

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA – ESCOLA DE ENGENHARIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FÍSICA

Julia Dalla Costa

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL
DE UM TRANSFORMADOR DE ALTA FREQUÊNCIA COM NÚCLEO
DE MATRIZ VÍTREA DOPADA COM Sm OU Pr**

Porto Alegre
2/2022

Julia Dalla Costa

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL
DE UM TRANSFORMADOR DE ALTA FREQUÊNCIA COM NÚCLEO
DE MATRIZ VÍTREA DOPADA COM Sm OU Pr**

Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Física da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do Título de Bacharel(a) em Engenharia Física.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Naira Maria Balzaretto

Porto Alegre
2/2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Naira Maria Balzaretto, por ter sido minha orientadora e ter desempenhado tal função com dedicação e paciência, com a qual guiou meu aprendizado.

Agradeço ao professor Silvio Buchner e aos mestrandos Gisele de Lima Hippler, Leonardo de Lima Evaristo e Rafael Abel da Silveira, que me guiaram e auxiliaram na elaboração dos vidros.

Ao Dirceu Adair Bueno Júnior e à Oficina Mecânica do IF, que elaboraram o molde toroidal para o projeto.

Aos professores Sabrina Nicolodi de Oliveira Viegas e Alexandre da Cas Viegas, que realizaram as medidas de magnetização e me auxiliaram sanando dúvidas no decorrer do trabalho.

Agradeço, também, aos meus pais Mateus e Vania, por todo suporte e incentivo durante toda minha vida.

RESUMO

No presente trabalho, foi realizada uma prova de conceito sobre a viabilidade de construção de um transformador de alta frequência (de 50kHz à 200kHz) feito de matriz vítrea dopada com elementos terras raras. O desempenho do transformador construído foi comparado com o de transformadores comerciais feitos de pó de ferro prensado. Primeiramente, foram fabricadas matrizes vítreas de germanato de chumbo ($GeO_2 \cdot PbO$) e de dissilicato de lítio ($Li_2Si_2O_5$), dopadas com samário ou praseodímio em concentrações de 1%. Depois, foram analisadas as amostras com melhor curva de histerese, através de um Magnetômetro de Amostra Vibrante, para ser produzida uma amostra em formato toroidal com concentração de dopante de 5%, com a qual foi prototipado um transformador. Foram realizados ensaios para comparar o desempenho do transformador construído com o do transformador comercial. Os resultados obtidos indicam que seria necessária uma quantidade bem maior de elemento terra rara para que o desempenho fosse satisfatório.

Palavras-chave: Transformadores de alta frequência. Vidros dopados com terras raras. Medidas de Magnetização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo dos momentos de spin dos íons de ferro no Fe_3O_4	11
Figura 2 – Estrutura atômica tipo espinélio dos óxidos ferromagnéticos.....	12
Figura 3 – Esquema de um transformador ideal.....	14
Figura 4 – Circuito equivalente de um transformador real	16
Figura 5 – Anéis de corrente induzidos em lâminas	17
Figura 6 – Esquema do alinhamento dos domínios magnéticos.....	19
Figura 7 – Laço de histerese	20
Figura 8 – Curvas de magnetização para $MnFe_2O_4$ em temperatura ambiente	21
Figura 9 – Curvas de magnetização de nanopartículas de $NiFe_2O_4$	21
Figura 10 – Curvas de magnetização para o pó de ferro.....	22
Figura 11 – Matrizes e dopantes a serem utilizados para a produção dos vidros	24
Figura 12 – Balança eletrônica JS-110.....	25
Figura 13 – Mistura pronta em cadinho de platina	26
Figura 14 – Forno utilizado para a fusão do vidro.....	26
Figura 15 – Aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$	27
Figura 16 – Rampa de aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$	27
Figura 17 – Aquecimento da amostra de $GeO_2 \cdot PbO$	27
Figura 18 – Rampa de aquecimento das amostras de $GeO_2 \cdot PbO$	28
Figura 19 – Moagem do vidro.....	28
Figura 20 – Esquema de um magnetômetro de amostra vibrante (VSM)	29
Figura 21 – Curvas de histerese das amostras vítreas.....	30
Figura 22 – Dimensões do núcleo MMT002T2408 da Magmattec.....	31
Figura 23 – Aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$ com annealing	32
Figura 24 – Forno Lavoisier do LAPMA.....	32
Figura 25 – Vidro depois de vertido e desmoldado, com excesso	33
Figura 26 – Processo de usinagem do toróide	33
Figura 27 – Protótipo do transformador concluído	33
Figura 28 – Esquema do ensaio TTR.....	34
Figura 29 – Transformador com núcleo diamagnético.....	34
Figura 30 – Ensaio TTR	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pontos de interesse da curva de histerese das amostras vítreas	30
Quadro 2 – Resultados do ensaio TTR	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

TR – Terras Raras

OTR – Óxidos de Terras Raras

VSM – Magnetômetro de Amostra Vibrante

CA – Corrente Alternada

LAMPA – Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados

LAM – Laboratório de Magnetismo

TTR - *Transformer Turns Ratio*

LISTA DE SÍMBOLOS

V_p	Tensão do enrolamento primário
V_s	Tensão do enrolamento secundário
N_p	Número de espiras no primário
N_s	Número de espiras no secundário
I_p	Corrente induzida no primário
I_s	Corrente induzida no secundário
I_0	Corrente total sem carga
X_m	Reatância indutiva do componente magnetizador
R_c	Resistência do componente magnetizador
R_1	Resistência no fio de cobre do primário
R_2	Resistência no fio de cobre do secundário
X_{L1}	Reatância de dispersão 1
X_{L2}	Reatância de dispersão 2
B_M	Indução magnética
P_F	Perdas por corrente de Foucault
k_F	Constante do material
f	Frequência
h	Espessura
β	Beta
D_{ext}	Diâmetro externo
D_{int}	Diâmetro interno
V_{in}	Tensão de entrada
V_{CA}	Tensão de saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
2 ESTADO DA ARTE	11
2.1 NÚCLEOS MAGNÉTICOS	11
2.2 EMPREGO DOS TERRAS RARAS	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 TRANSFORMADOR IDEAL	14
3.2 TRANSFORMADOR REAL	15
3.2.1 Perdas por corrente de Foucault	16
3.2.2 Perdas por Histerese	17
3.3 TRANSFORMADORES DE ALTA FREQUÊNCIA	23
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	24
4.1 SÍNTESE DOS VIDROS DOPADOS COM TERRAS RARAS	24
4.2 MEDIDAS DE MAGNETIZAÇÃO	28
4.3 FABRICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE ALTA FREQUÊNCIA	31
4.4 ENSAIOS GERAIS	33
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Segundo Cuesto; Oliva; Pollari (2018), cerca de 5% da energia elétrica global é consumida por perdas em transformadores, o equivalente à demanda de eletricidade do continente africano.

Transformadores de alta frequência são usados para uma ampla gama de aplicações avançadas, desde aparelhos eletrônicos pessoais a aceleradores de partículas. Portanto, eles ocupam um papel essencial no crescimento econômico e no bem-estar da população.

Aumentar a eficiência dessas máquinas elétricas é essencial para a redução do consumo dos recursos naturais globais e do efeito estufa. De acordo com Kelet et al. (2020, p. 61, tradução própria)¹:

O impacto estimado associado ao uso de transformadores de distribuição mais eficientes em termos energéticos a nível global implicaria em uma economia de 750TWh em 2040, o que significaria evitar mais de 450 M t de emissões de gases de efeito estufa.

Visto que a sociedade atual depende cada vez mais de energia elétrica, “o crescimento dos sistemas de energia colocou enormes responsabilidades na indústria de transformadores para fornecer transformadores confiáveis e econômicos”, destacam Kulkarni e Khaparde (2013, p. 15, tradução própria)².

Nessa perspectiva, a diminuição das perdas dos transformadores de alta frequência, que ocorrem principalmente devido à histerese magnética e às correntes de Foucault, pode ser dada, segundo Bispo (1989), pela utilização de circuitos magnéticos que apresentem um melhor desempenho, determinado pelas características magnéticas, elétricas e térmicas do material utilizado.

Conforme Lin e Zook (1989), o núcleo ideal deve ter: alta permeabilidade magnética, alta resistividade elétrica e alta saturação magnética.

¹ “The estimated impact associated with the adoption of more energy-efficient distribution transformers globally would imply savings of 750TWh in 2040, meaning an avoidance of more than 450 M t of greenhouse gas emissions.” (Tradução nossa).

² “The phenomenal growth of power systems has put tremendous responsibilities on the transformer industry to supply reliable and cost-effective transformers.” (Tradução nossa).

Até o momento, não foram localizadas referências sobre o emprego de matrizes vítreas dopadas com terras raras (TR) para a elaboração de núcleos de transformadores. Seu uso se justificaria pela combinação da resposta magnética dos íons TR com o comportamento isolante das matrizes vítreas, visto que, segundo Bernardino (2018, p. 22), “estes íons interagem muito fracamente com o material hospedeiro”.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- a) fabricar e analisar as propriedades magnéticas das matrizes de germanato de chumbo ($GeO_2 \cdot PbO$) e dissilicato de lítio ($Li_2Si_2O_5$), dopadas com samário e praseodímio em concentrações de 1%;
- b) verificar a amostra com menor perda por histerese e melhor custo-benefício;
- c) fabricar um núcleo toroidal vítreo com concentração de 5% de TR para prototipar um transformador de alta frequência;
- d) fazer ensaios no protótipo para calcular perdas do núcleo e eficiência do transformador e comparar com o desempenho de um transformador comercial de mesmas dimensões.

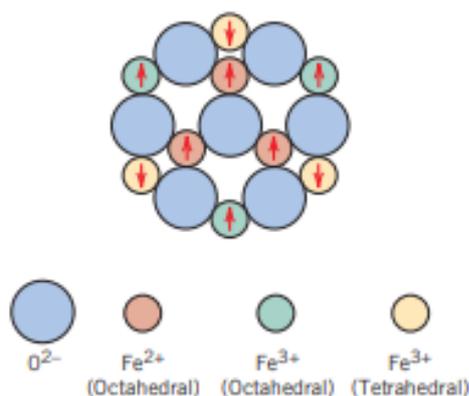
2 ESTADO DA ARTE

2.1 NÚCLEOS MAGNÉTICOS

Segundo Basquioto (2019, p. 27), “diversos materiais são utilizados para a fabricação dos núcleos magnéticos de transformadores: aços siliciosos, ligas amorfas e ligas nanocristalinas”. Porém, para transformadores que operam em alta frequência, as perdas por correntes parasitas não permitem o uso de aços e ligas metálicas, e são utilizados, portanto, óxidos ferrimagnéticos, visto que são isolantes elétricos.

Os óxidos ferrimagnéticos, popularmente chamados de “ferritas”, são uma classe de materiais cerâmicos cujas propriedades magnéticas surgem de sua estrutura cristalina, em que os momentos magnéticos associados aos íons Fe^{+3} se cancelam e os momentos magnéticos associados aos outros íons de elementos metálicos (Fe^{+2} , Ni^{+2} , Mn^{+2} ou Zn^{+2}) se reforçam e geram uma magnetização permanente do material, como pode ser visto na figura 1. (LINHARES et. al., 2004).

Figura 1 – Arranjo dos momentos de spin dos íons de ferro no Fe_3O_4

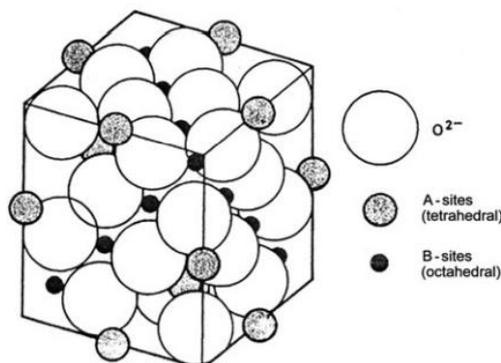


Fonte: Callister (2010).

As ferritas mais comuns em transformadores de alta frequência são as de zinco ($ZnFe_2O_4$) ou as de manganês ($MnFe_2O_4$) que possuem estrutura do tipo espinélio (figura 2), em que os oxigênios, denotados pelos círculos brancos, formam uma rede cúbica de face centrada em que os íons metálicos, denotados pelos círculos

pretos e cinzas, ocupam sítios octaédricos e tetraédricos respectivamente (SIRDESHMUKH; SIRDESHMUKH; SUBHADRA, 2011).

Figura 2 – Estrutura atômica tipo espinélio dos óxidos ferromagnéticos



Fonte: Sirdeshmukh; Sirdeshmukh; Subhadra (2011).

Esses óxidos são facilmente magnetizáveis e, por isso, são utilizados na fabricação de núcleos de transformadores de alta frequência.

Em contrapartida, Heaviside, em 1887, propôs a utilização de núcleos de pó de ferro para aplicações de alta frequência, e, em 1918, o primeiro produto comercial foi lançado. O desenvolvimento desses núcleos se originou de pesquisas realizadas por engenheiros do Bell Telephone Laboratory. O processo de produção consiste em comprimir o pó de ferro a altas pressões, formando um núcleo aparentemente sólido, mas contendo porosidades (ar entre as partículas do pó). Em comparação com a ferrita, os núcleos de pó de ferro prensado possuem permeabilidade mais baixa, contudo suportam corrente mais alta sem saturar.

2.2 EMPREGO DOS TERRAS RARAS

Os elementos terras raras são uma classe de dezessete elementos químicos da tabela periódica – quinze Lantanídeos, Escândio e Ítrio – que levam esse nome por serem compostos difíceis de extrair. O Brasil é um dos principais exportadores de terras raras do mundo, junto com China, Índia e Malásia. Porém, diferente destes, o Brasil não domina processos que possam agregar valor ao minério, como, por exemplo, a fabricação de super ímãs para motores elétricos ou geradores eólicos.

Portanto, hoje o Brasil não consegue custos competitivos frente ao produto importado (BERNARDES, 2021).

Os TR são elementos extremamente reativos com o oxigênio e geralmente são encontrados na forma de óxidos termicamente estáveis, conhecidos com óxidos de terras raras (OTR).

O magnetismo desses elementos deriva dos elétrons do orbital 4f incompleto, que não participam de ligações químicas por serem blindados pelos orbitais $5s^2$ e $5p^1$ (SALES, 2011). Suas propriedades magnéticas são de origem atômica e não molecular, como a dos óxidos ferrimagnéticos.

Elementos TR são usados como dopantes por terem capacidade de melhorar as características ópticas e magnéticas dos materiais dopados (MILANOVA; TSVETKOV, 2021). Segundo Pasha (2015), compreender as diversas propriedades dos TR é de grande importância para solucionar os problemas atuais de engenharia.

Atualmente, vidros dopados com terras raras são majoritariamente utilizados em lasers, sensores e fibras óticas. No entanto, não foram encontrados relatos do uso desse material em núcleos de transformadores. No presente trabalho, foi investigada a possibilidade de aliar as propriedades magnéticas destes íons com matrizes vítreas, que são bons isolantes elétricos, para fabricação de transformadores para alta frequência.

Os vidros são geralmente dopados com óxidos de terras raras (OTR) e os elétrons 4f desses elementos, quando oxidados, continuam blindados e não participam das ligações químicas, fazendo com que o material final seja magnetizável, e independente de domínios (LAPOLLI, 2006). Segundo Lapolli (2016, p.12):

Como se pode observar, a complexidade das interações nos terras raras favorecem suas aplicações em todas as áreas da tecnologia além de serem materiais de grande interesse estratégico. Da mesma forma, seus compostos ampliam tanto a possibilidade de aplicação nestas diversas áreas como no desenvolvimento de materiais nas novas tecnologias que vêm surgindo no mercado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TRANSFORMADOR IDEAL

Segundo Chapman (2011, p. 66), “Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão.”³.

O transformador ideal, representado na figura 3, consiste em duas bobinas, com números diferentes de espiras, enroladas em torno de um núcleo que, por indução eletromagnética, transforma uma tensão e corrente em outra de mesma frequência.

Figura 3 – Esquema de um transformador ideal



Fonte: Chapman (2011).

Idealmente, o transformador seria capaz de transferir toda a potência do enrolamento primário (conectado à fonte) para o secundário (conectado à carga). Para isso, as perdas energéticas devem ser desprezadas, ou seja, assume-se que:

- a) a resistência elétrica dos enrolamentos é nula;
- b) o material do núcleo constituinte não possui histerese;
- c) as perdas no núcleo por corrente de Foucault são nulas;
- d) a permeabilidade magnética do núcleo é infinita.

³ “A transformer is a device that changes AC electric power at one frequency and voltage level to AC electric power at the same frequency and another voltage level through the action of a magnetic field.”. (tradução nossa).

Nesse caso, as relações entre a tensão de entrada e a de saída, e entre a corrente de entrada e a de saída, são dadas pelas igualdades:

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

Em que: V_p é a tensão do enrolamento primário; V_s , a tensão do enrolamento secundário; N_p , o número de espiras no primário; N_s , o número de espiras no secundário; I_p , corrente induzida no primário; e I_s , corrente induzida no secundário.

3.2 TRANSFORMADOR REAL

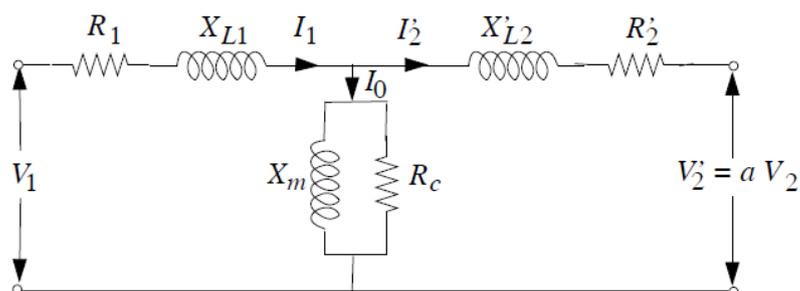
Ao contrário dos transformadores ideais, os transformadores reais apresentam perdas decorrentes de sua operação, que fazem com que a potência de saída seja menor do que a de entrada, como:

- a) perdas nos enrolamentos primário e secundário, devido ao aquecimento resistivo dos fios condutores;
- b) perdas por correntes parasitas, devido ao aquecimento resistivo do núcleo do transformador;
- c) perdas por histerese, associadas à alteração dos domínios magnéticos do núcleo;
- d) perdas pelos fluxos de dispersão, que escapam do núcleo e produzem uma indutância de dispersão nas bobinas primária e secundária.

Na figura 4, a corrente total sem carga (I_0) consiste no componente magnetizador, responsável por produzir o fluxo magnético, representado pela reatância indutiva (X_m), e no componente de perdas do núcleo, representado pela resistência (R_c).

As perdas nos enrolamentos primário e secundário são representadas pelas resistências R_1 e R_2 , respectivamente, e as perdas por correntes parasitas são denotadas pelas reatâncias indutivas (X_{L1} e X_{L2}), chamadas de reatâncias de dispersão.

Figura 4 – Circuito equivalente de um transformador real



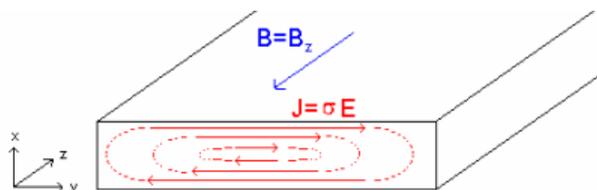
Fonte: Kulkarni e Khaparde (2013).

Transformadores de alta frequência passam por processos cíclicos de magnetização e, por isso, as perdas por correntes de Foucault e as perdas por histerese são as mais estudadas. Segundo Lin e Zook (1989), essas perdas são caracterizadas como uma resistência ao fluxo magnético transferido através do núcleo. A proporção dessas perdas depende do tamanho, material, tipo e tensão magnética deste núcleo.

3.2.1 Perdas por corrente de Foucault

Uma corrente elétrica alternada que passa através dos enrolamentos primário e secundário do transformador cria um campo magnético variável nesse, que induzirá correntes no núcleo. Essas correntes fluem em circuitos fechados (figura 5), perpendicularmente ao campo magnético e são conhecidas como correntes de Foucault.

Figura 5 – Anéis de corrente induzidos em lâminas



Fonte: Meurer (2005).

Segundo Bastos (2004), as perdas por corrente de Foucault podem ser calculadas por:

$$P_F = k_F \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot h^2 \quad (2)$$

Em que P_F são as perdas de Foucault em W/kg; k_F é uma constante que depende do material; f é a frequência em Hz; h é a espessura da chapa em metros; e B é a indução magnética em Wb/m^2 .

Essas correntes parasitas podem ser mitigadas por meio da laminação dos materiais que compõem o núcleo, que achatam esses anéis de corrente, ou pela adição de silício ao aço, o que reduz a condutividade elétrica do material.

Analisando dessa forma, vidros dopados com terras raras, por possuírem ótimas propriedades magnéticas e baixa condutividade elétrica, podem ser bons candidatos para núcleos de transformadores, uma vez que não haveria portadores de carga livres no material.

3.2.2 Perdas por Histerese

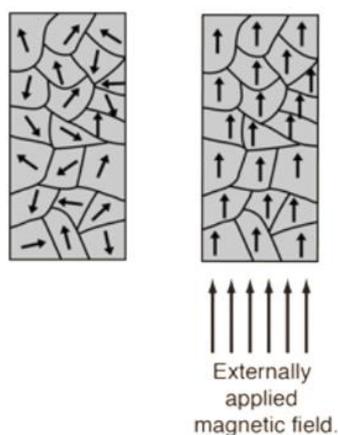
Todos os materiais podem ser classificados em termos de seu comportamento magnético, que pode ser dividido em categorias com base em sua suscetibilidade magnética. As propriedades magnéticas dos materiais são: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo.

- a) Materiais Diamagnéticos: possuem magnetismo muito fraco e não permanente, que existe somente enquanto um campo externo é aplicado. A magnetização induzida tem sentido contrário ao campo aplicado e é uma manifestação da Lei de Lenz.
- b) Materiais Paramagnéticos: possuem susceptibilidade magnética fraca, mas têm momento magnético resultante quando expostos a um campo externo, visto que possuem dipolos atômicos livres (spin dos elétrons livres).
- c) Materiais Ferromagnéticos: possuem momento magnético grande e permanente na ausência de campo externo, visto que têm um alinhamento mútuo de spins ao longo de grandes regiões do material, conhecidas como domínios. Esses momentos magnéticos se originam de orbitais atômicos incompletos (3d para os metais de transição e 4f para os terras raras).
- d) Materiais Antiferromagnéticos: possuem magnetização atômica independente da aplicação de um campo magnético externo, porém o alinhamento favorecido entre os momentos magnéticos é o antiparalelo, resultando em uma magnetização nula a baixas temperaturas.
- e) Materiais Ferrimagnéticos: da mesma forma que nos materiais antiferromagnéticos, o alinhamento favorecido entre os momentos de dipolo atômicos é o antiparalelo. Porém, a magnitude dos momentos magnéticos em um sentido é diferente da magnitude no sentido contrário, resultando em uma magnetização permanente. Isso acontece quando há pelo menos 2 tipos de íons magnéticos na matriz ocupando sítios com coordenação distinta – como é o caso das ferritas que contém íons de Fe^{2+} e Fe^{3+} nos sítios octaédricos e tetraédricos.

Tanto os materiais ferromagnéticos, quanto os ferrimagnéticos, possuem domínios, que são pequenas regiões que se comportam como ímãs microscópicos independentes no material. Nesses materiais, um pequeno campo magnético externo

pode fazer com que os domínios se alinhem uns com os outros e o material seja magnetizado, como se encontra esquematizado na ilustração 6.

Figura 6 – Esquema do alinhamento dos domínios magnéticos



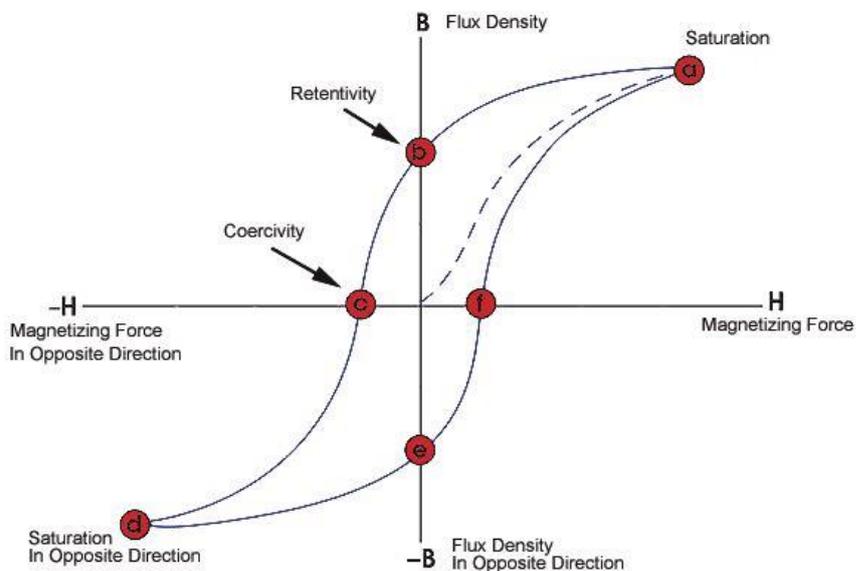
Fonte: Nave (2022).

Quando incidimos um campo nos materiais ferrimagnéticos, como as ferritas, os domínios se alinham com o campo aplicado. Ao invertermos o sentido desse campo, os domínios também invertem sua orientação, porém dissipando calor. Essas perdas de energia são as perdas por histerese e ocorrem proporcionalmente à área do ciclo de histerese.

Materiais ferrimagnéticos tendem a permanecer magnetizados quando o campo magnético externo é retirado. A fração da magnetização de saturação que é retida quando a força eletromotriz é removida se chama remanência do material, ou fluxo residual do núcleo (MYERS, 1997).

Para que o fluxo remanescente seja zerado, uma força magnetomotriz coercitiva deve ser aplicada no sentido oposto. Na figura 7, pode-se observar o laço de histerese, que é composto pelo campo remanescente (*b*), a força coercitiva (*c*) e a saturação (*a*).

Figura 7 – Laço de histerese

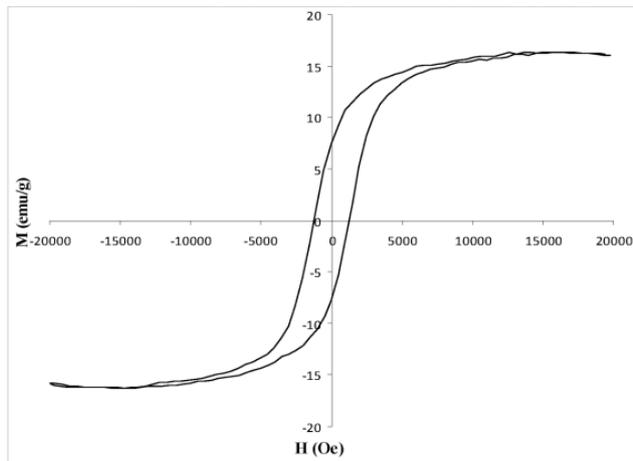


Fonte: Iowa State University (2021).

De acordo com Callister (2010), materiais que possuem elevada permeabilidade inicial e baixa coercibilidade são utilizados principalmente em núcleos de transformadores, em que é aplicada uma corrente alternada, e são denominados magneticamente moles. Já materiais usualmente utilizados, como ímãs permanentes, possuem elevada remanência e coercibilidade e são classificados como magneticamente duros.

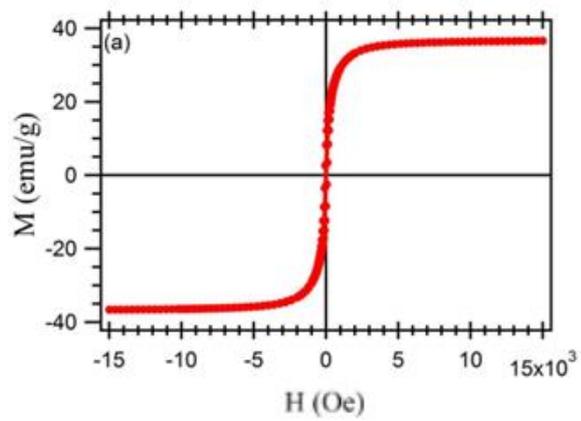
O loop de histerese dos óxidos ferrimagnéticos $MnFe_2O_4$ e $NiFe_2O_4$, ambos materiais magneticamente moles, podem ser vistos nas figuras 8 e 9, respectivamente, enquanto o loop de histerese do pó de ferro, pode ser visto na figura 10:

Figura 8 – Curvas de magnetização para $MnFe_2O_4$ em temperatura ambiente



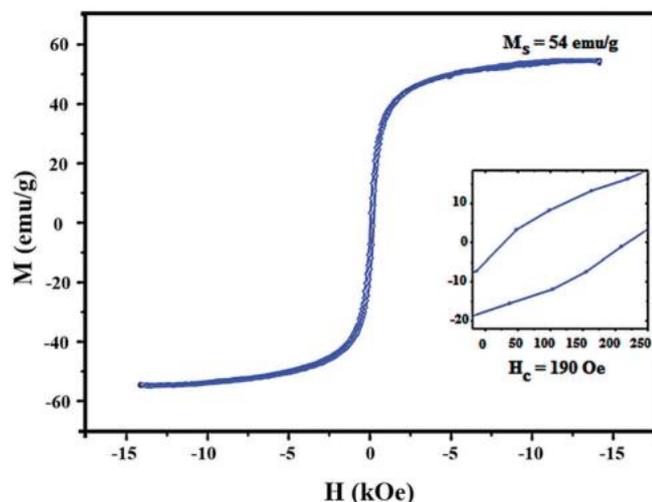
Fonte: Goswami et. al. (2013).

Figura 9 – Curvas de magnetização de nanopartículas de $NiFe_2O_4$



Fonte: Khan et. al. (2016).

Figura 10 – Curvas de magnetização para o pó de ferro



Fonte: Cruz-Vargas et. al. (2018).

Por conta dos elementos terras raras possuírem magnetismo não atrelado a domínios, mas sim à camada 4f incompleta, as perdas não acontecem da mesma forma que com os materiais ferrimagnéticos. Nesse material vítreo, os elétrons da camada 4f são blindados pelos elétrons das camadas mais externas - que participam de ligações químicas com os átomos de oxigênio da matriz. Isso faz com que a interação entre eles possa ser considerada desprezível, o que deveria facilitar a alternância de sentido do momento magnético e diminuir perdas energéticas.

Nanopartículas apresentam características semelhantes: o chamado superparamagnetismo, que ocorre quando as partículas possuem domínio único, o que permite que a magnetização total seja aproximada, como um momento magnético gigante. Esse, por sua vez, é resultado da soma dos momentos magnéticos individuais de cada átomo constituinte.

No superparamagnetismo, as partículas magnéticas apresentam magnetização somente na presença de campo magnético externo, e a troca de sentido dos domínios não existe. Ao invés disso, observa-se um tempo de relaxação, que é o tempo médio para reverter o momento magnético de um estado de equilíbrio para outro.

Neste trabalho, foram comparadas as curvas de histerese, medidas por VSM, de duas matrizes vítreas dopadas com terras raras, com as de óxidos ferrimagnéticos e pó de ferro prensado, para uma seleção dos núcleos que seriam utilizados e uma previsão do comportamento dos transformadores, antes dos ensaios finais.

3.3 TRANSFORMADORES DE ALTA FREQUÊNCIA

Transformadores de alta frequência (10 kHz – 1 MHz) revolucionaram a eletrônica por serem compactos e eficientes, sendo usados como transformadores de pulso e de potência. Hoje, suas aplicações são muito amplas e compreendem, principalmente, fontes chaveadas e conversores de corrente contínua para transferir energia elétrica de uma fonte de energia para uma carga.

Em faixas de frequência de 7kHz a 15 kHz, transformadores são utilizados em equipamentos inversores fotovoltaicos. Entre 15 kHz e 50 kHz, em fontes chaveadas de alta frequência para televisores, computadores e aparelhos de raios X. De 125 kHz e 1 MHz em amplificadores classe D (amplificadores digitais) para aparelhos de áudio (MUHAMMED 2000; ABDELRAHMAN et al. 2015; GERARDO; RAYMUNDO; MIGUEL, 2015).

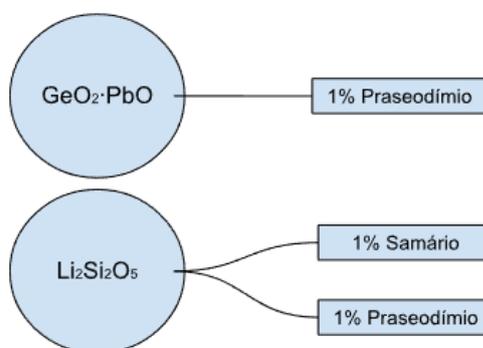
Na maioria das aplicações, os núcleos são confeccionados de materiais magneticamente moles, como: metais amorfos, cerâmicas, metais laminados, ferro carbonílico e pó de ferro.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 SÍNTESE DOS VIDROS DOPADOS COM TERRAS RARAS

Primeiramente, foram produzidas amostras de vidros $GeO_2 \cdot PbO$ e $Li_2Si_2O_5$, com as seguintes proporções de dopantes:

Figura 11 – Matrizes e dopantes a serem utilizados para a produção dos vidros



Fonte: Figura elaborada pela autora.

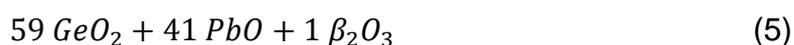
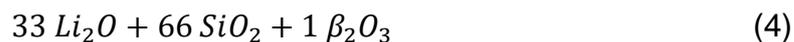
Segundo Pascha (2015, p. 1), “o termo ‘vidro’ é comumente usado para significar o produto de fusão de materiais inorgânicos que foram resfriados a uma condição rígida sem cristalizar”.⁴

Tendo isso em vista, a fabricação das amostras vítreas foi realizada no Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados da UFRGS (LAPMA) seguindo a ordem: (1) pesagem e homogeneização, (2) fusão e (3) resfriamento rápido. Primeiramente, foram utilizados SiO_2 , Li_2CO_3 , Sm_2O_3 e Pr_6O_{11} da marca Sigma Aldrich Chemical Company, como materiais de partida para a síntese do dissilicato de lítio dopado. Inicialmente, os pós foram colocados em um forno industrial elétrico para remover a umidade dos reagentes, visto que são higroscópicos e essas impurezas

⁴ “The term glass is commonly used to mean the fusion product of inorganic materials which have been cooled to a rigid condition without crystallizing.” (tradução nossa).

causam problemas na composição do vidro, como, por exemplo, estequiometrias mal definidas e a formação de bolhas.

Em seguida, os reagentes foram pesados em uma balança eletrônica JS-110 da marca Chyo (figura 12) de acordo com as estequiometrias abaixo (equações 4 e 5).



Em que β são os íons: *Sm* e *Pr*.

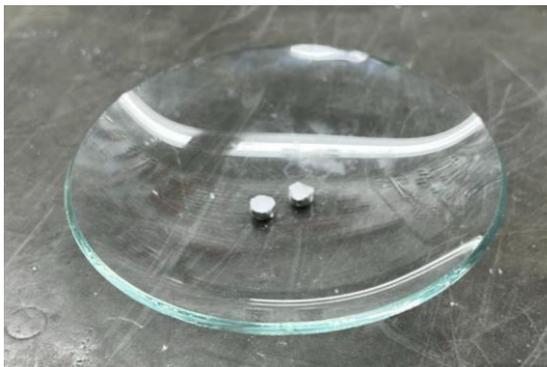
Figura 12 – Balança eletrônica JS-110



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

As quantidades necessárias foram colocadas em um recipiente plástico, homogeneizadas com movimentos rotacionais e postas em um pequeno cadinho de platina (figura 13).

Figura 13 – Mistura pronta em cadinho de platina



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

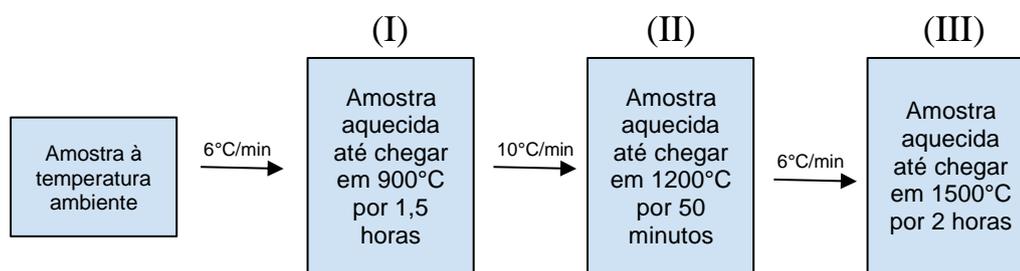
Para a fabricação do dissilicato de lítio, os cadinhos foram postos em um forno de modelo BLF18/3/321P1 da Carbolite (figura 14) de acordo com a figura 15, utilizando a rampa de aquecimento abaixo (figura 16):

Figura 14 – Forno utilizado para a fusão do vidro



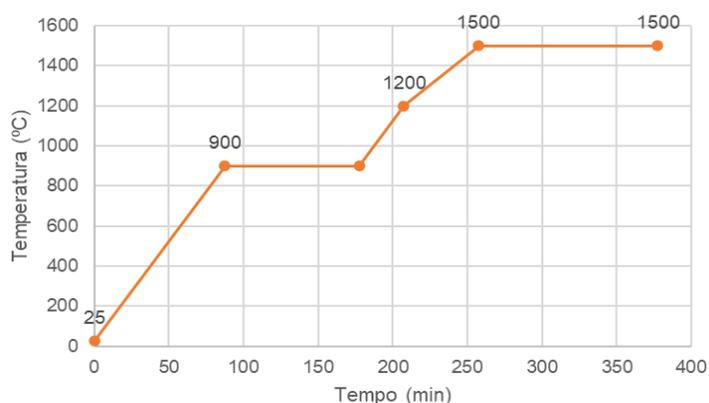
Fonte: Fotografia tirada pela autora.

Figura 15 – Aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$



Fonte: Figura elaborada pela autora.

Figura 16 – Rampa de aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$

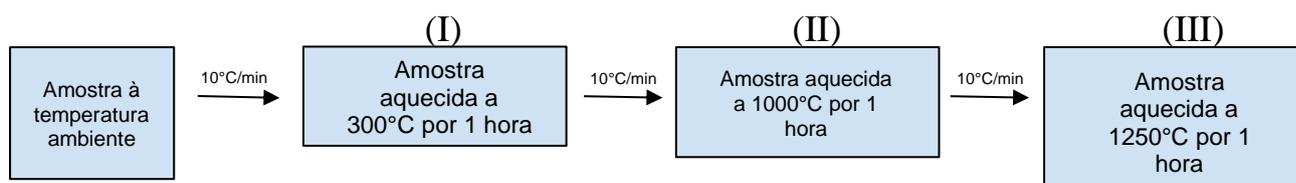


Fonte: Figura elaborada pela autora.

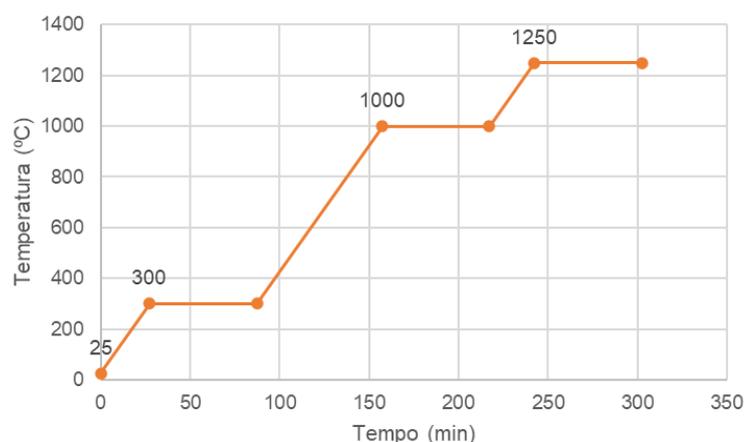
As etapas I e II do aquecimento produzem degraus de temperatura que deixam o vidro homogêneo, e a etapa III permite que a fusão ocorra. Após, o material foi retirado do forno e foi mantido dentro da forma de platina para resfriamento.

Para o germanato de chumbo, foi utilizada uma amostra já existente em laboratório, fundida de acordo com a figura 17, e a rampa de temperatura da figura 18 abaixo:

Figura 17 – Aquecimento da amostra de $GeO_2 \cdot PbO$



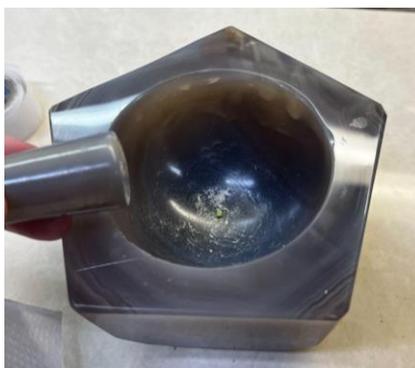
Fonte: Figura elaborada pela autora.

Figura 18 – Rampa de aquecimento das amostras de $GeO_2 \cdot PbO$ 

Fonte: Figura elaborada pela autora.

As etapas I e II do aquecimento produzem degraus de temperatura que deixam o vidro homogêneo, e a etapa III permite que a fusão ocorra.

Todas as amostras foram retiradas do cadinho e moídas com um almofariz de ágata (figura 19) para serem realizadas medidas de histerese no Laboratório de Magnetismo da UFRGS (LAM).

Figura 19 – Moagem do vidro

Fonte: Fotografia tirada pela autora.

4.2 MEDIDAS DE MAGNETIZAÇÃO

A fim de determinar a magnetização de um material e avaliar sua suscetibilidade à inversão de orientação magnética, são conduzidos testes nos quais um campo externo é aplicado e a indução magnética é medida. Com base nos

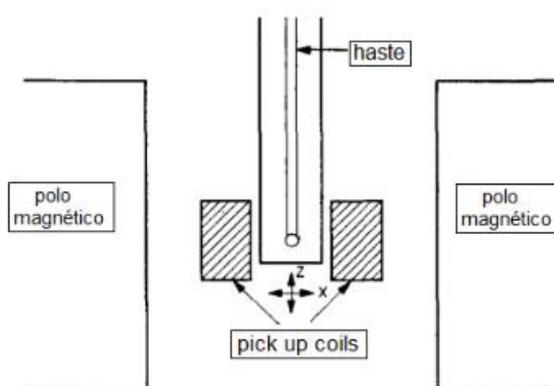
resultados obtidos, é traçada uma curva de histerese, a qual fornece informações relevantes, como a magnetização máxima do material (ou ponto de saturação), a intensidade do campo necessário para magnetizá-lo ou reverter sua polaridade (força coercitiva ou coercibilidade) e a magnetização remanescente (ou remanência), ou seja, a magnetização residual que permanece no material após a retirada do campo.

Para encontrar a amostra vítrea com menor perda por histerese, buscou-se uma curva com alta permeabilidade magnética, alto ponto de saturação e com a área da curva mais estreita possível.

Assim, foram traçadas as curvas de magnetização das amostras com um magnetômetro de amostra vibrante (VSM) de modelo EZ9 da MicroSense, localizado no Laboratório de Magnetismo da UFRGS (LAM).

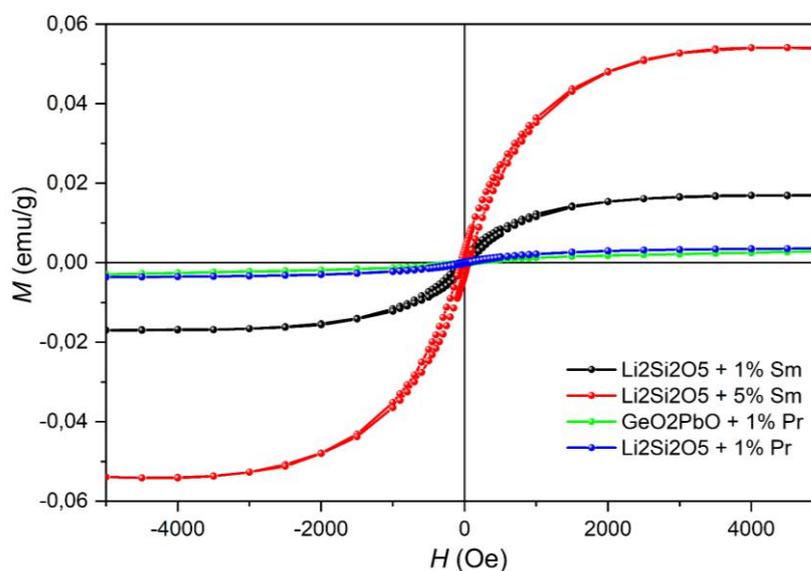
Segundo Dorneles (1997), o VSM é formado por bobinas sensoras, dispostas em série e em oposição próximas da amostra. A amostra fica presa em uma haste não-magnética vibrante, onde é aplicado um campo magnético, que gera um fluxo variável nas bobinas sensoras e, portanto, uma força eletromotriz (fem). O diagrama típico de um VSM pode ser encontrado na figura 20.

Figura 20 – Esquema de um magnetômetro de amostra vibrante (VSM)



Fonte: Finger (2018).

A partir das medidas com campo máximo aplicado garantiu-se a saturação completa das amostras e foram geradas curvas de histerese que podem ser encontradas na figura 21.

Figura 21 – Curvas de histerese das amostras vítreas

Fonte: Figura elaborada pela autora.

Quadro 1 – Pontos de interesse da curva de histerese das amostras vítreas

Material	Saturação (emu/g)	Área do Loop (10^{-3} Oe·emu)	Remanência (10^{-3} emu/g)	Campo Coercivo (Oe)
Li ₂ Si ₂ O ₅ +5% Sm	0,0543	463	8,513	42
Li ₂ Si ₂ O ₅ +1% Sm	0,0172	246	3,162	51
Li ₂ Si ₂ O ₅ +1% Pr	0,0020	76	1,465	63
GeO ₂ PbO+1% Pr	0,0019	23	0,923	58

Fonte: Quadro elaborado pela autora.

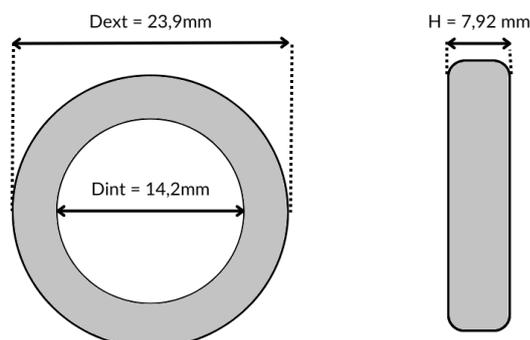
Após analisar a saturação e a área do *loop*, optou-se por utilizar o dissilicato de lítio com 5% de samário para a produção do protótipo. Essa foi a combinação que forneceu os maiores valores de saturação, remanência e a menor força coerciva.

4.3 FABRICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE ALTA FREQUÊNCIA

Foi confeccionado um protótipo de transformador vítreo com as dimensões do núcleo de pó de ferro MMT002T2408 da empresa Magmattec, utilizado em aplicações de alta frequência. Ambos com $N_p = 5$ e $N_s = 10$. Dessa forma, tem-se uma comparação entre os núcleos atuais e o de vidro dopado com terras raras.

O modelo MMT002T2408 foi escolhido por possuir dimensões viáveis com a capacidade de produção dos vidros no LAPMA e por ser um design amplamente utilizado hoje em amplificadores classe D e indutores para chaveamento em alta frequência. As dimensões do núcleo toroidal podem ser encontradas na figura 22:

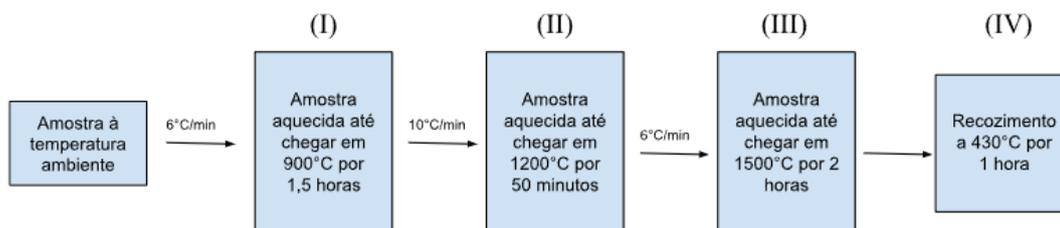
Figura 22 – Dimensões do núcleo MMT002T2408 da Magmattec



Fonte: Figura elaborada pela autora.

Para a fabricação do toróide de vidro, foi utilizada a rota abaixo (figura 23), em que o vidro fundido foi vertido em um molde de latão com perfil toroidal, confeccionado no Setor de Mecânica do Instituto de Física da UFRGS. Após vertido, foi realizado um tratamento térmico (*annealing*) a 430°C por 1 hora, em um forno Lavoisier (figura 24):

Figura 23 – Aquecimento das amostras de $Li_2Si_2O_5$ com *annealing*



Fonte: Figura elaborada pela autora.

Figura 24 – Forno Lavoisier do LAPMA



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

O processo de *annealing* foi feito para diminuir as tensões mecânicas do vidro e, dessa forma, aumentar sua resistência durante a manipulação (GARDON e NARAYANASWAMY, 1970). Vidros produzidos por resfriamento rápido normalmente são vertidos em superfícies planas, formando chapas. A confecção de vidros toroidais em um molde customizado foi um dos desafios práticos desse trabalho.

Depois de resfriado, o excesso do vidro vertido foi usinado e lixado (figura 26) para atingir a altura planejada. Na sequência, foram enroladas 5 voltas no primário e 10 voltas no secundário (figura 27), proporcionando uma redução de tensão elétrica ideal de 50%.

Figura 25 – Vidro depois de vertido e desmoldado, com excesso



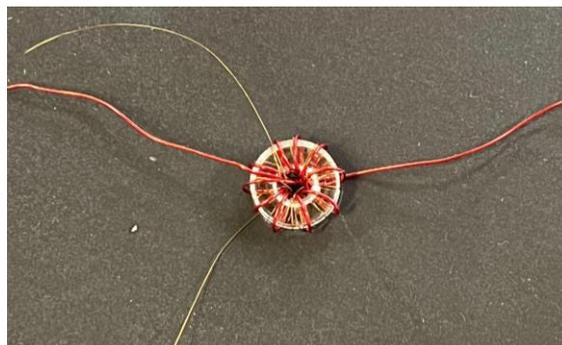
Fonte: Fotografia tirada pela autora.

Figura 26 – Processo de usinagem do toróide



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

Figura 27 – Protótipo do transformador concluído



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

4.4 ENSAIOS GERAIS

De acordo com Carreno e Chhajer (2020), o teste TTR é um dos mais utilizados para avaliar a condição dos enrolamentos e do núcleo do transformador e é realizado

para determinar quaisquer problemas de projeto ou montagem. Esse teste é realizado aplicando uma corrente alternada no enrolamento primário do transformador, enquanto a tensão induzida no enrolamento secundário é medida, conforme esquematizado abaixo (figura 28):

Figura 28 – Esquema do ensaio TTR



Fonte: Figura elaborada pela autora.

Inicialmente, verificou-se que as medidas de tensão apresentavam valores abaixo do esperado, o que levantou suspeitas de que uma parcela significativa dessas leituras pudesse ser decorrente de indução pelos condutores. Diante desse cenário, optou-se por fabricar um núcleo de material diamagnético, tendo sido escolhido o polímero plástico PVC.

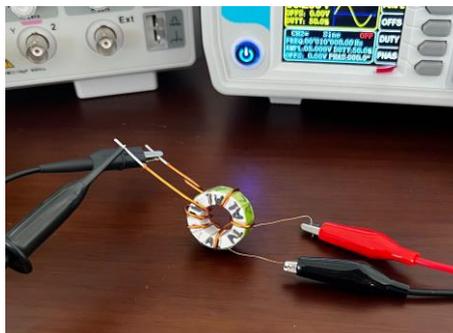
Figura 29 – Transformador com núcleo diamagnético



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

A fim de aumentar a confiabilidade do ensaio, foram realizadas diversas medidas de tensão de saída V_{CA} com diferentes frequências (f) e tensões de entrada (V_{in}). Para isso, foi utilizado um gerador de ondas da marca Cleqee, servindo como fonte de sinal e um osciloscópio SDS 1202X-E da marca Siglent para medir a tensão de saída.

Figura 30 – Ensaio TTR



Fonte: Fotografia tirada pela autora.

Os resultados podem ser encontrados no quadro 2.

Quadro 2 – Resultados do ensaio TTR

V_{in}	f	V_{CA} Núcleo MT002T2408	V_{CA} Núcleo Vítreo	V_{CA} Núcleo Plástico
2,5V	60Hz	8mV	460 μ V	160 μ V
	50kHz	1.37V	1,36mV	540 μ V
	200kHz	1.38V	3,52mV	1mV
	20MHz	1.37V	206mV	120,8mV
	40MHz	570mV	246mV	168mV
5V	60Hz	16mV	320 μ V	304 μ V
	50kHz	2.68V	4mV	600 μ V
	200kHz	2.72V	10.8mV	3.4mV
	20MHz	1.54V	420mV	184mV
	40MHz	992mV	500mV	220mV

Fonte: Quadro elaborado pela autora.

Transformadores que operam nessas frequências podem ser usados para: transmissão energética (60Hz), fontes chaveadas de alta frequência (15kHz a 50kHz), amplificadores classe D para equipamentos de telecomunicações (125kHz a 1MHz).

Os resultados de V_{CA} medidos para o núcleo vítreo foram, sempre, maiores que os medidos para o núcleo diamagnético, indicando que houve atuação magnética dos íons terras-raras. Entretanto, os valores obtidos são significativamente menores que os medidos para o núcleo metálico, para todo o intervalo de frequência utilizado.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no capítulo 3, foi possível obter algumas conclusões importantes:

- a) Os vidros dopados com terras raras influenciaram de forma significativa no funcionamento do transformador, como era esperado.
- b) Os valores de tensão de saída registrados no transformador vítreo foram muito pequenos, embora maiores que os valores obtidos no transformador polimérico não dopado. Esse resultado sugere que houve uma indução magnética através dos íons de terras raras, no entanto, a intensidade desse efeito não foi suficiente para viabilizar o uso do transformador como planejado.
- c) A partir de altas frequências (acima de 20MHz), o transformador MMT002T2408 saiu de sua faixa de trabalho.
- d) O incremento da tensão observado no transformador plástico e no vítreo é diretamente proporcional ao aumento da frequência de operação, em virtude da maior facilidade de indução pelo ar com o aumento da frequência (Lei de Faraday).

Com a finalidade de otimizar o desempenho do transformador vítreo, é provável que seja necessário empregar concentrações mais elevadas de terras raras, os quais, devido ao seu alto custo, podem eventualmente tornar inviável a produção em larga escala.

Como alternativa, sugere-se que para trabalhos futuros sejam estudados núcleos vítreos metálicos, como o Fe-B-Si, ou a utilização de átomos de metais de transição (Ni, Fe, Mn) em grandes concentrações, como dopantes nas matrizes vítreas, para que se mantenha a baixa histerese e baixa condutividade, aumentando a saturação máxima.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, A. A. A. et al. **Design of High Frequency Transformer for Switch Mode Power Supply**. *In*: International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE), 2015, Khartoum, Sudan. Khartoum: IEEE. p. 129 – 135. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7381443>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- BASQUIROTO, G. F. **Estudo, projeto e verificação experimental de um transformador monofásico com núcleo de metal amorfo**. UDESC, 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019. Disponível em: <https://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/00007e/00007e05.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- BASTOS, J. P. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1996.
- BERNARDES, J. **Valiosas e versáteis: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil**. *In*: JORNAL da USP. São Paulo, 19 nov. 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/valiosas-e-versateis-pesquisas-com-terras-raras-mostram-caminho-para-criar-cadeia-produtiva-no-brasil/#:~:text=%E2%80%9CNo%20Brasil%2C%20as%20terras%20raras,tamb%C3%A9m%20em%20Pitinga%2C%20no%20Amazonas>. Acesso em: 25 ago. 2022.
- BERNARDINO, F. de C. **Estudos de íons de terras raras em matrizes vítreas para aplicações em termometria óptica**. UTFPR, 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3761/1/LD_PPGCEM_M_Bernardino%2C%20Filippe%20de%20Carvalho_2018.pdf. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BISPO, R. P. **Importância dos ensaios elétricos nos transformadores de potência**. UFT, 2019. 98 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Tocantins. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1468/1/Rom%C3%A1rio%20Pereira%20Bispo%20-%20TCC%20Monografia%20-%20Engenharia%20EI%C3%A9trica.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- CARRENO, D.; CHHAJER, D. **Transformer winding resistance measurement: field challenges**. *In*: NETA POWERTEST CONFERENCE, 2020, Chicago. Chicago: NETA. p. 1 – 27. Disponível em: <https://megger.com/support/technical->

library/academic-papers/transformer-winding-resistance-measurement-field-c.
Acesso em: 05 fev. 2023.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill Science, 2011. Disponível em: <http://powerunit-ju.com/wp-content/uploads/2016/11/Book-Fundamentals-of-Electric-Machinery-by-Chapman-4ed.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.

CRUZ-VARGAS, J. et al. **Accelerated One-pot Synthesis of Coated Magnetic Nanoparticles from Iron (II) as Single Precursor**. *New Journal of Chemistry*, v. 42, n. 7, p. 13107-13113, jul. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326167277_Accelerated_one-pot_synthesis_of_coated_magnetic_nanoparticles_from_iron_II_as_single_precursor. Acesso em: 01 fev. 2023.

CUESTO, M.; OLIVA, M.; POLLARI, K. **Driving down energy losses in transformers**. *ABB Transformers*. [S.l.], Greener, p. 37-45, 2018. Disponível em: https://www.abdib.org.br/wp-content/uploads/2021/05/Report-Transformers_English_Greener-solution.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

DORNELES, L. S. **Interações Magnéticas e Magnetoresistência em CO10CU90**. UFRGS, 1997. 84 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/1392>. Acesso em: 09 fev. 2023.

FERROMAGNETISM. *In*: HYPERPHYSICS. [S. l., 2022]. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html>. Acesso em: 03 set. 2022.

FINGER, N. **Utilização da detecção simultânea de duas componentes da magnetização em sistemas magnéticos**. UFRGS, 2018. 14 f. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/181042>. Acesso em: 02 abr. 2023.

GARDON, R.; NARAYANASWAMY, O. S. **Stress and Volume Relaxation in Annealing Flat Glass**. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 53, n. 7, p. 380 – 385, jul. 1970. Disponível em: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1151-2916.1970.tb12137.x>. Acesso em: 13 fev. 2023.

GERARDO, V.; RAYMUNDO, M. P.; MIGUEL, S. J. **High Efficiency Single-Phase Transformer-less Inverter for Photovoltaic Applications**. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, v. 27, n. 2, p. 173- 184, mar. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276075022_High_Efficiency_Single-Phase_Transformer-less_Inverter_for_Photovoltaic_Applications. Acesso em: 25 fev. 2023.

GOSWAMI, P. P. et al. **Sonochemical Synthesis and Characterization of Manganese Ferrite Nanoparticles**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.

52, n. 50, p. 17848 – 17855, out. 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie401919x>. Acesso em: 09 set. 2022.

KELLET, P. et al. **United to reduce global transformer losses**. Transformers Magazine, v. 7, n. 4, p. 59 – 65, 2020. Disponível em: <https://transformers-magazine.com/files/59-65-United-to-reduce-global-transformer-losses-Hitachi-ABB.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2022.

KHAN, A. A. et al. **Influence of preparation method on structural, optical and magnetic properties of nickel ferrite nanoparticles**. Materials Science, Poland, v. 35, n. 1, p. 58 – 65, 04 2016. Disponível em: <https://sciendo.com/pdf/10.1515/msp-2017-0006>. Acesso em: 09 set. 2022.

KULKARNI, S.; KHAPARDE, S. **Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics**. 2. ed. Abingdon: Taylor & Francis Group, 2013.

LAPOLLI, A. L. **Estudo de interações hiperfinas em comportos intermetálicos Gd(Ni,Pd,Ci)In, Tb(Ni,Pd)In, Dy(Ni,Pd)In e Ho(Ni,Pd)In**. USP, 2006. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20877916>. Acesso em: 07 set. 2022.

LIN, K. C.; ZOOK, E. E. **A Desirable Material for Transformer Cores**. Journal of Materials Engineering, v. 11, n. 1, p. 117 – 121, jan. 1989.

LINHARES, D. M. S.; LANDGRAF, F. J. G.; JANASI, S. R.; GAMA A. M.; TEIXEIRA, J. C. **Medida de perdas magnéticas em ferritas de manganês zinco**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 26., 2004, Porto Alegre. Porto Alegre: CEBECIMAT. p. 1- 16.

MCLYMAN, C. W. T. **Magnetic Material and Their Characteristics**. In: MCLYMAN, C. W. T. Transformer and Inductor Design Handbook. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. P. 1 – 53. Disponível em: https://coefs.charlotte.edu/mnoras/files/2013/03/Transformer-and-Inductor-Design-Handbook_Chapter_2.pdf. Acesso em: 15 fev 2023.

MEURER, E. J. **Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas**. UFSC, 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103072/221434.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 set. 2022.

MILANOVA, M.; TSVETKOV, M. **Rare Earth Doped Materials**. Crystals, v. 11, n. 231, fev. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/3/231/pdf>. Acesso em: 27 ago. 2022.

MUHAMMED, A. H. **High Frequency Transformer, Design and Modelling using Finite Element Technique**. UON, 2000. 210 f. Thesis (Doctorate degree of Philosophy) – Faculty of Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle upon Tyne, 2000. Disponível em: <https://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/747>. Acesso em: 25 fev. 2023.

MYERS, H. P. **Introductory Solid State Physics**. 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 1997. Disponível em: <https://xn--webducaton-dbb.com/wp-content/uploads/2018/12/H.P.-Myers-Introductory-Solid-State-Physics-Second-Edition-CRC-Press-1997.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2022.

NÚCLEOS de Pó de Ferro. *In*: MAGMATTEC Tecnologia em materiais magnéticos. Cachoeirinha, out. 2010. Disponível em: https://www.magmattec.com.br/wp-content/uploads/2020/10/MATERIAL-002_02.pdf. Acesso em: 05/01/2023.

PASHA, A. **Spectroscopy of Lead-Bismuth-Borate Glasses doped with Neodymium**. NC, 2015. 109 f. Dissertação (Master of Science in Physics) — Department of Post Graduate and Research studies in Physics, The National Degree College, Jayanagar, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302957545_Spectroscopy_of_rare_earth_doped_glasses. Acesso em: 27 ago. 2022.

SALES, F. H. S. **Fases Magnéticas de Sistemas Nanoestruturados de Terras-Raras**. UFRN, 2011. 133 f. Tese (Doutorado em Física) — Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/16574/1/FabioHSS_TESE.pdf. Acesso em: 25 ago. 2022.

SIRDESHMUKH, D.; SIRDESHMUKH, L.; SUBHADRA, K. **Atomistic Proprieties of Solids**. 1. ed. Berlin: Springer, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-19971-4>. Acesso em: 20 jun. 2022.

THE Hysteresis Loop. *In*: IOWA State University. Ames, 2022. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/HysteresisLoop.xhtml>. Acesso em: 15 nov. 2022.