

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

**MONTAGEM DE SISTEMA DE MEDIDAS MAGNÉTICAS
ALTERNATIVO BASEADO EM DETECÇÃO A LASER PARA O
AGFM (Alternating Gradient Field Magnetometer)**

por

ÍTALO MARTINS OYARZABAL

Porto Alegre – RS

Dezembro de 2014

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

**MONTAGEM DE SISTEMA DE MEDIDAS MAGNÉTICAS
ALTERNATIVO BASEADO EM DETECÇÃO A LASER PARA O
AGFM (Alternating Gradient Field Magnetometer)**

por

Ítalo Martins Oyarzabal

Orientador: Prof. Dr. João Edgar Schmidt

Monografia apresentada à
Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Bacharel em
Engenharia Física, área de
concentração em Engenharia
Física.

Porto Alegre – RS

Dezembro de 2014

Agradecimentos

Ao meu orientador, João Schmidt, pela oportunidade de tentar desenvolver um projeto inovador, e pela grande ajuda no momento que mais precisei.

À minha namorada, Taís Orestes, por literalmente dividir essa experiência comigo.

À minha mãe, Simone Oyarzabal, pelo apoio e por sempre acreditar em mim.

Ao mestrando Anselmo Mariani e ao doutorando Vinícius Cappellano pela paciência, ajuda e orientação ao longo do projeto.

À todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu bem-estar psicológico ao longo desse período.

Índice

1)Resumo.....	1
2)Abstract.....	2
3)Introdução.....	3
4)Objetivos.....	6
4.1)Objetivos de Instrumentação.....	6
4.2) Objetivos de Medição.....	7
4.3)Objetivos de Aprendizado.....	8
5)Revisão Bibliográfica.....	9
5.1)Magnetismo.....	9
5.2)Piezoeletricidade.....	17
5.3)AGFM.....	18
6)Metodologia.....	20
6.1) Sistema de medição por piezoelétrico.....	20
6.2)Amostra.....	21
6.3)Sistema de medição a laser.....	22
6.3.1)PSD.....	22
6.3.2)Laser.....	25
6.3.3)Espelho.....	28
6.3.4)Cabos.....	29
6.3.5)Alinhamento.....	30
6.3.6)Medição por variação de intensidade.....	32
7)Resultados e Discussão.....	35
7.1)Instrumentação.....	35
7.2)Curvas de magnetização e condições experimentais.....	37
7.3)Aprendizado.....	42
8)Conclusões.....	43
9)Sugestões para Trabalhos Futuros.....	45
10)Referências Bibliográficas.....	47

Lista das Figuras

<i>Figura 1: Esquemático do sistema de medidas magnéticas com o AGFM^[3].....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2: Características de materiais paramagnéticos: (a)Comportamento dos momentos magnéticos na ausência de campo externo;(b)Variação de M com H(a inclinação da curva é a susceptibilidade);(c)Variação do inverso da susceptibilidade com a temperatura.^[4].....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3: Variação da magnetização espontânea em materiais ferromagnéticos com a temperatura.^[4].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4: Ilustração de ordenamentos anti- e ferrimagnéticos simples.^[4].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5: Ilustração de uma parede de domínio de 180°.^[4].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6: Variação da magnetização de material ferro ou ferrimagnético com o campo aplicado: (a)amostra inicialmente desmagnetizada; (b) curva de histerese.^[4].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7: Ciclos de histerese de materiais magnéticos: (a) Materiais duros, ou ímãs permanentes;(b) Materiais moles, ou permeáveis; (c) Materiais intermediários para gravação magnética.^[4].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8: Piezoelectricidade: à esquerda, um esforço mecânico gera polarização elétrica nas faces do piezoelétrico. À direita, uma tensão elétrica aplicada ao piezoelétrico gera deformação mecânica.^[5].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9: Modos de Operação do piezoelétrico^[10].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10: Amplificador Lock-In.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11: Amostra utilizada no projeto.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12: Protoboard com PSD.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13: Montagem final do detector.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14a: Laser testado e posteriormente reprovado.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 14b: Laser mais utilizado ao longo do projeto.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15: Laser em cima dos trasladores x,y,z.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16: Pointer laser utilizado.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17: Espelho utilizado no projeto.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18: Cabos utilizados no projeto.....</i>	<i>29</i>

<i>Figura 19: Esquemático do caminho percorrido pelo laser. O tamanho do PSD foi exagerado para evidenciar que a amplitude da superfície do PSD atingida é muito pequena comparada ao tamanho do sensor.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 20: Intensidade x tensão do PSD^[14].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 21: PSD com a fenda.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 22: A parte cinza corresponde ao PSD. (a) Feixe de laser com intensidade variável radialmente. (b) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra parada. (c) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra num extremo da oscilação. (d) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra no outro extremo da oscilação. As faixas demonstradas correspondem à posição onde a fenda está localizada, bloqueando todo o resto do feixe.....</i>	<i>33/34</i>
<i>Figura 23: Montagem final do detector.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 24: Montagem final do laser.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 25: Espelho utilizado no projeto.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 26: Intensidade x tensão do PSD^[14].....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 27: Curva de magnetização primária com sistema a laser.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 28: Curva de magnetização ajustada com o sistema a laser.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 29: Curva de magnetização com sistema por piezoelétrico.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 30: Comparação das curvas de magnetização.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 31: Curvas de histerese normalizadas de ambos os sistemas.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 32: Comparação do campo coercitivo pelas medidas.....</i>	<i>40</i>

1. Resumo:

O propósito do projeto é montar um sistema de medição alternativo para magnetização de amostras micro e nanométricas ao sistema já existente no Laboratório de Magnetismo da UFRGS. Para isso, foi substituído o cristal piezoelétrico como principal detector de medida por um sensor de posição, que recebeu o feixe de um laser refletido. Assim, desenvolveu-se uma instrumentação para tornar possível realizar as medidas desejadas, e curvas de magnetização foram obtidas com o sistema a laser e comparadas com as curvas do sistema por piezoelétrico afim de avaliar a viabilidade e o nível de sucesso do projeto.

Palavras-Chave: Magnetômetro, AGFM, Cristal Piezoelétrico, Laser, Detector Sensível à Posição (PSD).

2. Abstract:

The purpose of this project is to make an alternative measuring system for magnetization in micro and nanometric samples for the existing system used on UFRGS' Magnetism Lab. For that, the piezoelectric crystal was replaced as the main measuring detector by a Position Sensitive Detector (PSD), which received a reflected beam from a laser. Therefore, it was developed an instrumentation to make it possible to realize the desirable measures, and magnetization curves was obtained and compared with those of the piezoelectric system in order to estimate the viability and the success level of the project.

Key-Words: Magnetometer, AGFM, Piezoelectric crystal, Laser, Position Sensitive Detector (PSD).

3.Introdução:

O Laboratório de Magnetismo da UFRGS (LAM) existe desde 1976, quando foi criado pelo professor Flavio P. Livi, com o nome de *Grupo de Intermetálicos*. O intuito era estudar propriedades estruturais e magnéticas de compostos intermetálicos conhecidos como Fase de Laves. Assim, construiu-se um laboratório com equipamentos para produzir e processar suas próprias amostras, como *forno a arco*, sistemas de vácuo e um magnetômetro, além de diversos outros aparelhos e técnicas utilizadas no laboratório^[1]. O instrumento utilizado neste trabalho é o Magnetômetro de Gradiente de Campo Alternado(a), também conhecido como AGFM (*Alternating Gradient Field Magnetometer*).

O magnetômetro é usado para medição de magnetização e momentos magnéticos de amostras micro e nanométricas. No sistema de medição padrão, o AGFM funciona da seguinte forma: Uma amostra de material magnético, que contém magnetização \vec{M} , é acoplada a uma haste de vidro pirex e colocada entre duas bobinas eletrostáticas externas e mais duas bobinas internas. Enquanto as bobinas internas geram um campo magnético constante de forma a magnetizar a amostra, as bobinas externas geram um campo magnético variável, de forma a gerar uma região com um gradiente de campo magnético (∇H), que faz com que o material sinta uma força magnética, de acordo com a relação^[2]:

$$\vec{F}_M = \vec{M} \cdot \nabla \vec{H}$$

Além da criação da região de gradiente de campo magnético, as bobinas são enroladas conforme a configuração chamada de *par de Maxwell*, onde as bobinas são enroladas em sentidos contrários, maximizando o gradiente de campo entre elas.^[3] Elas também agem de forma a ficar constantemente invertendo o sentido do gradiente, de forma que a força magnética também seja variável, sendo que essa força variável sentida pela amostra gera oscilações na haste que contém a amostra. Essas oscilações são convertidas em sinal elétrico através de um cristal piezoelétrico colocado na outra extremidade da haste, e

então, são convertidas numa escala de magnetização, de forma a se obter uma curva de magnetização da amostra em função do campo aplicado.

O sistema de medição como um todo consiste em um conjunto de equipamentos. Além do magnetômetro, também utiliza-se um amplificador Lock-In, para monitoramento e ajuste do sinal elétrico gerado pelo sistema, um gerador de funções, utilizado esporadicamente para ajustar a frequência de ressonância do sistema (para essa função, também pode-se utilizar o gerador interno do lock-in), um multímetro digital, que mostra a amplitude do sinal obtido do piezoelétrico, e duas fontes de alimentação para as bobinas eletrostáticas (uma para as bobinas internas e outra para as bobinas externas). O sinal gerado pelo sistema, após passar pelo amplificador lock-in, é controlado por um computador, através de um programa desenvolvido em linguagem LabView para a utilização do magnetômetro. Este programa mostra, em tempo real, a construção da curva de magnetização conforme os dados vão sendo obtidos. A figura abaixo ilustra o sistema:

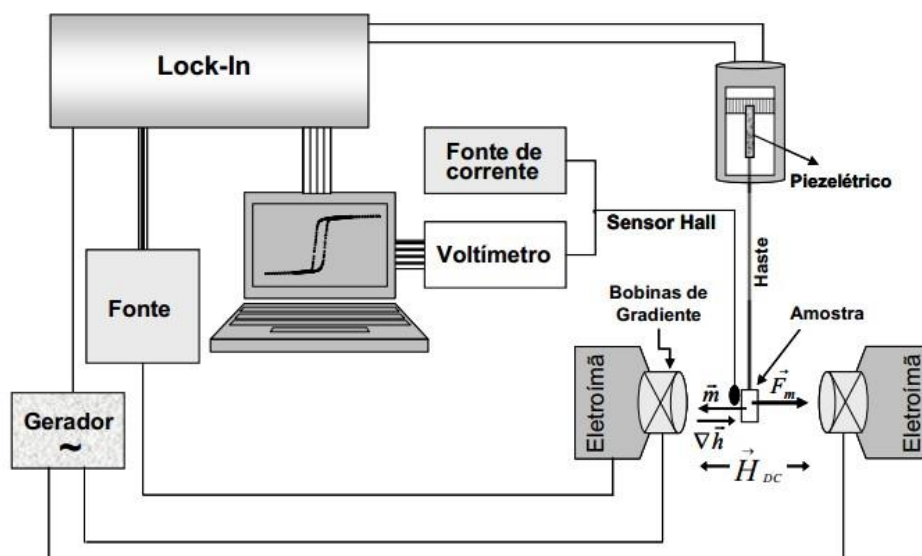


Figura 1: Esquemático do sistema de medidas magnéticas com o AGFM^[3]

O cristal piezoelétrico para detectar as vibrações da amostra é de boa confiabilidade e reprodutibilidade, já tendo sido objeto de estudos e publicações do Laboratório de Magnetismo^[1]. Entretanto, esse cristal é extremamente frágil, sendo necessário muito cuidado no seu manuseio, principalmente no momento

em que a amostra é substituída, visto que tanto amostra quanto cristal estão acoplados na mesma haste de vidro pirex, apesar da proteção extra para o piezoelétrico e os contatos elétricos de onde são obtidos os sinais de tensão. Dessa forma, surge a possibilidade de se tentar criar um sistema alternativo de medição, com capacidade semelhante ao sistema por piezoelétrico, porém que apresente maior facilidade de manuseio e praticidade.

Assim, a proposta principal para este trabalho é criar um sistema alternativo de medição para as curvas de magnetização das amostras submetidas ao AGFM. Nesse novo sistema proposto, é utilizado um LASER (*Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation*), onde um feixe incide em um espelho acoplado à haste que sustenta a amostra, e, com a oscilação da haste provocada pela amostra, o feixe é refletido com diferentes intensidades numa posição fixa delimitada por uma fenda no detector PSD, gerando diferentes sinais elétricos (similarmente ao modo de detecção com o cristal piezoelétrico), que seriam transmitidos ao software de análise.

4.Objetivos:

Os objetivos desse trabalho estão relacionados diretamente às várias etapas de desenvolvimento do projeto, desde a instrumentação necessária até a obtenção de curvas de magnetização. Ao tratar-se de um assunto tão delicado e exigente, como física experimental, deve-se tentar atingir objetivos passo a passo, de forma a se evoluir continuamente ao longo do desenvolvimento do projeto sem tentar sobrepor as etapas necessárias e acabar comprometendo os objetivos mais ousados. Assim, os objetivos desse trabalho estão divididos por etapas, cada uma delas sendo de fundamental importância para a evolução do projeto.

Ao se propor um sistema de medição alternativo baseado em detecção a laser, as preocupações iniciais devem ser relativas às condições experimentais, para que haja instrumentos em condições de ao menos realizar as medidas e tentar atingir os objetivos mais ambiciosos. Além disso, considerando que este projeto consiste no trabalho de diplomação do curso de Engenharia Física, há também objetivos de conhecimento, e crescimento do aluno tanto no âmbito profissional quanto no pessoal, utilizando as experiências adquiridas na realização do projeto como aprendizado para entender como realmente funciona o mundo da física experimental.

4.1)objetivos de instrumentação:

1. Montar um suporte para o sensor de posição que tenha um ajuste de altura de forma a poder posicioná-lo corretamente com a reflexão do feixe de laser.
2. Conseguir uma fonte de laser adequada, que possua um feixe colimado e com diâmetro e intensidade suficientes para, após as reflexões, chegar ao PSD com parâmetros suficientes para gerar a diferença de tensão que será o sinal a ser medido como forma de monitorar a oscilação da haste.
3. Conseguir um pedaço de espelho adequado. Esse ponto é realmente muito importante, uma vez que o espelho deve ter dimensões adequadas para englobar todo o feixe do laser incidente em todas as posições da oscilação, ou seja, se o espelho for muito pequeno, em determinado ponto da oscilação o laser não irá atingir o sensor.

Além disso, o espelho deve ser leve o suficiente para não interferir na frequência de ressonância da amostra, podendo gerar distúrbios na

oscilação, prejudicando o sinal gerado. O peso do espelho também influi em sua aderência à haste, uma vez que a cola utilizada é uma pasta de silicone, e, caso o espelho seja muito pesado, acabará não aderindo de forma estável na haste e irá “escorregar” ou até mesmo cair. O espelho também deve ter sua camada reflexiva na superfície, pois espelhos com múltiplas camadas reflexivas poderiam gerar múltiplas reflexões, causando interferência no sinal, prejudicando a qualidade do experimento.

4. Considerando a distância entre a posição necessária para a colocação do sensor de posição e do equipamento de análise (amplificador lock-in), deve-se conseguir um cabo que possua comprimento suficiente para evitar perdas de sinal, assim como int interferência por ruído, além de que suas conexões devem ser adequadas tanto ao amplificador lock-in (conexão tipo BNC) quanto ao suporte de posicionamento do PSD.

Ainda no quesito “condições experimentais”, há um último objetivo, relativo ao maior desafio apresentado ao longo do projeto: a geometria do experimento. Assim, surge como objetivo:

5. Conseguir um alinhamento correto do sistema feixe-espelho-PSD, com angulação suficiente para gerar varredura no sensor e não haver muita dispersão do feixe, dentro dos limites físicos impostos pelo posicionamento das bobinas e demais componentes do AGFM.

4.2) Objetivos de medidas: Como objetivos mais audaciosos, relativos ao sucesso na obtenção de curvas de magnetização com o sistema por laser.

1. Relação Sinal/Ruído: As medições devem obter a maior relação sinal ruído possível;
2. Repetitividade: Deve-se conseguir montar um sistema onde se possa fazer uma grande quantidade de medidas sem que se altere a estrutura do sistema. Esse fator pode se tornar uma vantagem em relação ao sistema anterior, visto que o cristal piezoelétrico pode ser afetado toda vez que a amostra for substituída;
3. Estabilidade de Medição: As medidas não devem apresentar grandes variações em seus parâmetros, principalmente em termos de posição (estabilidade mecânica);

4. Sensibilidade a diferentes magnetizações de amostra: O sistema deve ser capaz de medir magnetizações de amostra com a mesma sensibilidade do sistema anterior. Nesse ponto, inclui-se os diferentes tipos de magnetismo, tais como: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, entre outros.

4.3)Objetivos de Aprendizado: Temos também os objetivos em termos de aprendizado e evolução do aluno, tais como:

1. O aprendizado das técnicas utilizadas no Laboratório de Magnetismo.
2. O entendimento dos equipamentos utilizados no projeto, como o amplificador lock-in, o AGFM, o multímetro, entre outros.
3. E, dentro desses escopo, o principal objetivo é o amadurecimento do aluno como engenheiro físico após trabalhar com uma atividade de pesquisa e desenvolvimento de projeto na área de física experimental.

Dessa forma, faz-se uma avaliação dos objetivos propostos nesse projeto, percebendo-se que a gama de conhecimento e realizações necessárias é muito ampla e contém uma quantidade de aprendizado em termos práticos e teóricos que são de fundamental importância para a formação de um engenheiro físico.

5.Revisão Bibliográfica:

5.1)Magnetismo:

O termo magnetismo surgiu na Antiguidade, devido ao fato de que pedaços de ferro eram atraídos por um mineral chamado magnetita (Fe_3O_4), muito comum em uma antiga cidade na região onde se encontra a Turquia^[4]. Os primeiros experimentos com a magnetita datam de 800 a.C, e foram realizados pelos gregos, com o intuito de descobrir que propriedade misteriosa desencadeava esse efeito.

Porém, foi apenas no século XIX que os fenômenos magnéticos ganharam grande importância, visto que foi nessa época que foi descoberta sua relação com a eletricidade, por Oersted, que percebeu que um fio carregado eletricamente também produzia efeito magnético, alterando a orientação de uma agulha de bússola. Posteriormente, a lei que explica esse fenômeno foi formulada por Ampère, assim como Faraday na Inglaterra e Henry nos Estados Unidos descobriram que um campo magnético variável podia induzir corrente elétrica num circuito.^[4]

Assim, o magnetismo foi sendo cada vez mais conhecido e utilizado na indústria, chegando à importância que possui hoje, estando presente nas mais diversas áreas de conhecimento. Em aplicações mais tradicionais, como motores, geradores, transformadores, os materiais magnéticos são utilizados em 2 categorias: os ímãs permanentes, que criam um campo magnético constante, e os materiais moles, também conhecidos como doces ou permeáveis, que, no caso do uso como núcleo de transformadores, produzem um campo proporcional à corrente num fio enrolado, muito maior do que seria criado apenas pela corrente. ^[4]Essa grande evolução nas pesquisas e desenvolvimento no ramo do magnetismo no último século se deve, em grande parte, à compreensão das propriedades atômicas da matéria, com base na mecânica quântica desenvolvida nas décadas de 1920 e 1930.

O comportamento dos materiais submetidos a um campo magnético externo se dá pela origem e interação de seus dipolos magnéticos, que têm origem no momentum angular e no spin dos elétrons nos átomos que formam a matéria. Macroscopicamente, o estado magnético da matéria é determinado pelo

vetor magnetização \vec{M} , definido como o momento de dipolo magnético por unidade de volume:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i ,$$

Sendo que o volume V é escolhido de forma a ser grande o suficiente para haver uma boa média macroscópica, mas pequeno o suficiente em relação ao tamanho da amostra para que o vetor represente uma propriedade magnética local.^[4]

Já o campo magnético pode ser expresso por duas grandezas: pelo vetor indução magnética \vec{B} , ou pelo vetor intensidade do campo magnético \vec{H} . O vetor de intensidade do campo é relacionado com a corrente que cria o campo, enquanto o vetor de indução depende não apenas da corrente, mas também da magnetização do meio. No Sistema Internacional de Unidades (SI), esses vetores são relacionados pela seguinte fórmula:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) ,$$

Onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ é a permeabilidade magnética do vácuo. Já no sistema CGS, a relação é dada por:

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} .$$

Para o sistema CGS, no vácuo, $\vec{B} = \vec{H}$ e $\mu_0 = 1$.

A susceptibilidade magnética define a resposta de um material, caracterizada pelo comportamento de M , a um campo magnético externo \vec{H} , sendo definida por:

$$\chi = \frac{M}{H} .$$

Percebe-se que a susceptibilidade magnética é adimensional, e seu valor varia de 10^{-5} para materiais fracamente magnéticos até 10^6 para materiais fortemente magnéticos.

Na tabela a seguir, encontram-se as unidades das principais grandezas magnéticas, tanto no SI quanto no sistema CGS:

Grandeza	SI	CGS	Relação
ϕ (Fluxo Magnético)	Weber (Wb)	Maxwell	$1 \text{ Wb} = 10^8$ maxwells
B (Indução Magnética)	Tesla (T) = Wb/m ²	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
H (Campo Magnético)	A/m	oersted (Oe)	$1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3}$ Oe
M (Magnetização)	A/m	Emu/cm ³	$1 \text{ A/m} = 10^{-3}$ emu/cm ³
χ (Susceptibilidade Magnética)	Adimensional	Adimensional	

Tabela 1: Unidades das grandezas magnéticas no SI e no CGS^[4]

Vale ressaltar a importância de entender o sistema CGS e suas unidades, visto que o programa que foi utilizado no projeto apresenta a intensidade do campo magnético em oersted, de forma que se torna mais simples entender a relação entre os sistemas do que readaptar o programa para funcionar nas unidades do SI.

Os materiais são classificados em 5 tipos de magnetismo, de acordo com a origem microscópica de sua magnetização e das interações internas, sendo eles:^[4]

- Diamagnéticos
- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos
- Ferrimagnéticos
- Antiferromagnéticos

A seguir, uma breve explicação sobre cada um dos tipos de magnetismo.

Diamagnetismo

O diamagnetismo consiste no tipo mais fraco de interação magnética, estando presente em todos os materiais, porém sendo apenas perceptível em materiais que não apresentem dipolos magnéticos permanentes, e apresenta

uma susceptibilidade negativa da ordem de 10^{-5} . O diamagnetismo se caracteriza pela variação do momento orbital dos elétrons de acordo com o campo magnético externo aplicado, sendo que uma variação nesse campo externo gera uma corrente em oposição a esta variação, assim gerando um campo que se opõe ao campo aplicado.

Como os materiais diamagnéticos são caracterizados por não possuírem dipolos magnéticos permanentes, isso coloca os elementos com camadas eletrônicas completas nesse grupo. Exemplos disso são os gases nobres e sólidos que contêm ligações iônicas para completarem suas camadas, como os compostos NaCl, KBr, LiF e CaF₂.

Paramagnetismo:

O paramagnetismo ocorre em materiais com momentos magnéticos atômicos permanentes, porém esses momentos estão isolados entre si. Isso faz com que, na ausência de um campo magnético externo, o momento magnético total do material seja nulo, visto que a orientação dos domínios magnéticos isolados a uma temperatura finita é aleatória devido à agitação térmica. Já um campo magnético externo aplicado produz uma pequena orientação na direção do campo, de forma que os materiais paramagnéticos possuem susceptibilidade magnética positiva, na ordem de 10^{-5} a 10^{-3} .

Dentre os materiais paramagnéticos, encontram-se os metais de elementos não-magnéticos e os materiais isolantes que contêm átomos livres ou íons de elementos do grupo de transição do ferro, de terras raras e dos elementos actinídeos^[4]. A figura abaixo ilustra algumas características dos materiais paramagnéticos:

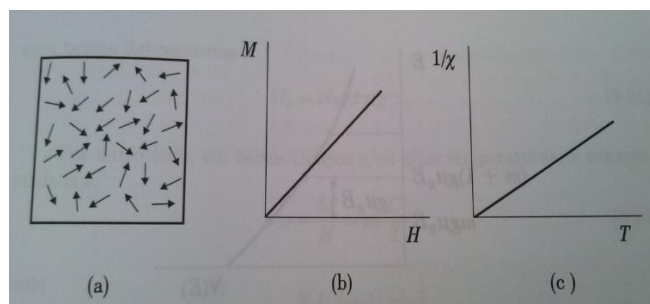


Figura 2:Características de materiais paramagnéticos:

(a)Comportamento dos momentos magnéticos na ausência de campo

externo;(b)Variação de M com H(a inclinação da curva é a susceptibilidade);(c)Variação do inverso da susceptibilidade com a temperatura.^[4]

Dentre essa propriedades, percebe-se que seus dipolos magnéticos atômicos podem mudar sua orientação livremente, independentemente da orientação dos dipolos vizinhos. Percebe-se também que, sob aplicação de um campo magnético externo crescente, a energia de interação dos dipolos com o campo aumenta (em módulo) em relação à energia térmica, aumentando assim a ordem no sistema. Essa relação de linearidade entre M e H ocorre em certas faixas de temperatura, pois, em outro caso, se o campo for mantido fixo e a temperatura aumentar, aumentará a desordem do sistema, diminuindo assim a susceptibilidade. Experimentos ao longo do século XX comprovaram que a susceptibilidade magnética varia com o inverso da temperatura.

Ferromagnetismo:

O ferromagnetismo é caracterizado em materiais com momentos magnéticos interagentes que apresentam uma alta magnetização, à temperatura ambiente, quando submetidos a um baixo campo magnético externo. Essa propriedade se apresenta em vários metais do grupo de transição do ferro, como ferro, níquel e cobalto, puros ou em ligas com outros elementos^[4]. O ferromagnetismo se apresenta de forma mais acentuada que os dois citados anteriormente, sendo predominante sobre eles.

No caso de materiais ferromagnéticos, os momentos magnéticos vizinhos interagem, se alinhando, provocando um magnetização não-nula mesmo em ausência de campo magnético externo aplicado. Essas regiões de alinhamento de momentos vizinhos são chamadas de domínios magnéticos. Assim, sob efeito de um campo externo, o que ocorre é o alinhamento dos domínios com o campo magnético.

Materiais ferromagnéticos também possuem relação com a temperatura. Pierre Curie percebeu que a magnetização desses materiais diminui com o aumento da temperatura, se tornando nula após uma determinada temperatura, devido à alta agitação térmica, sendo essa temperatura apropriadamente

nomeada de Temperatura de Curie (T_c). A relação da magnetização de materiais ferromagnéticos com a temperatura é mostrada na figura abaixo:

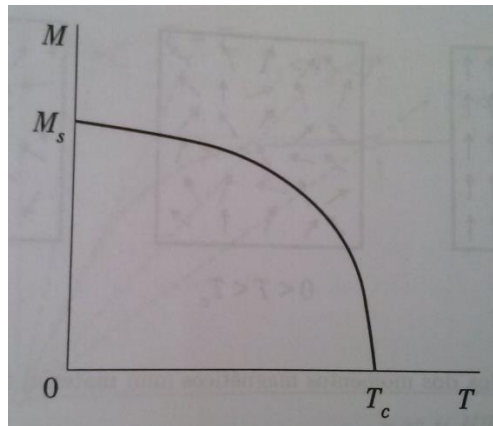


Figura 3: Variação da magnetização espontânea em materiais ferromagnéticos com a temperatura.^[4]

Neste projeto, não precisaremos nos preocupar com a Temperatura de Curie, visto que a temperatura de trabalho está ordens de grandeza abaixo da T_c para os materiais ferromagnéticos utilizados como amostras.

Ferrimagnetismo e Antiferromagnetismo:

Esses dois tipos diferentes de magnetismo, assim como o ferromagnetismo, se devem à interação de intercâmbio, que resulta da diferença entre as energias eletrostáticas de dois elétrons nas situações de spin paralelos e antiparalelos, de acordo com o Princípio de Exclusão de Pauli^[4]. No caso de ambos os tipos de magnetismo, o estado de menor energia de intercâmbio tem os spins antiparalelos, diferentemente do ferromagnetismo, onde o estado de menor energia consiste em ter os spins dos elétrons paralelos.

O que difere o ferrimagnetismo e o antiferromagnetismo é a diferença na intensidade de domínios vizinhos. Enquanto em materiais antiferromagnéticos os momentos antiparalelos são iguais e geram uma magnetização total nula, no ferrimagnetismo os momentos em sentidos opostos são diferentes, fazendo com que a magnetização resultante seja diferente de zero.

A figura abaixo ilustra esses dois tipos de magnetismo:

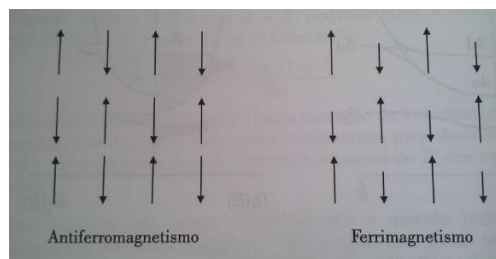


Figura 4: Ilustração de ordenamentos anti- e ferrimagnéticos simples.^[4]

Curvas de Magnetização:

Como diz o nome, as curvas de magnetização medem a intensidade da magnetização de uma amostra de acordo com a intensidade do campo magnético aplicado sobre ela. A curva de magnetização depende muito dos domínios magnéticos, as regiões dentro do material onde há alinhamento dos momentos de dipolo magnético.

Um fator importante a ser ressaltado para melhor compreensão é a existência das chamadas “paredes de domínio”, que consiste na divisão entre dois domínios magnéticos. Essa fronteira entre os domínios não é uma parede que divide ambos, e sim algo suave, onde a orientação dos momentos magnéticos varia gradualmente da orientação de um domínio para a orientação de outro domínio, como mostra a figura abaixo:

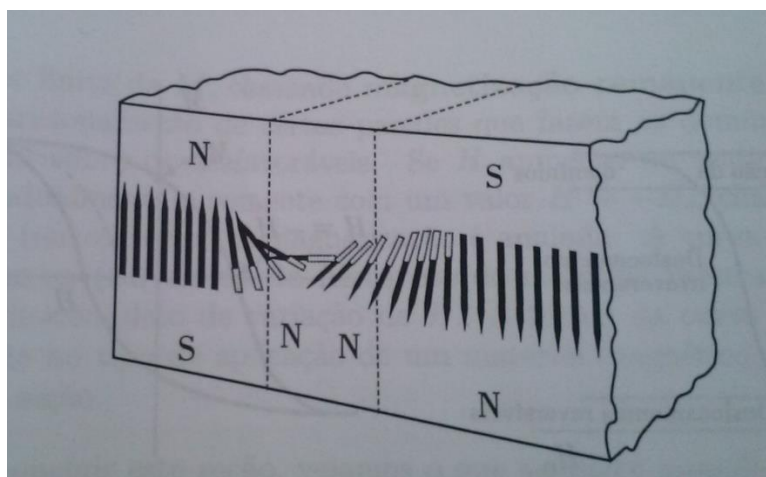


Figura 5: Ilustração de uma parede de domínio de 180°.^[4]

Partindo de um material inicialmente desmagnetizado, para pequenos valores de campo magnético, o aumento inicial da magnetização se dá devido ao deslocamento reversível das paredes de domínio, ou seja, se o campo

externo for retirado, as paredes retornam ao seu estado anterior, e a magnetização retorna a zero. Porém, para maiores valores de campo, esses deslocamentos se tornam irreversíveis, de forma que a retirada do campo externo não anule a magnetização, e ela volta por um caminho diferente do qual percorreu. E, para valores ainda maiores de campo, ocorre rotação completa dos domínios até a saturação total da magnetização em todo o material. A figura abaixo ilustra esse comportamento:

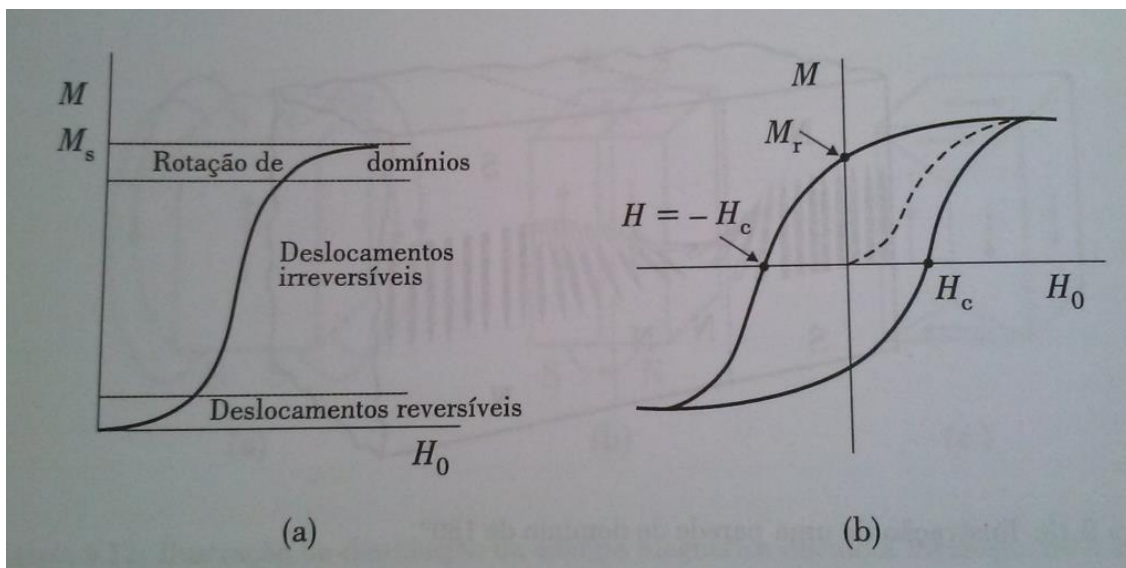


Figura 6: Variação da magnetização de material ferro ou ferrimagnético com o campo aplicado: (a) amostra inicialmente desmagnetizada; (b) curva de histerese.^[4]

A curva da direita é chamada de “curva de histerese”. A constante M_r é chamada de “magnetização remanente”, pois se refere ao que sobrou de magnetização no material mesmo sem campo aplicado. Já a constante H_c é conhecida como “campo coercitivo”, e representa o valor de campo necessário a ser aplicado para que o material fique desmagnetizado completamente. O campo coercitivo define a largura da curva de histerese, sendo que materiais com curva de histerese mais estreita, ou seja, menor campo coercitivo, são denominados materiais magnéticos “macios”, pois apresentam uma grande inclinação no início da curva e são facilmente desmagnetizáveis. Já materiais com curvas mais largas, logo maior valor de H_c , são chamados de materiais magnéticos “duros”, pois, uma vez magnetizados, necessitam de um campo magnético de grande intensidade para inverter sua magnetização. É desse tipo de material que são feitos os ímãs

permanentes que conhecemos do dia-a-dia, além de possuírem inúmeras outras aplicações, como nas áreas de acústica, medicina, eletrônica, informática, entre outras. A figura abaixo ilustra os materiais magnéticos duros e macios:

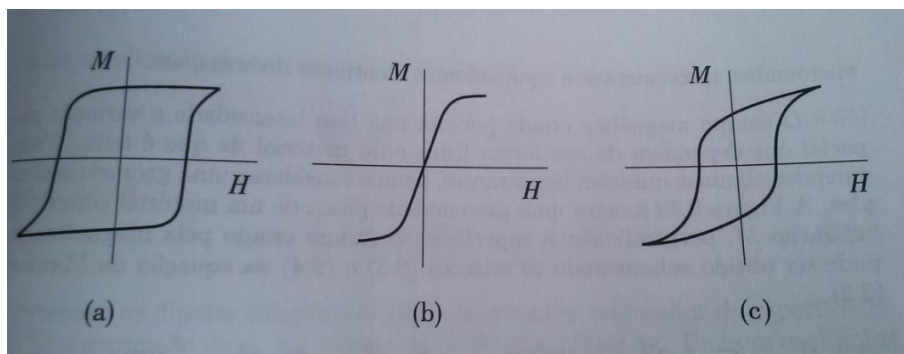


Figura 7: Ciclos de histerese de materiais magnéticos: (a) Materiais duros, ou ímãs permanentes; (b) Materiais moles, ou permeáveis; (c) Materiais intermediários para gravação magnética.^[4]

5.2) Piezoelectricidade:

Antes de entender o que é um cristal piezoelétrico, é necessário entender o que é a piezoelectricidade. A piezoelectricidade é uma propriedade presente em alguns materiais que, quando submetidos a um esforço mecânico, polarizam cargas elétricas, que aparecem em suas faces. Da mesma forma, esses materiais, se submetidos a uma tensão elétrica, podem apresentar deformação mecânica, seja alongamento ou contração^[5]. A figura abaixo ilustra ambos os fenômenos:

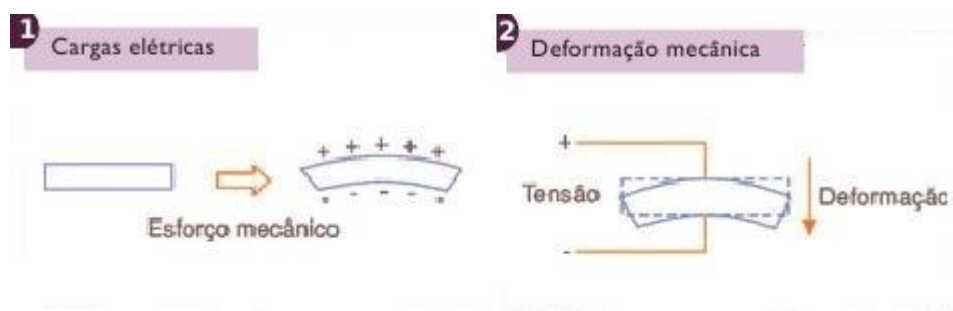


Figura 8: Piezoelectricidade: à esquerda, um esforço mecânico gera polarização elétrica nas faces do piezoelétrico. À direita, uma tensão elétrica aplicada ao piezoelétrico gera deformação mecânica.^[5]

Laser:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER), que em português significa Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação, é um tipo de fonte de luz altamente utilizado tanto para fins industriais e científicos como para fins práticos e do cotidiano, como auxiliar em apresentações de slides ou até mesmo em jogos de tiro virtual. Seu alto valor comercial e prático se deve a suas propriedades únicas, das quais se destacam a alta colimação espacial e temporal, assim como sua alta variabilidade para ser fabricado nas mais diversas cores e potências, das mais inofensivas, utilizadas para lazer e brinquedos, como lasers de alta potência utilizados em cirurgias, tratamentos médicos e experimentos científicos, além de poder ser fabricado em vários tipos (de gás, químicos, de diodo, entre outros) e de diferentes elementos, como Hélio (He), Hélio-Neônio (He-Ne), Nitrogênio (N), Argônio (Ar), Arseneto de Gálio (GaAs), Fosfeto de Índio com Gálio e Alumínio (AlGaInP), etc.

5.3)AGFM:

O magnetômetro de gradiente de campo alternado é um instrumento indicado para medidas de momento magnético e magnetização de materiais em escala micro e nanométrica^[2]. Sua utilização vem sendo ampla nessa área de pesquisa da física. A qualidade e praticidade na obtenção de curvas de magnetização fazem do magnetômetro um instrumento padrão como método de análise para esse tipo de medida.

Análogo ao método utilizado no LAM, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), o magnetômetro de gradiente alternado foi utilizado para medir curvas de magnetização, e a oscilação da amostra foi monitorada através do piezoelétrico. Neste experimento, o AGFM foi utilizado para mostrar suas vantagens em termos de rapidez na obtenção de curvas em materiais magnéticos macios quando comparado a outros tipos de magnetômetro, como os do tipo VSM e SQUID^[6].

Da mesma forma, pesquisadores do departamento de ciência dos materiais da Universidade da Pensilvânia utilizaram o mesmo sistema de medidas com o intuito de comparar os 3 tipos de magnetômetro (AGFM, SQUID e VSM). Novamente, foi constatado que o AGFM é aquele que possui maior

rapidez de medida entre os 3, além de constatar que possui maior sensibilidade em um fator de 100 ($0.01 \mu\text{emu}$ ou 10^{-11} A.m^2 do AGFM em comparação a $1 \mu\text{emu}$ ou 10^{-9} A.m^2 do VSM) quando comparado ao VSM, assim como ele é capaz de medir amostras com menor tamanho e massa. Em relação ao SQUID, chegou-se ao resultado de que o AGFM é melhor em termos de custo de operação, além da velocidade de análise^[7].

O AGFM pode desempenhar funções específicas em diferentes pesquisas, agindo como uma técnica singular ou complementar a uma série de outras técnicas. Pesquisadores do *Laboratoire de Physique des Liquides et Electrochimie*, em Paris, na França, utilizaram o AGFM em combinação com o microscópio de tunelamento (STM) para fazer medições *in-situ* com o intuito de caracterizar a estrutura e o comportamento magnético de camadas de Co/Au(111) eletrodepositadas de soluções de CoSO_4 , com ânions Cl^- e SCN^- adicionados em quantidades traço. As curvas de histerese geradas pelo AGFM serviram como forma de descobrir a espessura dos filmes de cobalto sobre a amostra.^[8]

Já pesquisadores da *Université catholique de Louvain, Belgium*, utilizaram medidas comparativas entre o AGFM e o microscópio de força magnética (MFM) para caracterizar tanto em escala nanométrica quanto macroscópica o comportamento magnético de nanofios e nanotubos de níquel.^[9]

Portanto, percebe-se que na bibliografia em geral, o AGFM é um poderoso instrumento de caracterização magnética, e sempre é utilizado com o sistema de medição por piezoelétrico, o que ressalta, novamente, que o projeto proposto neste trabalho é inovador, não possuindo referências.

6. Metodologia:

Para explicar como o projeto foi desenvolvido, primeiramente é necessário detalhar os equipamentos envolvidos tanto no sistema utilizado pelo Laboratório de Magnetismo quanto no sistema proposto por este trabalho. A maioria dos equipamentos e aparelhos são utilizados em ambos os sistemas, tais como o próprio AGFM, as fontes de alimentação, o amplificador Lock-in, o multímetro digital e o computador. Porém, enquanto no sistema antigo a medição era feita através do monitoramento de um cristal piezoelétrico, o sistema novo propõe a medição através da reflexão de um feixe de LASER em um sensor de posição (PSD).

6.1) Sistema de medição por piezoelétrico:

Antes de explicar como se desenvolveu cada etapa do projeto proposto, cabe uma breve explicação do método tradicional de medição, por monitoramento da tensão gerada pelo cristal piezoelétrico. Um material extremamente utilizado como cristal piezoelétrico, sendo o material também utilizado no laboratório de magnetismo, é o cristal de quartzo. As dimensões, espessura e tipo de corte do cristal piezoelétrico influem em sua sensibilidade e, conseqüentemente, na faixa de frequência a qual ele está mais apto a operar. Como a frequência de ressonância do sistema do LAM é extremamente baixa (~20 Hz), o cristal deve ser fabricado para ter boa sensibilidade nessa faixa.

O cristal piezoelétrico utilizado atualmente no LAM consiste de uma composição entre uma camada central metálica, que é “ensanduichada” por 2 eletrodos. Agora, para se obter o sinal de tensão elétrica gerado pelo piezoelétrico, existem 2 maneiras possíveis de se conectar os terminais do cristal: Operação Serial e Operação em Paralelo. O modo serial se refere ao caso onde uma tensão de suprimento é colocada de forma a atravessar todo o piezoelétrico, ou seja, ela tem o polo positivo em uma camada e o polo negativo no extremo da outra camada, sendo a tensão de cada camada dada pela perda de tensão total dividida pelo número de camadas de eletrodo, no caso 2. Nesse modo serial, são necessários apenas 2 fios para fazer a coleta do sinal. Já o modo de operação em paralelo ocorre quando uma voltagem de suprimento é colocada na parte central metálica do piezoelétrico, e cada um dos eletrodos recebe uma descarga de tensão própria. Isso significa que cada um dos

eletrodos necessita de mais um fio de conexão para o polo negativo, de forma que, neste sistema, são necessários 3 fios para fazer a coleta do sinal. Dessa forma, nesse modo de operação é necessária apenas metade da voltagem de suprimento do que no modo serial. O modo utilizado no magnetômetro no qual este projeto foi desenvolvido é o modo de operação em paralelo. Ambos os modos estão explícitos na figura abaixo:

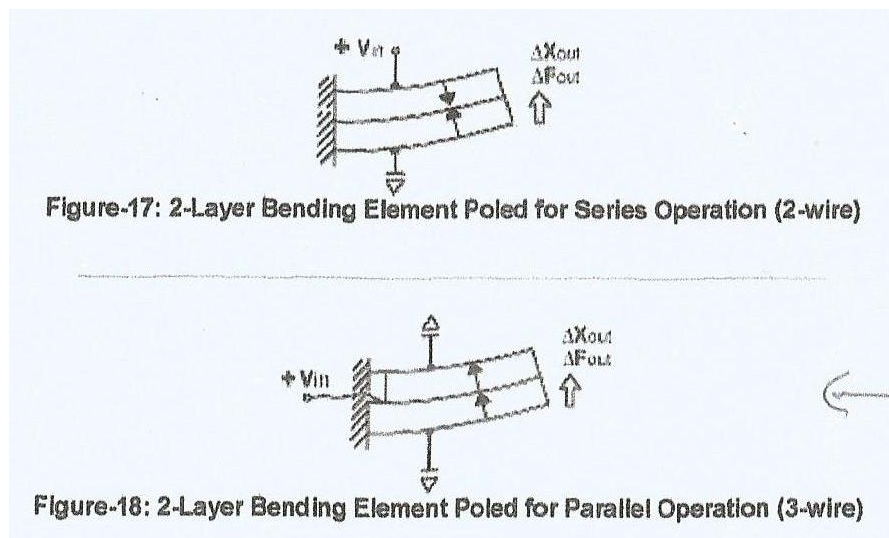


Figura 9: Modos de Operação do piezoelétrico^[10]

O sinal gerado pelo piezoelétrico é então repassado para o amplificador lock-in, que é responsável pela interface com o computador, onde será mostrada a curva resultante. O modelo de amplificador Lock-In utilizado é SR830 DSP, fabricado pela Stanford Research Systems, como mostrado abaixo^[11]:

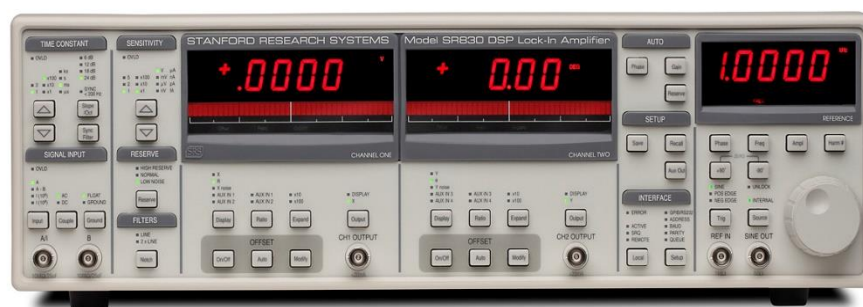
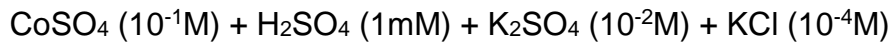


Figura 10: Amplificador Lock-In

6.2) Amostra:

Deve-se salientar que neste projeto foi utilizada uma amostra de ouro (Au) recoberto com cobalto (Co). A amostra foi fabricada através de um processo composto, onde, em primeiro lugar, foi feito um *sputtering* de ouro sobre um substrato de silício (100), de forma a criar uma camada condutiva com melhor

aderência ao material que será colocado como “cobertura”. Posteriormente, foi adicionado cobalto sobre essa composição de ouro e silício, por um processo de eletrodeposição, através da seguinte reação^[2]:



Essa solução sulfatada possuía um pH controlado em 2.5 pelo ácido sulfúrico presente, enquanto a taxa de varredura do processo foi constante em 10 mV/s. A amostra foi produzida pelo doutorando Vinícius Capellano unicamente com o intuito de servir para testes no laboratório de magnetismo da UFRGS. A amostra utilizada está representada na figura abaixo:

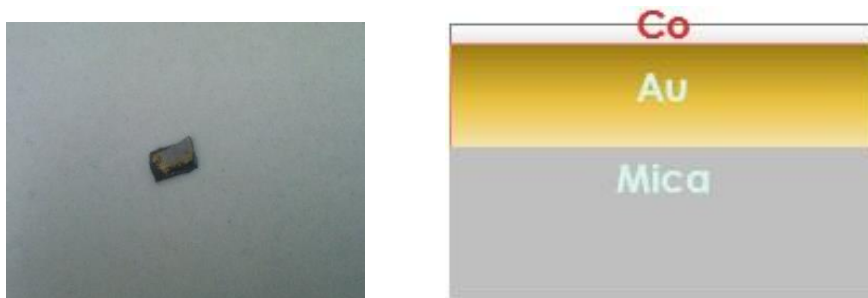


Figura 11: Amostra utilizada no projeto

6.3) Sistema de Medição a laser:

Sobre o novo sistema proposto de medição, é necessário explicar de forma mais precisa como foi desenvolvida a instrumentação do projeto, que consistiu em grande parte do trabalho. Assim, vamos listar os objetivos propostos para essa etapa e detalhar a evolução de acordo com as análises feitas em termos de viabilidade.

Dessa forma, os objetivos propostos para a instrumentação eram:

6.3.1) PSD:

1) *Montar um suporte para o sensor de posição que tenha um ajuste de altura de forma a poder posicioná-lo corretamente com a reflexão do feixe de laser.*

Nesse item, a placa sensora foi cedida pelo professor Henri Boudinov, do laboratório de microeletrônica. Para adaptá-la ao sistema, era necessário ter uma forma de coletar o sinal elétrico dos terminais do sensor e, para isso, era necessário a colocação de fios condutores nos terminais, de uma forma fixa, que não prejudicasse os contatos e também não sofresse interferência de fontes externas. Para isso, duas tentativas foram feitas: primeiramente, utilizou-se solda

prata para ligar os fios aos terminais. Porém, a solda prata não mostrou boa capacidade de fixação dos fios nos terminais, além de ser condutora, o que fazia com que qualquer resquício de cola ao longo de placa causasse um curto-circuito no sinal, além de não fornecer a proteção adequada contra interferência por fontes externas. Portanto, a solução adequada para esse problema foi a utilização de uma solda metálica, que fixou fortemente os fios aos terminais elétricos com apenas um ponto de solda. Como a solda metálica é feita de estanho, que também é um bom condutor de eletricidade, foi necessária a colocação de uma proteção isolante. Para isso, uma mistura de POXIPOL juntamente com pó de grafite foi aplicada sobre a região da solda, e, posteriormente, recobertos com fita isolante, providenciando o isolamento adequado. Os fios conectados aos terminais eram de cobre, e extremamente finos, de forma ficarem fixos ao sensor após a solda.

Posteriormente, foi necessária a fixação do sensor a uma base mais rígida, para evitar danos e uma possível quebra do sensor. Para isso, primeiramente o sensor foi fixado a um pequeno pedaço de placa de circuito e, posteriormente, anexado a uma protoboard, que forneceu a rigidez mecânica necessária para o suporte do sensor. Os fios do sensor foram ligados à placa de circuito, que também teve curtos fios de protoboard conectados de forma a continuar o circuito. Assim, esses fios curtos foram conectados na protoboard, e outros fios de protoboard foram colocados em série, sendo esses fios o meio por onde seria coletado o sinal de interesse do projeto. Nessa etapa, a montagem ficou conforme a figura abaixo:

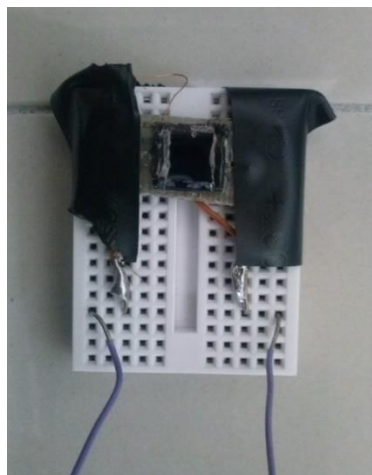


Figura 12: Protoboard com PSD

Por fim, o sensor foi encaixado em um suporte de plástico com altura regulável, de forma a providenciar o ajuste correto da altura do sensor frente à necessidade da medida. A imagem a seguir ilustra a montagem final do suporte para o sensor de posição:



Figura 13: Montagem final do detector

Percebe-se que, como última medida de segurança e precaução contra interferências, colocou-se fita isolante nas bordas.

6.3.2) Laser:

2) Conseguir uma fonte de laser adequada, que possua um feixe colimado e com diâmetro e intensidade suficientes para, após as reflexões, chegar ao PSD com parâmetros suficientes para gerar a diferença de tensão que será o sinal a ser medido como forma de monitorar a oscilação da haste.

Primeiramente, analisaram-se as necessidades da fonte de laser. Dentre essas necessidades, destacam-se:

- o feixe precisa ser focalizado tanto no espelho como no sensor de posição;
- o feixe deve atingir o detector com intensidade suficiente para gerar uma tensão que esteja em conformidade com a capacidade do detector.

- O feixe deve disparar automaticamente, ou seja, também não pode necessitar que o usuário precise ficar segurando o botão para disparar o laser.

Assim, foram analisadas as seguintes opções como fonte de laser:

- Laser industrial profissional: Possui alta qualidade, porém tem o problema do alto custo e demora na entrega;
- Laser extraído de módulos leitores de CD/DVD de computadores: Laser com feixe de diâmetro milimétrico, e excelente focalização, pois já vem com a lente acoplada;
- Caneta Laser Simples: Barata, disponível em vários lugares, sendo necessário tomar cuidado apenas com sua qualidade, principalmente para que não haja dispersão do feixe.

Com o intuito de diminuir o custo do projeto e evitar o tempo de espera de uma caneta laser profissional, além de haver a possibilidade de testar as outras opções, a opção de compra de uma caneta laser profissional acabou descartada num primeiro momento. Assim, optou-se por testar a viabilidade das outras duas opções.

Utilizando-se um módulo leitor de CD/DVD descartado disponível no setor de TI da UFRGS, retirou-se a fonte de laser responsável pela leitura dos CD's/DVD's. Apesar da excelente focalização apresentada por esse laser e sua lente, a distância de foco era obviamente muito pequena, num nível em que mostrou-se impraticável refocalizar o feixe para uma distância na casa de centímetros, mesmo utilizando um conjunto de lentes. A tentativa de refocalizar o feixe, mesmo após remoção da lente convergente acoplada à fonte, mostrou-se infrutífera, além de evidenciar a baixa intensidade desse tipo de fonte, tornando-a inviável devido à necessidade de uma intensidade mínima citada anteriormente.

Devido às considerações acima, optou-se pela utilização da caneta laser simples, que apresentou feixe colimado com diâmetro aceitável e pequena dispersão na distância de trabalho desejada. Com o intuito de otimizar a fonte de laser, tapou-se a saída do feixe com fita isolante, e abriu-se um pequeno orifício de forma a passar apenas o diâmetro desejado do feixe, deixando ainda uma intensidade suficiente para ativar o sensor de posição. Para resolver o problema de se ter um feixe automático, primeiramente abriu-se a caneta laser, removendo

toda a casca metálica e deixando apenas o circuito responsável pela criação do feixe. Posteriormente, anexou-se um botão a esse circuito, de forma que o feixe era ligado toda vez que o botão era pressionado, e só era desligado após pressionar novamente o botão. O problema relativo a essa montagem com o botão se mostrou o peso do suporte para as pilhas, muito maior que o peso do próprio circuito responsável pela geração do laser, tornando a fonte de difícil manuseio.

Dessa forma, anexou-se o laser a uma suporte metálico e utilizou-se fita isolante para prender o laser ao suporte das pilhas, de forma a balancear o peso da fonte e aumentar sua estabilidade mecânica. Porém, ao longo do tempo, o laser começou a apresentar dispersões na distância de trabalho desejada, uma vez que, ao desmontar o casulo de proteção da caneta laser, removeu-se também sua lente interna e as paredes que evitavam dispersão da luz. Assim, tornou-se inviável sua utilização.

Por fim, adquiriu-se outra caneta laser, e, dessa vez, ela não foi desmontada. Para deixar o laser ligado de forma contínua, utilizou-se um suporte com rosqueamento que aperta o dispositivo. Assim, apertou-se o laser de forma a manter o botar de ligar do laser sempre pressionado. Ao se terminar o experimento, bastava desrosquear a morsa.

As imagens abaixo mostram ambas as fontes testadas:



Figura 14a: Laser testado e posteriormente reprovado



Figura 14b: Laser mais utilizado ao longo do projeto

Para promover um ajuste mais sensível nos eixos x , y e z , foi providenciado um conjunto de transladores (três no total, um para cada dimensão), conseguido por cortesia do Laboratório de Laser e Óptica. Assim, o sistema ficou da seguinte forma:



Figura 15: Laser em cima dos trasladores x,y,z

Por fim, também substitui-se a caneta laser por um pointer, que apresenta um feixe praticamente idêntico ao da caneta laser. A figura abaixo mostra o pointer utilizado:



Figura 16: Pointer laser utilizado

6.3.3) Espelho:

3) *Conseguir um pedaço de espelho adequado.*

Para a obtenção de um espelho adequado, o principal fator a se levar em consideração era o peso. Um espelho excessivamente pesado alteraria de forma significativa não apenas a frequência de ressonância da haste, como o próprio movimento de oscilação em si, uma vez que o espelho estava colado em apenas uma das laterais da haste. A refletividade do espelho até poderia ser pequena, pois o detector tem boa sensibilidade^[14], porém uma intensidade refletida maior devido à maior refletividade do espelho geraria um sinal de maior amplitude, melhorando a qualidade da medida.

Assim, utilizou-se um pequeno pedaço de alumínio como espelho, uma vez que o alumínio possui baixa densidade (2697 kg/m^3)^[12] e alta refletividade (acima de 80% para qualquer comprimento de onda no visível)^[13]. O espelho utilizado está ilustrado na figura abaixo:

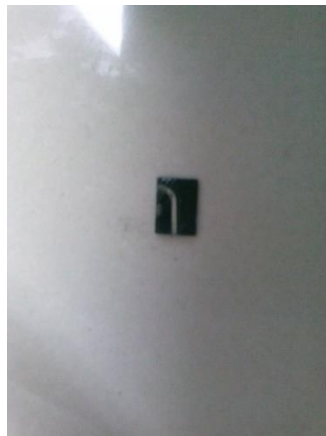


Figura 17: Espelho utilizado no projeto

O espelho foi colado à haste de vidro pirex através de uma pasta de silicone, tornando o espelho facilmente removível, assim como a própria pasta, sendo possível limpar a haste após o uso apenas passando álcool isopropílico.

6.3.4) Cabos:

4) *Considerando a distância entre a posição necessária para a colocação do sensor de posição e do equipamento de análise (amplificador lock-in), deve-se conseguir um cabo que possua comprimento suficiente para evitar perdas de sinal, assim como interferência por ruído, além de que suas conexões devem ser adequadas tanto ao amplificador lock-in (conexão tipo BNC) quanto ao suporte de posicionamento do PSD.*

Primeiramente, testou-se uma sucessão de cabos em sequência, para levar o sinal do detector até o amplificador lock-in. Porém, essa configuração apresentou alto ruído, sendo então necessária uma outra forma de transmissão do sinal. Assim, através do setor de eletrônica da UFRGS, fez-se dois cabos adequados para o experimento. Cada cabo consistia em 2 jacarezinhos em uma das extremidades, e um conector do tipo BNC fêmea na outra extremidade. Os cabos foram feitos nessa configuração em conformidade com os cabos utilizados no sistema por piezoelétrico, que também possuíam dois conectores em uma ponta, sendo uma delas com o intuito de aterramento. De cada cabo, utilizou-se um jacarezinho para prender ao fio de protoboard por onde se coletou o sinal do detector, enquanto o outro jacarezinho era aterrado. A outra extremidade, com o conector BNC, foi conectada ao amplificador lock-in. Cada cabo possui 2m de comprimento, uma vez que a distância medida entre a posição do detector e do amplificador lock-in foi de 1,30m. Assim, construíram-se os cabos com uma margem suficiente para não ficarem muito tensionados, o que faria com qualquer perturbação fosse capaz de derrubar o detector. Os cabos construídos estão representados abaixo:



Figura 18: Cabos utilizados no projeto

6.3.5) Alinhamento:

5) Conseguir um alinhamento correto do sistema feixe-espelho-PSD, com angulação suficiente para gerar varredura no sensor e não haver muita dispersão do feixe, dentro dos limites físicos impostos pelo posicionamento das bobinas e demais componentes do AGFM.

Com toda a aparelhagem descrita acima montada, o desafio consistia em obter as curvas desejadas e compará-las ao sistema antigo. Porém, ao longo do tempo de desenvolvimento do trabalho, a parte de maior dificuldade foi a geometria. As bobinas externas são maciças, possuindo 7,5 cm de raio cada uma, assim como a distância entre elas também é de 7,5 cm. Assim, como a haste com a amostra encontra-se no meio do caminho entre as bobinas, a distância da haste para cada bobina é de 3,75 cm. Assim, considerando-se a melhor hipótese possível, com o feixe de laser encostado na extremidade de uma das bobinas, o ângulo mais fechado possível a se obter é de $26,565^\circ$, uma vez que $\text{tg}^{-1}(3,75/7,5=0.5)=26,565^\circ$. Novamente em uma hipótese idealizada, o detector também estaria colado na extremidade oposta da bobina. A figura abaixo ilustra essa configuração:

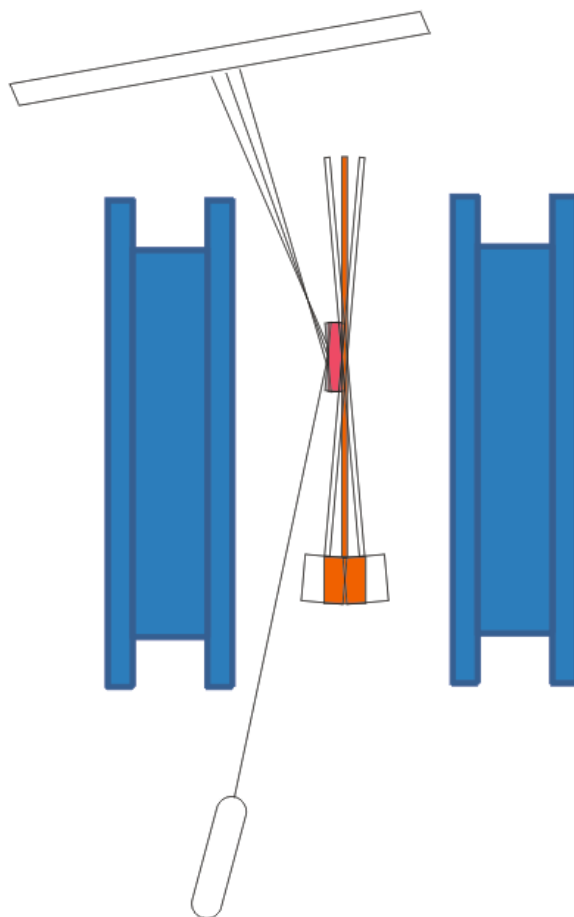


Figura 19: Esquemático do caminho percorrido pelo laser. O tamanho do PSD foi exagerado para evidenciar que a amplitude da superfície do PSD atingida é muito pequena comparada ao tamanho do sensor.

Assim, sabendo-se que a amplitude de oscilação é muito pequena, sendo, no máximo, de 1 mm para amostras com alta magnetização, percebe-se que, em posições opostas da amplitude de oscilação da haste, a diferença de caminho óptico do feixe de laser até chegar no detector, considerando o detector perpendicular ao feixe refletido, é irrisória, uma vez que, em uma das extremidades da oscilação, a distância da bobina até a amostra será de 3,65 cm, enquanto na outra extremidade, a distância da bobina até a amostra será de 3,85 cm. Assim, pelo triângulo retângulo formado, temos:

Com a amostra parada: $(3,75 \text{ cm})^2 + (7,5 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 8,385 \text{ cm}$.

Com a amostra em uma extremidade da oscilação: $(3,65 \text{ cm})^2 + (7,5 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 8,341 \text{ cm}$.

Com a amostra na outra extremidade da oscilação: $(3,85 \text{ cm})^2 + (7,5 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 8,430 \text{ cm}$.

Assim, a diferença de caminho óptico de uma ponta a outra da oscilação, numa situação totalmente idealizada, é de $d_2 - d_1 = 8,430 \text{ cm} - 8,341 \text{ cm} = 0,08945 \text{ cm}$, ou seja, 0,8945 mm. Essa distância, apesar de estar acima da resolução do PSD, que é de 10 micrômetros, não é suficiente para gerar uma curva de magnetização, pois, em termos práticos, considerando que o sistema é ajustado e operado manualmente, não é possível atingi-la. A diferença de caminho óptico atingida na prática é ordens de grandeza menor, e, levando em conta as imperfeições do próprio laser e interferência de fatores externos, torna-se assim muito difícil conseguir um resultado adequado. Considerando que o sensor tem largura de 1 cm, mesmo que fosse possível atingir essa distância idealizada, ainda estaríamos utilizando menos de 10% da área disponível do detector.

Afastando-se tanto o sensor como o laser da bobina, se consegue um aumento na distância percorrida pelo feixe. Porém, a diferença de caminho óptico, que é o que importa na medida, diminui ainda mais. Considerando que tanto o laser quanto o detector foram afastados a uma distância de 10 cm do centro da bobina, temos:

Com a amostra parada: $(3,75 \text{ cm})^2 + (10 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 10,6800 \text{ cm}$.

Com a amostra em uma extremidade da oscilação: $(3,65 \text{ cm})^2 + (10 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 10,6453 \text{ cm}$.

Com a amostra na outra extremidade da oscilação: $(3,85 \text{ cm})^2 + (10 \text{ cm})^2 = d^2$, logo $d = 10,7155 \text{ cm}$.

Assim, a diferença seria de $d_2 - d_1 = 0,0702 \text{ cm}$, ou $0,702 \text{ mm}$.

6.3.6) Medição por variação de intensidade:

Por fim, visto as dificuldades perante o controle da oscilação da haste para realizar a varredura em posição no PSD, pensou-se em uma saída alternativa. Considerando que o sensor de posição gera diferentes tensões de saída para diferentes intensidades incidentes, sendo essa sensibilidade linear e contínua^[9], resolveu-se trabalhar com essa capacidade do sensor. A figura abaixo, que foi obtida em análise em um PSD semelhante ao utilizado nesse projeto, no laboratório de microeletrônica da UFRGS, ilustra essa propriedade do sensor:

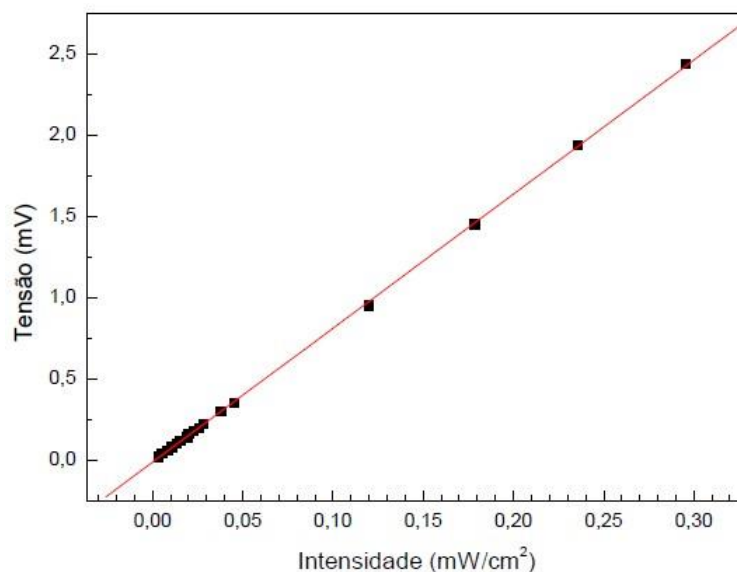


Figura 20: Intensidade x tensão do PSD^[14]

Assim poderia-se incidir o feixe sempre na mesma posição, porém com intensidades diferentes, de forma a gerar um sinal de tensão que varie conforme o desejado para se obter a curva de magnetização.

Para que essa varredura de intensidade fosse possível, era necessário encontrar um meio de fazer a intensidade incidente do feixe no detector variar com a oscilação da haste, mantendo a posição onde o feixe incide fixa. Considerando que o que visualizamos de um feixe de laser não é todo o feixe

focalizado, e sim um centro que corresponde ao feixe real e mais anéis gerados pela dispersão e difração do feixe pela abertura do laser, colocou-se uma fenda sobre o sensor, de forma a restringir a posição do sensor onde o feixe bate, uma vez que a própria intensidade do feixe não é constante ao longo de todo o seu raio visual. Com um pequeno pedaço de fita, foi possível fazer essa fenda, representada na figura a seguir:

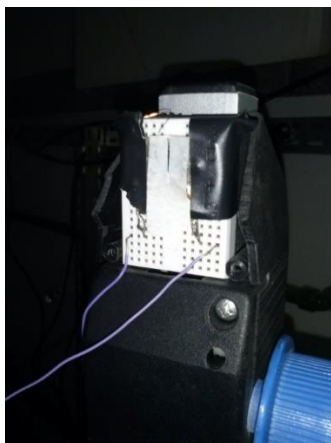
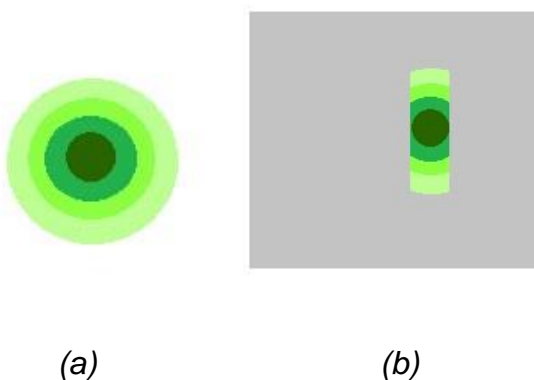


Figura 21: PSD com a fenda

Alinhando o centro do feixe com a abertura da fenda e o sistema parado, obteve-se um ponto de partida. Com o sistema oscilando, a posição do feixe variava muito pouco, na faixa dita anteriormente (imperceptível visualmente), porém o centro do feixe, região de maior intensidade, se deslocava ao longo da fenda, onde, por vezes apenas uma fração à esquerda do centro feixe ultrapassava a fenda e, por outra, apenas uma fração à direita do centro do feixe ultrapassava a fenda. Assim, a intensidade que passava a fenda e chegava ao detector era variável, e dessa forma se podia obter o sinal desejado para realizar as medidas. A figura abaixo ilustra como o sensor detecta as diferentes intensidades do feixe:



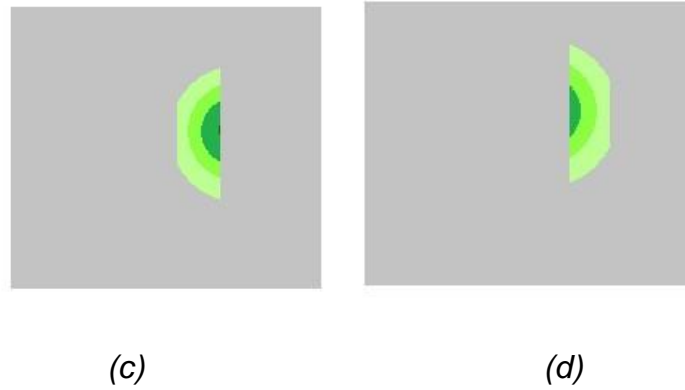


Figura 22: A parte cinza corresponde ao PSD. (a) Feixe de laser com intensidade variável radialmente. As cores mais escuras correspondem a maiores intensidade (b) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra parada. (c) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra num extremo da oscilação. (d) Faixa do laser que incide no sensor com a amostra no outro extremo da oscilação, gerando um sinal equivalente ao da figura (c). As faixas demonstradas correspondem à posição onde a fenda está localizada, bloqueando todo o resto do feixe.

7.Resultados e Discussão:

Os resultados obtidos serão demonstrados paralelamente a uma comparação frente aos objetivos propostos, de forma a ficar mais claro a finalidade de obtenção de cada resultado.

7.1)Instrumentação:

Primeiramente, será discutida a parte do projeto onde se devia obter a instrumentação adequada para se realizarem testes capazes de medir a viabilidade do projeto, na tentativa de obtenção de curvas de magnetização comparáveis às do sistema de medição por piezoelétrico. Os objetivos previstos para a área de instrumentação, seguidos por seus resultados, foram os seguintes:

1) *Montar um suporte para o sensor de posição que tenha um ajuste de altura de forma a poder posicioná-lo corretamente com a reflexão do feixe de laser.*

Obteve-se sucesso nessa etapa do processo, pois o detector sensível à posição (PSD) foi acoplado a uma placa de circuito e, posteriormente, anexado a uma protoboard e a um suporte com altura regulável, de forma a promover rigidez mecânica e proteção contra curtos-circuitos causados por uma conexão indesejada entre partes do sensor. O resultado final obtido para a montagem do sensor foi o seguinte:



Figura 23: Montagem final do detector

2) Conseguir uma fonte de laser adequada, que possua um feixe colimado e com diâmetro e intensidade suficientes para, após as reflexões, chegar ao PSD com parâmetros suficientes para gerar a diferença de tensão que será o sinal a ser medido como forma de monitorar a oscilação da haste.

Para o experimento desejado neste trabalho, as propriedades do LASER citadas na revisão bibliográfica fazem dele uma ótima escolha como fonte de luz para o projeto, principalmente por sua alta colimação espacial, visto que é necessária a menor dispersão espacial possível para aumentar a qualidade das medidas, uma vez que as dimensões de oscilação de uma amostra no AGFM pode ser de ordem até mesmo nanométrica, o que faz com que qualquer pequena dispersão se acumule ao longo da medida, gerando um grande erro na medição final. Assim, por questões práticas e financeiras, a fonte escolhida para o desenvolvimento do projeto foi simplesmente uma caneta laser comercial, que é do tipo semiconductor, com comprimento de onda na faixa de 630-650 nm (o que corresponde a algo em torno de 85% da tensão gerada pelo detector em relação a sua tensão máxima)^[9], na faixa do vermelho, com potência nominal < 5mW. Porém, devido à necessidade de colimação do laser, foi colocada uma vedação na saída do laser, abrindo-se um pequeno orifício, com a finalidade de agir como um *pinhole*, de forma a tornar o feixe de saída o menor possível. Isso faz com que a potência de saída tenha um valor menor que a potência nominal, visto que boa parte do feixe acaba sofrendo reflexões internas devido à vedação. Deve-se tomar cuidado para que essa potência ainda seja alta o suficiente para, após passar pelo sistema de medição, chegar ao PSD com intensidade suficiente para se obter uma boa variação no sinal gerado. Esse cuidado foi tomado, e a intensidade atingindo o detector gerava tensão suficiente para uma leitura. No final, as curvas de magnetização obtidas com o sistema a laser foram obtidas com o pointer como fonte, logo a montagem final da fonte de laser ficou assim:



Figura 24: Montagem final do laser

3) Conseguir um pedaço de espelho adequado.

Para atingir esse objetivo, utilizou-se um pedaço de alumínio retangular, visto que satisfazia as condições de baixo peso e boa refletividade. O espelho utilizado está representado na figura abaixo:

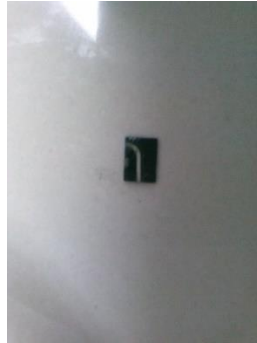


Figura 25: Espelho utilizado no projeto

7.2) Curvas de magnetização e condições de medição:

Na segunda parte dos objetivos propostos, estão aqueles relacionados às curvas de magnetização e às condições de medição. Os objetivos relativos a essa parte eram os seguintes:

1) *Relação Sinal/Ruído*: As medições devem obter a maior relação sinal ruído possível.

Nesse objetivo, a ideia era obter curvas de magnetização com o sistema a laser que tivessem relação sinal/ruído comparável ao sistema por piezoelétrico. Porém, a tensão de saída das curvas medidas com o sistema a laser são inferiores à tensão de saída do piezoelétrico. Isso se deve tanto à capacidade do detector quanto à potência da fonte de laser. Considera-se a curva de sensibilidade da intensidade incidente pela tensão gerada no PSD, percebe-se que a relação é linear, conforme a figura abaixo, que foi obtida em análise em um PSD semelhante ao utilizado nesse projeto, no laboratório de microeletrônica da UFRGS:

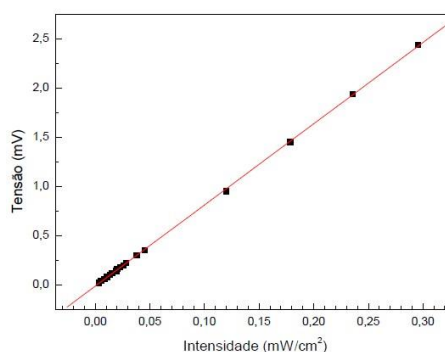


Figura 26: Intensidade x tensão do PSD^[14]

Assim, mantendo-se a linearidade, há uma relação necessária entre a intensidade do laser e a tensão gerada que deve ser seguida para se obter uma alta tensão de saída. Considerando que a potência de saída do laser nominalmente é menor que 5 mW, e que a seção transversal do feixe é aproximadamente 0,5 cm², a intensidade tem um valor máximo de 2,5 mW/cm², o que, mantendo uma relação linear perfeita com a curva, geraria um sinal de saída de aproximadamente 20 mV como tensão máxima. Considerando que apenas uma parte do feixe de laser ultrapassa a fenda, a tensão gerada na saída é muito menor, como pode ser visto na figura abaixo:

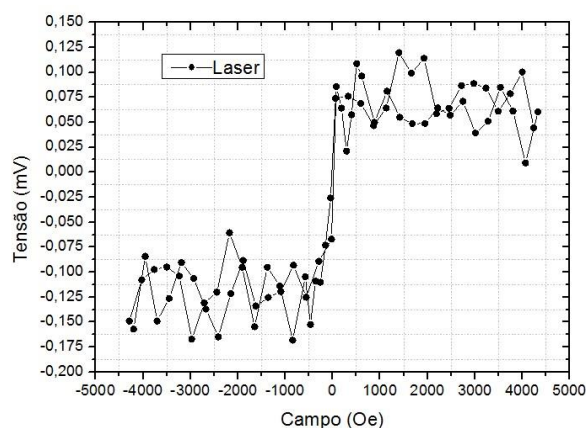


Figura 27: Curva de magnetização primária com sistema a laser

Com apenas alguns ajustes do posicionamento da fenda sobre o sensor, deslocando-a em direção a uma das bordas, uma vez que o sensor gera maiores sinais perto das bordas (o centro do sensor corresponde ao ponto zero), conseguiu-se dobrar o valor do sinal gerado e, conseqüentemente, a relação sinal-ruído, como mostra a figura abaixo:

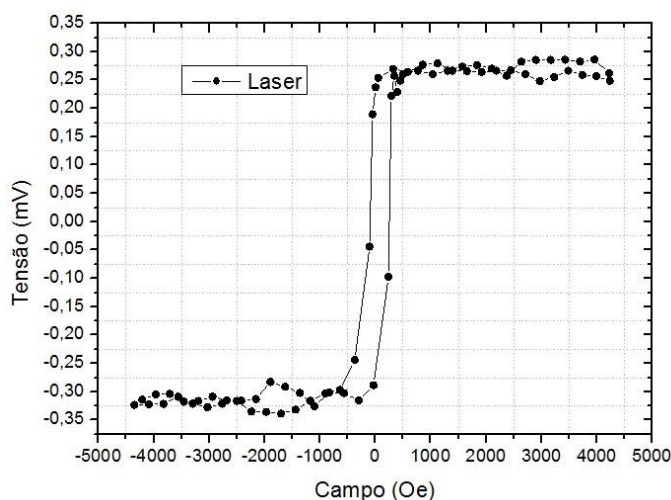


Figura 28: Curva de magnetização ajustada com o sistema a laser

Já o cristal piezoelétrico chega a apresentar uma tensão de saída máxima de aproximadamente 60 mV, como mostra a figura abaixo:

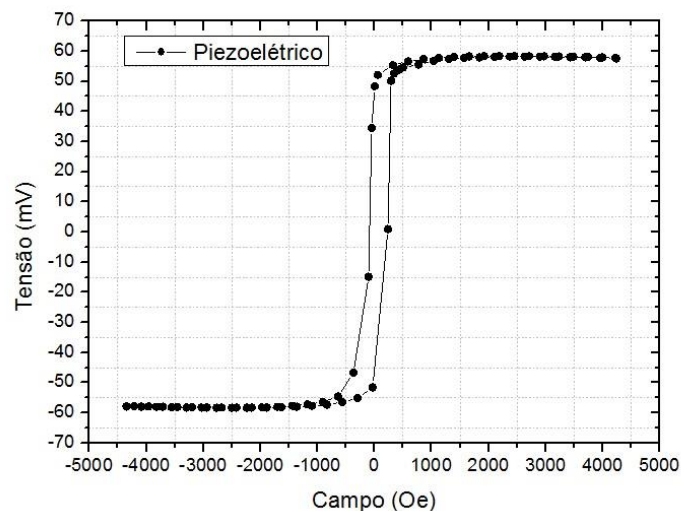


Figura 29: Curva de magnetização com sistema por piezoelétrico

Comparando-se as duas curvas, chegamos à figura abaixo, que evidencia a diferença de intensidade do sinal e da razão sinal/ruído das medidas:

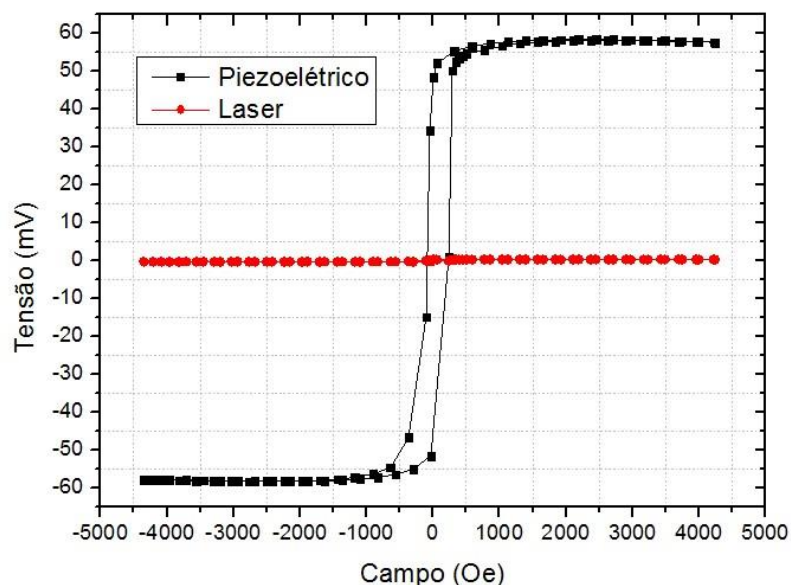


Figura 30: Comparação das curvas de magnetização

Mostra-se então, que, dentro dos limites do laser e do sensor, a intensidade obtida com a medida foi muito inferior em relação ao sistema por piezoelétrico, porém, para obter uma capacidade semelhante à do sistema por piezoelétrico, é necessária uma maior intensidade do laser incidente. Ainda assim, a efetividade da medição pode ser medida comparando a intensidade relativa de ambas as curvas, mostrada na figura a seguir:

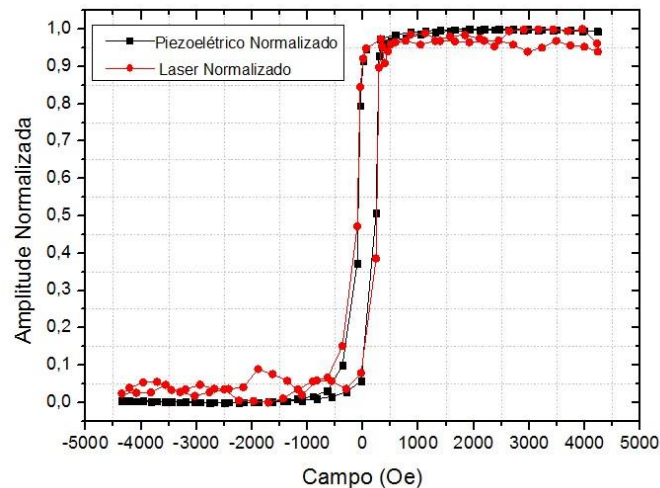


Figura 31: Curvas de histerese normalizadas de ambos os sistemas

O campo coercitivo das duas medidas também é um bom parâmetro de comparação, sendo mostrado em ambos os sistemas nas figuras a seguir:

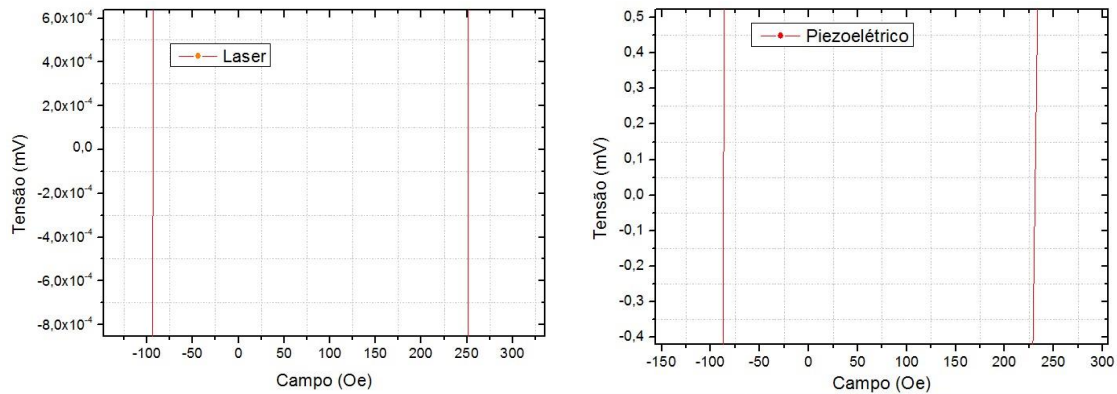


Figura 32: Comparação do campo coercitivo pelas medidas

Analisando a figura assim, percebe-se que o campo coercitivo da medição com o sistema por piezoelétrico é aproximadamente 310 Oe, enquanto na medida com o sistema por laser é em torno de 340 Oe. Esses valores tem uma variação aproximada de 10%, o que mostra que a medida a laser apresenta boa qualidade e confiabilidade, apesar da desvantagem em termos de intensidade de sinal.

2) *Repetitividade: Deve-se conseguir montar um sistema onde se possa fazer uma grande quantidade de medidas sem que se altere a estrutura do sistema. Esse fator pode se tornar uma vantagem em relação ao sistema anterior, visto que o cristal piezoelétrico pode ser afetado toda vez que a amostra for substituída.*

Esse objetivo foi atingido parcialmente, pois o sistema de detecção a laser, apesar de ter sua montagem feita de forma manual, uma vez montado, era capaz de fazer várias medições sequenciais sem se alterar a estrutura nem o posicionamento de laser e/ou detector. Porém, assim como no sistema por piezoelétrico, na necessidade de substituição de amostra, deve-se tomar cuidado com o posicionamento do espelho, que está acoplado a haste. Assim, caso haja alteração no posicionamento do espelho, é necessário reposicioná-lo, ou ajustar laser e detector para a nova posição do espelho.

3) Estabilidade de Medição: As medidas não devem apresentar grandes variações em seus parâmetros, principalmente em termos de posição (estabilidade mecânica).

Esse objetivo, assim como o citado acima, foi atingido de forma parcial, pois, uma vez que o sistema foi montado, se mostrou estável mecanicamente, e capaz de realizar seguidas medições sem ter seus parâmetros alterados. Porém, foi imposta ao projeto a condição de sempre deixar o AGFM pronto para a utilização do sistema por piezoelétrico, visto que este funciona corretamente e não teria porque ser descartado. Assim, toda vez que se faziam medições relativas ao sistema novo, era necessário montar toda a configuração necessária para a realização do experimento e, após o uso, desmontá-la. Caso fosse desnecessária a utilização do sistema por piezoelétrico, o sistema a laser poderia ficar posicionado de forma permanente e assim o objetivo seria atingido completamente.

4) Sensibilidade a diferentes magnetizações de amostra: O sistema deve ser capaz de medir magnetizações de amostra com a mesma sensibilidade do sistema anterior. Nesse ponto, inclui-se os diferentes tipos de magnetismo, tais como: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, entre outros.

O sistema de medição proposto utilizou como amostra um substrato de cobalto recoberto com ouro, de forma que a amostra utilizada era ferromagnética. Foi feita uma tentativa de obtenção de curvas de magnetização utilizando-se um pedaço de solda como amostra, considerando que a solda é feita de estanho, um elemento paramagnético.^[15] Porém, o resultado não foi satisfatório, de forma que o novo sistema apresentou apenas sensibilidade para amostras ferromagnéticas, sendo necessário um futuro aprimoramento para ser

capaz de medir amostras paramagnéticas e, se possível, puramente diamagnéticas.

7.3) Aprendizado:

Por último, os objetivos relativos ao aprendizado do aluno mostraram resultados positivos, uma vez que foram aprendidas as técnicas de medição do sistema por piezoelétrico, como funcionam os equipamentos envolvidos, além de ter sido feito um estudo sobre as condições e equipamentos do sistema alternativo baseado em laser. Nesse quesito, vale ressaltar que a compreensão das inúmeras falhas na obtenção dos resultados são tão importantes quanto o entendimento do motivo de se ter obtido a curva desejada, sendo as falhas e suas análises processos essenciais do aprendizado.

8. Conclusões:

Analisando parte a parte do processo de desenvolvimento desse projeto, conclui-se que a parte de instrumentação do projeto apresentou-se satisfatória para o caráter de teste do projeto, sendo funcionais e adequadas para a realização das medidas, considerando também que foram construídas de acordo com os equipamentos e acessórios disponíveis do laboratório da magnetismo e com o apoio do setor de eletrônica da ufrgs. Para a obtenção das curvas de magnetização, mostrou-se inviável medir a diferença de caminho óptico do feixe, e supõe-se que faltou uma maneira de amplificar em várias ordens de grandeza a diferença de caminho óptico do feixe de laser nas diferentes posições da amplitude de oscilação da haste, de forma a varrer toda a superfície do PSD, gerando tensões significativamente diferentes para que se possa obter a curva desejada. Assim, utilizou-se o detector como um sensor de intensidade, que, com uma fenda posicionada em sua superfície, selecionando o feixe que chega no detector numa posição fixa, provou-se ser a maneira mais eficaz de se obter o resultado desejado, monitorando a magnetização da amostra através da oscilação da haste.

As maiores dificuldades impostas ao projeto foram as condições mecânicas e limitações de posicionamento de cada um dos instrumentos utilizados para o sistema a laser, principalmente pela necessidade de desmontar todo o sistema após cada utilização. Assim, os suportes de cada uma das partes deviam ser móveis, assim como o espelho acoplado à haste devia ser facilmente removível.

Considerando o caráter de teste do projeto, visando apenas obter a viabilidade das medições de curvas de magnetização, conclui-se que é necessária a obtenção de uma aparelhagem profissional para a realização de medidas que satisfaçam exigências maiores, caso se queira tornar a medição por laser como uma medida padrão, uma vez que o sistema é extremamente sensível e frágil, logo, para poder se obter valores padrões para os parâmetros necessários, deve-se utilizar instrumentação adequada para a faixa desejada, e fixá-la ao sistema de forma a não ser necessário o reajuste do posicionamento de laser/espelho/sensor a cada medição.

Por tratar-se de um projeto de diplomação de engenharia física, a vivência e o aprendizado do aluno também necessitam de atenção. Nesse viés, conclui-

se que o projeto serviu ao seu propósito, pois apresentou desafios e aprendizado constante ao longo de todo seu desenvolvimento, sendo necessário não apenas um estudo de caso, mas também soluções criativas e ideias diversas, além da colaboração dos outros envolvidos no projeto, uma vez que o projeto é inovador e não possui referência exata sobre como realizar o tipo de medição proposto.

9. Sugestões para Futuros Trabalhos:

Considerando que as grandes dificuldades do projeto foram relativas à dificuldade de implementação tanto da instrumentação quanto do posicionamento desejados, primeiramente sugere-se que um futuro projeto seja desenvolvido com instrumentos mais adequados à realização do experimento. Apesar da instrumentação obtida no projeto poder ser utilizada para realizar a medição das curvas de magnetização, como o projeto trata-se de algo extremamente sensível, detalhes de qualidade fazem toda a diferença.

Assim, sugere-se a compra de um laser profissional, primeiramente, com alta colimação e dispersão espacial praticamente nula. O diâmetro do feixe deve ser o menor possível, devendo-se fazer um balanço entre um feixe milimétrico e micrométrico, uma vez que um feixe micrométrico pode ser mais adequado ao sistema, porém mais difícil de ser visualizado, inclusive porque o sensor absorve boa parte do feixe, tornando difícil visualizar em que posição da sua superfície o laser está incidindo. Pode-se também utilizar um laser de alta potência para melhorar a relação sinal/ruído, porém lasers de alta potência exigem muito cuidado e deve prioritariamente ser utilizados em laboratórios especializados em óptica.

No quesito posicionamento, como foi mencionado anteriormente, um dos grandes empecilhos do trabalho foi a necessidade de desmontar e montar o equipamento toda vez que se almejava realizar testes de medição. Assim, como sugestão para qualquer trabalho que utilize um sistema óptico, montar de forma fixa os equipamentos necessários, preferencialmente sobre uma mesa óptica. No projeto realizado, essas exigências não haviam condições de serem implantadas, uma vez que não havia espaço físico para tal.

Além da possível ajuda com a obtenção de um laser profissional adequado para experimentos ópticos laboratoriais, a obtenção de um suporte adequado para o sensor de posição também faz-se necessária, visto que o alinhamento do sistema como um todo não se trata apenas do laser, mas também do detector e do espelho.

Novamente, no quesito posicionamento, obteve-se dificuldade ao longo do projeto com a varredura do feixe de laser ao longo da superfície do detector devido à condição de ângulo imposta pelo tamanho das bobinas e da mesa que sustenta o AGFM. O problema foi contornado utilizando o detector como um

sensor de intensidade. A fenda utilizada consistiu num simples pedaço de fita, que serviu ao propósito, porém, pode-se também tentar obter fenda mais qualificada, ou mesmo alterar a maneira de atingir diferentes intensidades chegando ao sensor numa posição fixa. Uma possível solução seria o posicionamento de um suporte com uma fibra óptica após a reflexão do laser pelo espelho, sendo o feixe refletido direcionado inteiramente para dentro da fibra óptica (que deve ter diâmetro levemente maior que o diâmetro do feixe), e o feixe seria transmitido pela outra extremidade da fibra óptica para o detector. Assim, com o feixe centralizado na fibra, a saída para o sensor seria exatamente o feixe inteiro, com toda sua intensidade. Já nas posições máximas da amplitude de oscilação da haste, o feixe não estaria centralizado com o centro da fibra óptica, o que geraria reflexões internas, causando uma diminuição na intensidade do feixe transmitido para o sensor. Assim, apesar do PSD possuir sensibilidade também em termos de intensidade, pode-se utilizar um detector alternativo específico para diferenças na intensidade, como o sensor fotoelétrico. Existem sensores fotoelétricos com precisão de até mesmo 1 fóton, o que estaria até mesmo bem além da precisão requerida no experimento.

Em relação ao espelho utilizado, a única sugestão a ser fornecida é a de fixar permanentemente o espelho à haste, na região mais próxima da extremidade da haste possível, pois, levando em consideração que a amostra está posicionada em uma das extremidades da haste, a vibração da haste terá maior amplitude nas extremidades e apresentará um nó no centro de massa. Com o espelho sendo fixado através da pasta siliconada, em toda medição era necessário o ajuste da posição do espelho e de sua angulação, buscando ficar perpendicular à direção de oscilação da haste. Esse é um contratempo relativamente pequeno, porém fica a sugestão de uma possível melhoria em termos de condições operacionais.

10.Referências:

- [1] <http://www.if.ufrgs.br/pes/lam/>
- [2] Caracterização de filme finos de cobalto eletrodepositados sobre grafeno, Vinícius Cappellano de Franco, UFRGS, Julho de 2013, página 48.
- [3] Estudo do *Exchange Bias* em filmes de IrMn/Al₂O₃/Co e IrMn/Cr/Co, Sabrina Nicolodi de Oliveira Viegas, Abril de 2011, páginas 26, 27.
- [4] Materiais e Dispositivos Eletrônicos, Sérgio Resende, Editora Livraria da Física, Capítulo 9.
- [5] <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/969-transdutores-piezoeltricos>
- [6] <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt/article/view/43/48>
- [7] <http://www.jmst.org/fileup/PDF/2000097.pdf>
- [8] *Anion effect in Co/Au (111) electrodeposition: structure and magnetic behavior*, L. Cagnon, A. Gundel, T. Devolder, A. Morrone, C. Chappert, J.E. Schmidt, p. Allongue, 2000.
- [9] Magnetic Force microscopy investigation of arrays of nickel nanowires and nanotubes, M. R. Tabasum, F. Zighem, J. De La Torres Medina, A. Encinas, L. Piraux, B. Nysten, 2014.
- [10] <http://www.piezo.com/tech2intropiezotrans.html>
- [11] http://www.custom-cal.com/ModelInfo.aspx?kn=19595&m=STANFORD%20RESEARCH_SR830&sr=Calibration&AspxAutoDetectCookieSupport=1
- [12] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Alum%C3%ADnio>
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>
- [14] Desenvolvimento e Otimização de um Fotodetector de Silício Bidimensional Sensível à Posição, Ricardo Cunha Gonçalves da Silva, 2004, páginas 83,84
- [15] <http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/campo-magnetico--dominios-e-desmagnetizacao-materiais-ferromagneticos-paramagneticos-e-diamagneticos.htm>