “High-Flux Density and Low-Core Losses Attained for Ferrite/Permalloy Composite Core”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, ed.10, pp. 2824 – 2826, 2006.

- [15] W. H. Hayt, Jr, "Eletromagnetismo", Rio de Janeiro; LTC - Livros técnicos e científicos, 3ª Edição, 1983.
- [16] J. P. Sinnecker, "Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos", São Paulo: Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 22, ed. 3, Setembro 2000.
- [17] B. A. Luciano, "Aplicações Eletroeletrônicas de Materiais Magnéticos Obtidos pelo método de Solidificação Rápida", Campina Grande, 2002.
- [18] Y. Yoshizawa, "Magnetic Properties and Microstructure of Nanocrystalline Fe-Based Alloys", Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, Vol 1, pp.51-62, 1999.
- [19] G. Herzer, "Grain structure and magnetism of nanocrystalline ferromagnets", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 25, p. 3327-3329, 1989.
- [20] N. Hasegawa e M. Saito, "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*, vol. 54, pp. 1270-1278, 1990.
- [21] N. Kataoka, T. Matsunaga, A. Inoue e T. Masumoto, "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, vol. 30, p. 947-950, 1989.
- [22] K. Nakanishi, O. Shimizu e S. Yoshida, "Magnetic Properties of Fe-X-N (X=Zr, Hf, Nb, Ta) Films", Journal of Magnetic Society of Japan, vol. 15, p. 371-374, 1991.
- [23] K. Susuki, N. Kataoka, A. Inoue, A. Makino e T. Masumoto, "High saturation magnetization and soft magnetic properties of bcc Fe-Zr-B alloys with ultrafine grain structure", Mater. Trans. JIM, vol. 31, pp.743-746, August 1990.
- [24] Y. Fujii, A. Fujita, A. Seki e T. Tomida, "Magnetic properties of fine crystalline Fe-P-C-Cu-X alloys", J. Appl. Phys., vol. 70, pp. 6241-6243, November, 1991.
- [25] A. Makino, K. Suzuki, A. Inoue e T. Masumoto, "Low core loss of a bcc Fe<sub>86</sub>Zr<sub>7</sub>B<sub>6</sub>Cu<sub>1</sub> alloy with nanoscale grain size", Materials Transactions, JIM, vol. 32, No. 6, pp. 551-556, 1991.
- [26] HA. Ślowska-Waniewska, M. Gutowski e H. K. Lachowicz, "Superparamagnetism in a nanocrystalline Fe-based metallic glass", *Phys. Rev. B*, vol. 46, 14594-14597, 1992.
- [27] T. Tomida, "Crystallization of Fe-Si-B-Ga-Nb amorphous alloy", *Materials Science and Engineering: A*, A179/A180, pp. 521-525, 1994.
- [28] J. Degro, P. Vojtanik, M. Konc, A. Zentko, K. Csach e V. Ocelik, "Magnetic properties of nanocrystalline FeCuNb(Sb/W)SiB alloys", Transactions on Magnetics, vol. 30, No. 2, pp.499-501, 1994.
- [29] J. S. Lee, K. Y. Kim, T. H. Noh, I. K. Kang, Y. C. Yoo, "The Magnetic Properties of Ultrathin FeBNbCu Nanocrystalline Alloy". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, N° 6, pp. 3901-3903, 1995
- [30] J. Y. Park, K.Y. Kim, T. H. Noh, S. J. Suh, "The Magnetic Properties of Ultrathin Fe-Al-Nb-B-Cu Nanocrystalline Alloys". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, N° 5, 1996.
- [31] Y. Naitoh, T. Bitoh, T. Hatanai, A. Makino, A., A. Inoue e T. Masumoto, "Applications of nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B (M=Zr, Nb) alloys". NanoStructured Materials, vol. 8, No. 8, pp. 987-995, 1997.

- [32] M. A. Willard, M., D. E. Laughlin, M. E. McHenry, D. Thoma, K. Sickafus, J. O. Cross e V. G. Harris, “Structure and magnetic properties of  $(\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5})_{88}\text{Zr}_{7}\text{B}_{4}\text{Cu}_{1}$  nanocrystalline alloys”, *Journal of Applied Physics*, vol. 84, No. 12, pp. 6773-6777, 1998.
- [33] M. A. Willard, M. –Q. Huang, D. E. Laughlin, M. E. McHenry, J. O. Cross, V. G. Harris e C. Franchetti, “Magnetic properties of HIPTERM  $(\text{Fe}, \text{Co})_{88}\text{Zr}_{7}\text{B}_{4}\text{Cu}_{1}$  magnets”, *Journal of Applied Physics*, vol. 85, No. 8, pp. 4421-4423, 1999.
- [34] N. S. Mitrovic, S. R. Djukic e S. B. Djuric, “Crystallization of the Fe-Cu-M-Si-B (M= Nb, V) amorphous alloys by direct-current joule heating”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, No. 5, pp.3858-3862, 2000.
- [35] J. M. Borrego, C. F. Conde, A. Conde e J. M. Grenèche, “Crystallization of Co-containing Finemet Alloys”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, No. 287, pp. 120-124, 2001.
- [36] M. Hasiak, M. Miglierini, Y. Yamashiro, W.H. Ciurzynska, H. Fukunaga, “Microstructure and magnetic properties of nanocrystalline Fe–Zr–B alloy”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 239, pp. 506–508, 2002.
- [37] A. Makino, J. H. Claassen, R. M. Stroud e V. G. Harris, “Structure and magnetic properties of (Co,Fe)- based nanocrystalline soft magnetic materials”, *J. Appl. Phys.*, vol. 91, No. 10, pp. 8420-8422, 2002.
- [38] A. Makino e T. Bitoh, “As-quenched and nanocrystallized structure for Nb-poor Fe-Nb-B-P-Cu soft magnetic alloys melt spun in air”, *J. Appl. Phys.*, vol. 93, pp. 6522-6524, 2003.
- [39] Y. Yoshizawa, S. Fujii, D. H. Ping, M. Ohnuma e K. Hono, “Magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co-Cu-M-Si-B alloys (M: Nb, Zr)”, *Materials Science and Engineering A* 375-377, pp.207-212, 2004.
- [40] Y. Yoshizawa e Y. Ogawa, “Magnetic properties of high Bs nanocrystalline FeCoCuNbSiB alloys”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, No. 10, pp.3271-3273, 2000.
- [41] A. Bahrami, H. R. Madaah Hosseini, P. Abachi, S. Miraghaei, “Structural and soft magnetic properties of nanocrystalline  $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{10}\text{Ni}_5$  powders prepared by mechanical alloying”, *Materials Letters*, No. 60, pp. 1068–1070, 2006.
- [42] J. C.-h. Shih, L. Bourgeois, K. Suzuki e J. S. Garitaonandia, “Grain growth process of two-phase nanocrystalline soft magnetic materials”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 304, pp. 693-696, 2006.
- [43] A. Makino, M. Bingo, T. Teruo, K. Yubuta e A. Inoue, “Improvement of soft magnetic properties by simultaneous addition of P and Cu for nanocrystalline FeNbB alloys”, *J. Appl. Phys.*, vol. 101, pp. 1-3, 2007.
- [44] D. Muraca, V. Cremaschi, J. Moya, H. Sirkin, “FINEMET type alloy without Si: Structural and magnetic properties”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 320, pp. 1639–1644, 2008.
- [45] A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta e A. Inoue, “New excellent soft magnetic FeSiBPCu nanocrystallized alloys with high Bs of 1.9 T from nanohetero-amorphous phase”, *IEEE Trans. Mag.*, vol. 45, pp. 4302-4305, 2009.
- [46] A. González, L. Escoda, J. J. Sunol, G. Shao, B. Arcondo, P. Bruna, “Thermal and structural study of nanocrystalline Fe(Co)NiZrB alloys prepared by mechanical alloying”, *Journal Materials Science*, No. 45, pp. 557–561, 2010.

- [47] N. A. Mariana, J. E. May, S. E. Kuri, “Ligas Finemet nanocristalizadas a partir de precursores amorfos”, REM: Ouro Preto: Revista Escola de Minas, abr. jun. 2004.
- [48] A. Makino, T. Hatanai, Y. Naitoh, T. Bitoh, A. Inoue, T. MASUMOTO, “Applications of Nanocrystalline Soft Magnetic Fe-M-B (M = Zr, Nb) Alloys “NANOPERM<sup>®</sup>”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, 1997.
- [49] J. Petzold, P. Joachim e J. Richter, “Nanocrystalline materials: soft magnetic alloys for high-tech devices”, Siemens-Review Special - R&D, pp. 27-29, Fall 96.
- [50] H. Akagi e T. Oe, “A specific filter for eliminating high-frequency leakage current from the grounded heat sink in a motor drive with an active front end”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, No. 2, pp.763-770, 2008.
- [51] F. Costa, F. Alves, J. B. Desmoulins e D. Hérisson, “Design of a flyback transformer using a stress annealed Finemet nanocrystalline alloys”, Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, pp.308-313, 2000.
- [52] B. A. Luciano, J. G. A. Lira, R. C. S. Freire, E. G. Costa e W. B. Castro, “Sensores de Corrente Elétrica com Núcleos Toroidais de Liga Nanocristalina”, In: Anais do 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM. Vitória: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Brasil, pp.3724-3732, 2007.
- [53] E. C. T. Macedo, J. G. A. Lira, E. G. Costa, R. C. S. Freire, B. A. Luciano e M. J. A. Maia, “Inductive current sensor based on nanocrystalline alloys”, In: XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 2009.
- [54] J. G. A. Lira, “Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára-raios de óxido de zinco”, (Tese de Doutorado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- [55] A. F. Flores Filho e R. P. Homrich, “Transformador de corrente com metal amorfo”, São Paulo: Anais do 3º Seminário sobre Materiais Magnéticos, ABM, pp. 163-185, 1991.
- [56] B. A. Luciano, R. C. S. Freire, J. G. A. Lira, G. Fontgalland, W. B. Castro, “Transformador de Corrente com Núcleo Toroidal de Liga Nanocristalina”, IEEE Latin American transactions, Vol. 4, No. 3, pp. 160-164, 2006.
- [57] E. C. T. Macedo, “Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-raios de Óxido de Zinco”, (Dissertação de Mestrado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- [58] C. J. Guedes, “Medidores de Energia Elétrica – Especificação e Padronização”, V Encontro Regional Sobre Medição de Energia Elétrica, 1988.
- [59] M. B. Stout, “Curso Básico de Medidas Elétricas”, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Vol. 2. 1974.
- [60] A. Cataliotti, D. Cara, A. E. Emanuel, S. Nuccio, “Characterization of Clamp-On Current Transformers Under Nonsinusoidal Conditions”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 373-380, 2009.
- [61] S. C. F. Freire, “Desempenho de Transformadores de Corrente em Regime Não Senoidal”, (Dissertação de Mestrado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2010.



- [62] T. C. Batista, B. A. Luciano e J. G. A. Lira, “Caracterização de ligas nanocristalinas em núcleos toroidais para aplicações eletroeletrônicas”, *Revista Pesquisa*, Vol. 1, N. 6 (nov./dez. 2007) Campina Grande: PRPG/UFCG, pp. 859- 864, 2007.
- [63] A. J. Batista, J. C. S. Fagundes, P. Viarouge, “An automated system for core loss measurement and characterization: a useful tool for high frequency magnetic components design”, *Industrial Electronics*, 1998. Proceedings. ISIE '98. IEEE International Symposium, Vol. 2, pp. 540–545, 1998.
- [64] T. C. Batista, B. A. Luciano, “Aplicações de Novos Materiais Magnéticos na Eletroeletrônica”, V Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Novembro, 2008.
- [65] B. A. Luciano, T. C. Batista, R. C. S. Freire, J. G. A. Lira, W. B. Castro, “Projeto e realização de um equipamento microcontrolado para caracterização magnética de núcleos toroidais magneticamente moles”, In: 8th International Seminar on Electrical Metrology, 2009, João Pessoa. Proceedings of the 8th International Seminar on Electrical Metrology, p. 1-5. 2009.
- [66] S. M. Filho, “Medição de Energia Elétrica”, Recife: Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, 2ª Ed, 1980.