

# **SISTEMA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS B vs. H EM MATERIAIS SUPERCONDUTORES**

Carlos Eduardo da Rocha Cardoso

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

RUBENS DE ANDRADE JUNIOR, D.Sc.  
(ORIENTADOR)

---

GUILHERME GONÇALVES SOTELO, D.Sc.  
(CO-ORIENTADOR)

---

ANTONIO LOPES DE SOUZA, Ph.D.

---

SERGIO SAMI HAZAN, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.  
AGOSTO DE 2009

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, porque sempre esteve ao meu lado em todo o meu percurso. Mesmo que em algum momento eu não tenha lembrado de pedir ajuda, Ele com certeza ajudou e nunca pediu nada em troca. Obrigado Senhor.

Agradeço aos meus pais e familiares pelos conselhos e pelas oportunidades oferecidas, amparo e carinho proporcionado ao longo de minha vida. Obrigado por proverem também grande tranquilidade para eu me focar apenas nos meus estudos, sempre tendo dado apoio constante em todos os momentos.

Agradeço a Sara Rodriguez, por toda dedicação, companheirismo, atenção e paciência nos momentos mais estressantes desta jornada, com quem pude dividir minhas tristezas e decepções, alegrias e conquistas durante minha formação.

Agradeço aos meus orientadores Rubens de Andrade Jr. e Guilherme Sotelo, por estarem sempre presentes em tudo o que eu precisei, não só na vida acadêmica, mas em conselhos pessoais. Obrigado, não só pela orientação acadêmica, mas também pela amizade que foi formada. Sem eles, em especial ao Sotelo, talvez este projeto não teria sido concluído.

Agradeço a todos os meus amigos por toda a colaboração, apoio e cooperação durante toda minha caminhada na universidade, o nome de vocês estará para sempre em minha vida, obrigado a todos vocês.

Agradeço ao LASUP e ao CNPq por toda a estrutura disponibilizada para a realização de meu projeto de graduação e por todo o aprendizado durante o projeto.

Por fim agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que sempre estiveram à disposição para qualquer tipo de esclarecimento, e contribuíram bastante em minha formação.

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo utilizar um sistema de medidas para a obtenção de curvas  $B$  vs.  $H$  em blocos supercondutores. Estas curvas serão utilizadas futuramente para análise das propriedades magnéticas dos materiais supercondutores.

O sistema de medidas consiste basicamente de um eletromagneto, que é responsável pela produção de campo magnético, e as medições de fluxo magnético. Entre as faces polares do eletromagneto utiliza-se uma ponta de prova de efeito Hall e uma bobina, e assim, por intermédio de circuitos condicionadores de sinais e de uma placa de aquisição de dados são obtidos os dados necessários para traçar as curvas  $B$  vs.  $H$ .

Serão apresentados durante este trabalho todos os equipamentos utilizados, com uma breve explicação do funcionamento de cada um deles, além de uma explicação do funcionamento do sistema como um todo.

Este trabalho detalha os principais problemas enfrentados ao longo do projeto na busca de curvas  $B$  vs.  $H$  o mais próximo possível dos valores encontrados na literatura, e todas as tentativas feitas para localizar a causa dos problemas e possíveis soluções.

Serão apresentados alguns resultados conforme as alterações feitas no sistema de medidas, com a finalidade de corrigir os erros existentes neste sistema. Ao final, também serão mostrados os resultados que foram obtidos sem os problemas anteriores, apresentando maior exatidão.

# Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	3
2.1) Supercondutividade .....	3
2.1.1) Temperatura Crítica .....	3
2.1.2) Campo Magnético Crítico e Efeito Meissner .....	5
2.1.3) Supercondutores do Tipo I e do Tipo II.....	6
2.1.4) A rede de Abrikosov .....	7
2.2) Lei de Faraday .....	8
Capítulo 3 – Apresentação do sistema de medidas e seus equipamentos.....	11
3.1) Equipamentos Utilizados no sistema .....	11
3.1.1) Placa para aquisição de dados .....	12
3.1.2) Eletromagneto (modelo EM4-HV LakeShore).....	13
3.1.3) Fonte de corrente (modelo 662, LakeShore) .....	13
3.1.4) Sistema de arrefecimento (Thermo Neslab, série Merlin M-75).....	15
3.1.5) Fontes de tensão.....	16
3.1.6) Sensor Hall CYSJ .....	17
3.1.7) Bobinas sensoras de tensão induzida .....	18
3.1.8) Blocos Supercondutores .....	19
3.2) Princípio de funcionamento do sistema .....	20
3.2.1) Circuito condicionador de sinais .....	20
3.2.2) Funcionamento do sistema.....	24
Capítulo 4 – Melhorias no Sistema e Resultados.....	28
4.1) Eliminação do ruído .....	28
4.2) Eliminação do offset.....	36
Capítulo 5 - Conclusões .....	45
Bibliografia .....	47
Anexos.....	49

## Índice de Figuras

Figura 1 - Representação gráfica da variação da resistência elétrica de uma amostra de mercúrio em função da temperatura [2].	3
Figura 2 - Temperatura crítica versus ano da descoberta para vários materiais supercondutores [2].	5
Figura 3 - Diferença do Comportamento entre um Condutor Perfeito e um Supercondutor [4].	6
Figura 4 - Diagramas campo magnético vs. temperatura para supercondutores A) do tipo I e B) do tipo II. As escalas em A) e B) não são idênticas [5].	7
Figura 5 - Ilustração dos vórtices em materiais supercondutores, em escala ampliada.	8
Figura 6 - Equipamentos utilizados no sistema.	11
Figura 7 - Foto ilustrativa da Placa de aquisição de dados PCI-1711 e seus acessórios.	12
Figura 8 - Foto do eletromagneto modelo EM4-HV LakeShore.	13
Figura 9 - Foto da fonte de corrente LakeShore, modelo 662.	14
Figura 10 - Foto do painel frontal da fonte de corrente, destacando a chave seletora Local/Remote.	14
Figura 11 - Foto do sistema de arrefecimento, Thermo Neslab, série Merlin M-75	15
Figura 12 - Foto da fonte digital ICEL, modelo PS-6100.	16
Figura 13 - Foto da fonte regulada simples ICEL, modelo PS-4000.	17
Figura 14 - Foto do conjunto sensor Hall, dois pares de fios trançados e um suporte para fixação perpendicular aos pólos do eletromagneto.	17
Figura 15 - Foto do sensor Hall ampliada.	18
Figura 16 - A) Foto da Bobina 1, utilizada sem material magnético em seu interior. B) Foto da Bobina 2, utilizada com materiais supercondutores.	19
Figura 17 - Foto do bloco supercondutor, comparando-o com uma tampa de caneta "BIC".	19
Figura 18 - Foto do circuito condicionador de sinais.	20
Figura 19 - Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais [7]. Destacados em verde os blocos de condicionamento e alimentação do sensor Hall.	21
Figura 20 - Ilustração do circuito para alimentação do sensor Hall.	22
Figura 21 - Ilustração do circuito utilizado para condicionamento do sinal de controle de corrente.	23
Figura 22 - Diagrama interno do amplificador operacional de instrumentação INA111.	24

Figura 23 - Configuração do sistema de medidas. ....	25
Figura 24 - Bloco responsável pela geração do sinal para controle de corrente. ....	25
Figura 25 - Bloco responsável pela aquisição do sinal do sensor Hall CYSJ. ....	26
Figura 26 - Bloco responsável pela aquisição da tensão induzida na bobina sensora. ....	27
Figura 27 - Curva do campo magnético para $\pm 50A$ , sem material no entreferro, com gap de 25,4 mm. ....	29
Figura 28 - Curvas para $\pm 70A$ , sem material no entreferro, com gap de 25,4 mm. ....	30
Figura 29 - Curvas de indução magnética, $\pm 50A$ , gap de 46 mm. ....	31
Figura 30 - Curva de tensão induzida na Bobina 1, $\pm 50A$ , gap de 46 mm. ....	32
Figura 31 - Curvas de indução magnética com material supercondutor, $\pm 30A$ , gap de 46 mm. ....	33
Figura 32 - Terminal do cabo BNC ligado a fonte de corrente. ....	34
Figura 33 - Curva $B_m$ vs. $H$ , Bobina 1, $\pm 70A$ , gap de 46 mm, 1 ciclo e $1/4$ . ....	35
Figura 34 - Curva $B_m$ vs. $H$ , Bobina 2, supercondutor C1, $\pm 70A$ , gap de 44 mm, 1 ciclo e $1/4$ . ....	36
Figura 35 - Curva $B_m$ vs. $H$ , Bobina 1, Ar, $\pm 40A$ , gap de 23.6 mm, 2 ciclos e $1/4$ . ....	37
Figura 36 - Curva $B_m$ vs. $H$ , Bobina 2, supercondutor C5, $\pm 50A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos. ....	38
Figura 37 - Curva de indução magnética, Bobina 1, ar, $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos. ....	39
Figura 38 - Janela do <i>cftool</i> onde se cria a equação que será utilizada para ajuste de uma função. .	40
Figura 39 - Ajuste da curva de indução magnética, Bobina 1, ar, $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos, <i>cftool</i> com "w" e "a" ajustados. ....	40
Figura 40 - Curvas $B_m$ vs. $H$ , com linearização e sem linearização, Bobina 1, ar, $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos. ....	41
Figura 41 - Curva $B_m$ vs. $H$ , Bobina 1, Ar, $\pm 60A$ , gap de 23.6 mm, 10 ciclos. ....	42
Figura 42 - Curvas $B_m$ vs. $H$ , Bobina 2, $\pm 40A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos. A) Bloco supercondutor C2; B) Bloco supercondutor C10. ....	43
Figura 43 - Curvas $B_m$ vs. $H$ comparando os dois blocos supercondutores C2 e C10, Bobina 2, $\pm 40A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos. ....	43
Figura 44 - Curvas $B_m$ vs. $H$ comparando os dois blocos supercondutores C2 e C10, Bobina 2, $\pm 70A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos. ....	44

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 - Características das Bobinas utilizadas no projeto. ....	18
Tabela 2 - Características físicas e elétricas do fio utilizado na construção das bobinas. ....	19

## Capítulo 1 – Introdução

A caracterização dos materiais elétricos e magnéticos é uma das primeiras etapas a ser realizada antes de sua utilização prática. Para tal caracterização, uma ferramenta normalmente utilizada são as curvas  $B$  vs.  $H$ , que auxiliam na análise das características magnéticas destes materiais.

Com a produção de blocos supercondutores de alta temperatura crítica, tornou-se viável a construção de mancais magnéticos supercondutores porque estes podem ser resfriados com nitrogênio líquido. Um dos objetivos principais do LASUP é o desenvolvimento de tais mancais magnéticos supercondutores, que por sua vez é feito com o auxílio de simulações numéricas. Para realimentação das simulações numéricas, é necessário o uso de dados de densidade de corrente crítica ( $J_C$ ) e magnetização nestas amostras supercondutoras.

Visto tal importância da caracterização de materiais magnéticos, em especial os blocos supercondutores, e da grande utilização das curvas citadas, o projeto teve por objetivo a obtenção de curvas  $B$  vs.  $H$  de blocos supercondutores de YBCO ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ), através de um sistema automático de medidas, já existente no LASUP (laboratório de aplicação de supercondutores) da UFRJ.

Com o início dos testes, verificou-se que o sistema existente apresentava alguns problemas que impossibilitava a obtenção de curvas  $B$  vs.  $H$  corretamente. Portanto, grande parte do projeto foi dedicada a encontrar as causas destes problemas, e assim realizar os reparos necessários para a obtenção de melhores resultados para os blocos supercondutores.

O sistema de medidas utiliza uma placa de aquisição de dados Advantech 1711 obtendo de forma automatizada e em tempo real os dados produzidos pelo sistema de medidas, que são necessárias para a obtenção das curvas de magnetização e posterior cálculo da Magnetização e  $J_C$ .

A estrutura do trabalho está dividida da seguinte forma:

No **capítulo 2** serão explicados de forma sucinta os fundamentos teóricos e o conceito de supercondutividade.



No **capítulo 3** serão apresentados os equipamentos, detalhando cada um deles quanto ao funcionamento e função deles no sistema, além do detalhamento do princípio de funcionamento do sistema como um todo.

No **capítulo 4** serão explicadas todas as alterações feitas ao sistema que havia anteriormente no LASUP, explicando de forma clara como foi possível encontrar e solucionar os problemas existentes. Serão apresentados também os resultados anteriores e os resultados obtidos conforme as mudanças que foram executadas.

No **capítulo 5** serão apresentadas as conclusões do trabalho, baseadas tanto nos resultados mostrados ao longo do capítulo 4, como nas alterações realizadas.

## Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

Este capítulo apresenta a revisão de alguns conceitos importantes sobre teoria eletromagnética. Dentre estes conceitos, pode-se citar definições de campo magnético, indução magnética e circuito magnético.

Além destes conceitos, é apresentado um breve resumo histórico sobre supercondutividade e suas propriedades mais importantes associadas a este trabalho.

### 2.1) Supercondutividade

#### 2.1.1) Temperatura Crítica

O fenômeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes em 1911. Tal observação foi realizada durante um estudo de variação da resistência elétrica de uma amostra de mercúrio em função da temperatura. Onnes observou que houve um súbito desaparecimento de resistência elétrica quando próximo de uma temperatura de 4,2K [1]. A figura abaixo demonstra este efeito observado por Heike Onnes.

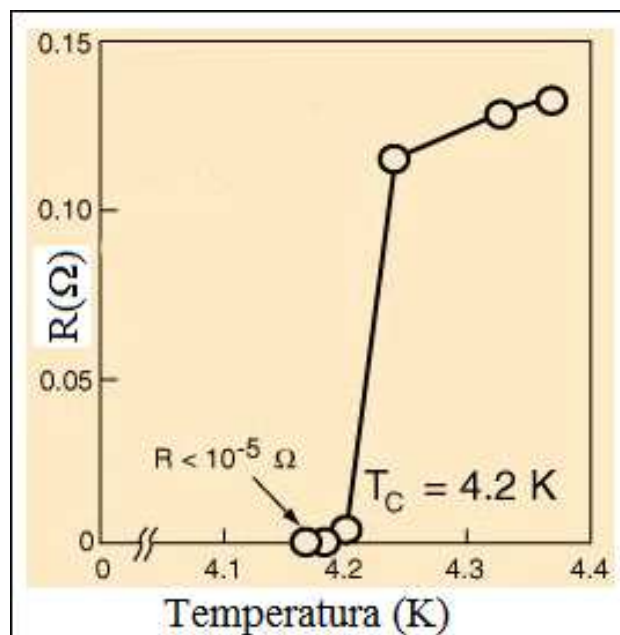


Figura 1 - Representação gráfica da variação da resistência elétrica de uma amostra de mercúrio em função da temperatura [2].

Onnes constatou então que o mercúrio passa de um estado resistivo normal a um novo estado físico, que foi denominado por ele de supercondutor (Prêmio Nobel de Física de 1913). A principal característica deste estado é a resistividade elétrica nula. Após tal observação, Onnes atribuiu a supercondutividade como sendo o desaparecimento total da resistência elétrica de um material, abaixo de uma temperatura crítica ( $T_C$ ) [1].

Após a descoberta do estado supercondutor no mercúrio, Onnes verificou que o estanho e o chumbo também apresentavam o estado supercondutor quando resfriados às temperaturas críticas dos mesmos e com isso comprovou que o estado supercondutor não se apresentava apenas no mercúrio. A partir desta descoberta, iniciou-se a pesquisa de ligas e compostos intermediários que poderiam se tornar supercondutores em temperaturas críticas mais elevadas do que o mercúrio ( $T_C = 4,2\text{K}$ ), estanho ( $T_C = 3,7\text{K}$ ) e chumbo ( $T_C = 7,2\text{K}$ ). Em 1986 foi descoberto um óxido de cobre que se tornava supercondutor em uma temperatura crítica de 35K. Esta descoberta desencadeou uma corrida internacional na busca de supercondutores com uma temperatura crítica cada vez mais elevada.

Em 1987, foi sintetizado o supercondutor YBCO com uma temperatura crítica da ordem de 90K. Esta foi uma grande descoberta, pois a partir dela, iniciou-se a era dos materiais supercondutores que podem ser resfriados com o nitrogênio líquido (temperatura de liquefação em torno de 77K). Com isso as pesquisas de materiais supercondutores e suas aplicações foram impulsionadas, uma vez que o nitrogênio líquido é muito mais barato e abundante que o hélio líquido. Por essa razão as pesquisas com supercondutores se tornaram mais economicamente viáveis e atrativas.

Atualmente o composto cerâmico de mercúrio-cobre é o material supercondutor de maior temperatura crítica. Este composto possui uma temperatura crítica aproximadamente igual a 138K, em pressão de uma atmosfera. A figura 2 mostra uma curva dos materiais supercondutores em função do ano de descobrimento e da temperatura crítica.

Entretanto, H. K. Onnes descobriu que o estado supercondutor não depende apenas de uma determinada temperatura crítica. O material pode sair do estado supercondutor caso sejam ultrapassados certos valores críticos, tais como, o campo magnético ( $H$ ) e a densidade de corrente ( $J$ ). Desta forma, pode-se definir os parâmetros que caracterizam o estado supercondutor como a temperatura crítica ( $T_C$ ), o campo magnético crítico ( $H_C$ ) e a densidade de corrente crítica ( $J_C$ ) [3].

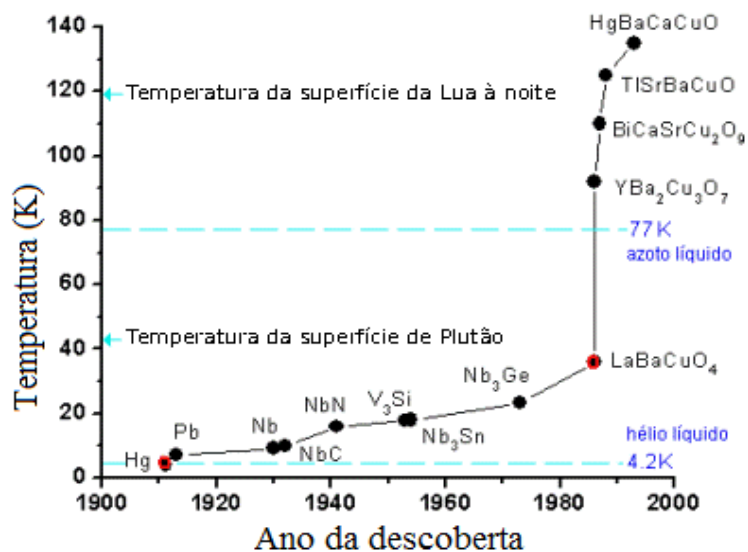


Figura 2 - Temperatura crítica versus ano da descoberta para vários materiais supercondutores [2].

### 2.1.2) Campo Magnético Crítico e Efeito Meissner

Em 1933 Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram outra importante propriedade de um material no estado supercondutor: o diamagnetismo perfeito. Eles descobriram que um campo magnético externo aplicado em um material no estado supercondutor é expelido de seu interior, desde que este campo magnético fosse inferior a  $H_C$ . Essa propriedade passou a ser chamada de Efeito Meissner.

A figura 3 retrata a comparação da expulsão do campo magnético no material supercondutor e no condutor ideal. Os materiais se encontram primeiramente em seu estado normal submetido à aplicação de um campo magnético externo, onde as linhas de fluxo magnético penetram em seu corpo. O condutor ideal permanece com o mesmo perfil de campo após a transição. O material supercondutor expulsa o campo magnético devido ao efeito diamagnético [4]. Este processo é reversível, pois, se aquecermos o supercondutor acima da temperatura crítica, as linhas de fluxo magnético voltam a atravessar o metal. O efeito Meissner pode ser explicado com base nas correntes elétricas de blindagem, que são induzidos na presença de um campo magnético externo ao supercondutor. No condutor normal, estas correntes aparecem apenas quando há variação de fluxo magnético. Quando a temperatura do supercondutor desce abaixo da temperatura crítica ( $T_C$ ), são geradas

supercorrentes persistentes que produzem um campo magnético tal que o campo externo é anulado no interior do material.

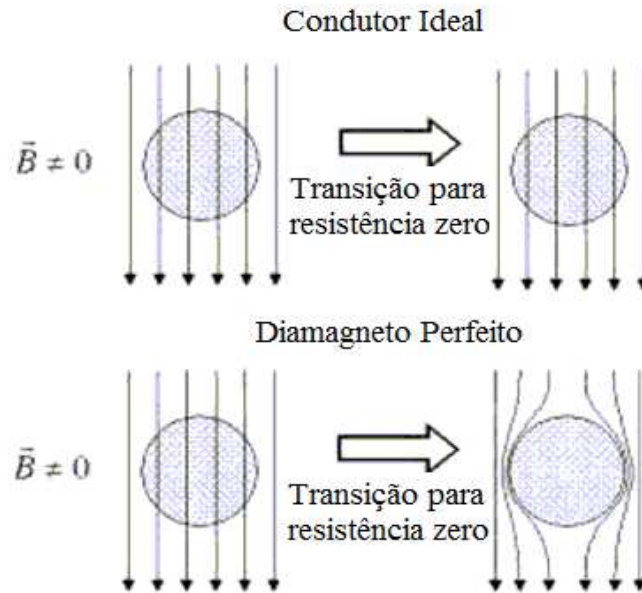


Figura 3 - Diferença do Comportamento entre um Condutor Perfeito e um Supercondutor [4].

### 2.1.3) Supercondutores do Tipo I e do Tipo II

É possível observar o efeito Meissner em todos os supercondutores somente se o campo magnético aplicado for suficientemente fraco. Entretanto, a aplicação de campos magnéticos de diferentes magnitudes produz respostas distintas em alguns materiais supercondutores. Este fato levou à classificação dos supercondutores em dois tipos: tipo I e tipo II.

Quanto à aplicação de campo magnético externo, os supercondutores do tipo I apresentam apenas dois estados, estado supercondutor e estado normal. Depois de resfriado, o material se mantém no estado supercondutor enquanto não for aplicado um campo magnético superior ao campo magnético crítico ( $H_C$ ) do material (não há penetração de fluxo magnético), caso isto ocorra, o material passará ao estado normal.

Já os supercondutores do tipo II apresentam além dos estados citados acima, um estado misto, em que o campo magnético penetra parcialmente no interior do material. Os supercondutores do tipo II são caracterizados pela presença de dois campos magnéticos críticos ( $H_{C1}$  e  $H_{C2}$ ). Enquanto o campo magnético aplicado é menor que  $H_{C1}$  o material se

mantém no estado supercondutor. Quando o campo magnético aplicado é maior que o campo crítico  $H_{C1}$ , o fluxo magnético penetra parcialmente na amostra e esta passa para o estado misto (embora a supercondutividade se mantenha). Aumentando o campo magnético aplicado até romper o campo crítico  $H_{C2}$ , o material passará do estado misto ao estado normal, permitindo assim a completa penetração do fluxo magnético e a completa perda da supercondutividade [3].

O valor de  $H_{C2}$  pode ser muitas vezes maior que o valor de  $H_{C1}$ . Os supercondutores do tipo II possuem maior utilidade tecnológica comparados aos supercondutores do tipo I, visto que o valor de  $H_C$  é muito pequeno comparado ao valor de  $H_{C2}$ .

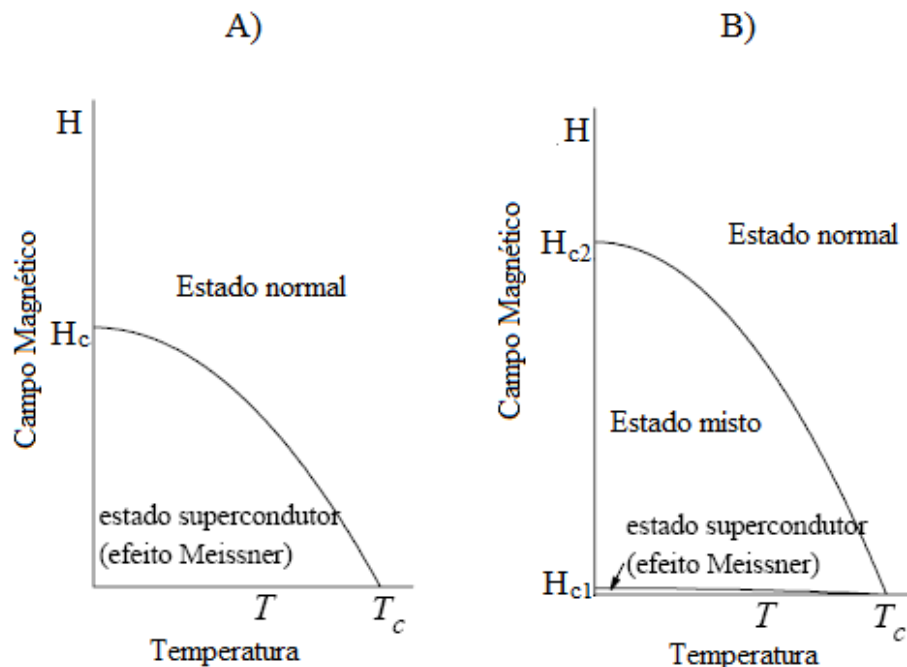


Figura 4 - Diagramas campo magnético vs. temperatura para supercondutores A) do tipo I e B) do tipo II. As escalas em A) e B) não são idênticas [5].

#### 2.1.4) A rede de Abrikosov

Os supercondutores do tipo II, quando no estado misto, apresentam regiões normais por onde o fluxo magnético penetra no material, sob a forma de tubos de fluxo magnético (ou fluxóides), e que são paralelos a intensidade de campo externo aplicado  $H$ . O diâmetro de cada cilindro é muito pequeno, com valores entre 10nm e 100nm, além da supercondutividade ser suprimida nesta região. Ao redor destes fluxóides, também

conhecidos como “vórtices”, circulam supercorrentes que blindam o campo magnético em pontos afastados do eixo do vórtice [1].

Uma característica destes vórtices é que cada um deles é atravessado por um fluxo magnético quantizado. Eles interagem repulsivamente entre si, formando uma rede com simetria hexagonal, sendo normalmente a configuração mais estável.

Em 2003, o físico russo Alexei A. Abrikosov ganhou o Prêmio Nobel de Física por sua teoria sobre a penetração de fluxo magnético em um supercondutor do tipo II através de um arranjo periódico de vórtices, teoria esta, proposta em 1957. Esta rede de vórtices (fluxóides) recebeu o nome de Rede de Abrikosov, em homenagem a teoria proposta por ele.

Vale ressaltar que a distância entre os vórtices na rede está diretamente ligada a intensidade do campo magnético aplicado, ou seja, quanto maior  $H$ , maior o número de vórtices. Se houver um aumento de  $H$ , tal que os fluxóides acabem se sobrepondo, então tal valor de  $H$  será definido como  $H_{C2}$ , onde o supercondutor sofre transição do estado misto para o estado normal [3].

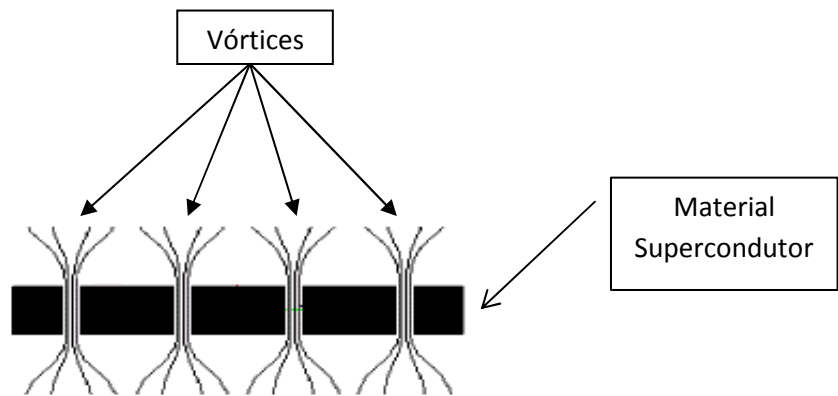


Figura 5 - Ilustração dos vórtices em materiais supercondutores, em escala ampliada.

## 2.2) Lei de Faraday

Um conceito muito importante para o presente trabalho é o conceito de indução magnética. A variação da taxa de fluxo concatenado em uma bobina induz nos terminais da mesma uma força eletromotriz. Este fenômeno é descrito como indução eletromagnética e foi observado por Faraday e Lenz [6].

A lei de Faraday-Lenz enuncia que a força eletromotriz (f.e.m.) induzida num circuito elétrico, é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético concatenado ( $\lambda$ ) e a direção desta f.e.m. induzida tende a se opor à variação deste fluxo, o que explica o uso do sinal negativo [6]. A equação que define essa lei é:

$$e = -d\lambda/dt. \quad (1)$$

Se for considerado que todo o fluxo magnético enlaçado por todas as espiras da bobina, tem-se que:

$$\lambda = N\varphi, \quad (2)$$

onde  $N$  é o número de espiras da bobina e  $\varphi$  é o fluxo magnético.

Sabe-se que a f.e.m. produzida nos terminais da bobina pode ser medida, visto que é consequência da variação de fluxo concatenado que atravessa a bobina. Portanto, integrando estes valores, encontram-se os valores de indução magnética.

Como,

$$\varphi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}, \quad (3)$$

onde  $B$  é a indução magnética e  $ds$  é o elemento infinitesimal de área.

Caso não haja variação da área que corresponde à seção da bobina, caso este que inclui o presente trabalho, a equação anterior reduz-se para:

$$\varphi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}. \quad (4)$$

Substituindo-se a equação (4) em (1) e (2), para  $\mathbf{B}$  perpendicular a área, tem-se:

$$\begin{aligned} e &= -N d\varphi/dt = -N d(\mathbf{B}\mathbf{S})/dt = -NS dB/dt \\ dB/dt &= -e/NS \end{aligned} \quad (5)$$

Integrando-se a equação anterior dos dois lados e sabendo-se que  $N$  e  $S$  não variam com o tempo, obtêm-se:

$$\int_0^{B_m} dB = -(1/NS) \int_0^t e dt$$



Onde finalmente, tem-se,

(6)

$$B_m = -(1/NS) \int_0^t e dt$$

O resultado da equação acima é a indução magnética média ( $B_m$ ). Indução essa, obtida indiretamente a partir da medição da f.e.m. em uma bobina com N espiras submetidas a um campo variável. Esta equação será de grande importância para o presente trabalho. Para a integração desta tensão será utilizado um bloco integrador no arquivo que foi feito no Simulink.

## Capítulo 3 – Apresentação do sistema de medidas e seus equipamentos

Este capítulo apresenta o sistema de medidas usado para a obtenção das curvas de magnetização em supercondutores. Este sistema foi implementado em projetos anteriores [7]. Além dos equipamentos utilizados, serão apresentados também os procedimentos de montagem, o seu funcionamento e as ligações feitas para utilização do mesmo. Algumas mudanças foram feitas no sistema para melhorar o funcionamento do mesmo, porém tais mudanças serão vistas no capítulo 4.

### 3.1) Equipamentos Utilizados no sistema

A figura 6 é uma fotografia dos equipamentos envolvidos neste trabalho.

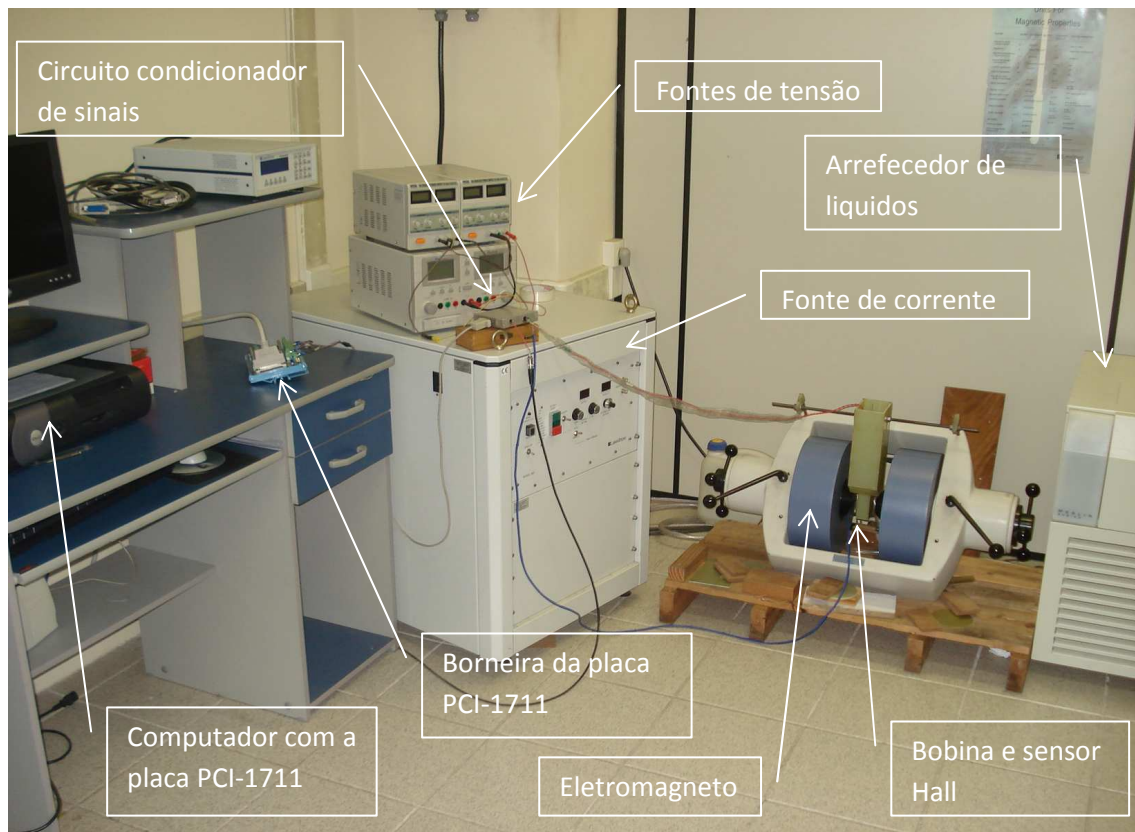


Figura 6 - Equipamentos utilizados no sistema.

### 3.1.1) Placa para aquisição de dados

O sistema possui uma placa de aquisição de dados Advantech PCI-1711 [8], cuja finalidade é gerar tensões de formatos variados utilizando as saídas analógicas e adquirir os dados de tensão induzida da bobina através de uma entrada analógica. Esta placa pode ser controlada em tempo real (real time) através do programa fornecido pelo fabricante (Advantech DLL Driver). Além das funções explicitadas acima, a placa PCI-1711 apresenta outras funcionalidades que não foram utilizados no presente trabalho.

A placa possui 16 canais para entrada analógica, com resolução de 12 bits, máxima taxa de amostras de 0,1 MS/s e amplitude de entrada com valores de  $\pm 10V$ ,  $\pm 5V$ ,  $\pm 2,5V$ ,  $\pm 1,25V$  e  $\pm 0,625V$ , para máxima resolução. A saída analógica é obtida em dois canais, com resolução de 12 bits e saída de referência interna de 0-5V e 0-10V.

O programa utilizado para interfacear a placa de aquisição foi o Simulink, que utiliza uma programação em diagrama de blocos para implementação do sistema. Na seção 3.2.2 serão explicados os diagramas de blocos utilizados no sistema.

Para o funcionamento da placa PCI-1711 são necessários outros dois componentes: o cabo PCL-10168 e a placa terminal PCLD-8710. O cabo possui fios de sinais internos com par trançado com o intuito de reduzir ao máximo a interferência de ruídos no sistema. A placa terminal possui uma borneira com 68 conectores para fixação dos fios que conduzem os sinais. Os procedimentos básicos de instalação e configuração desta placa podem ser entendidos com mais detalhes em R. N. Calvo [9].

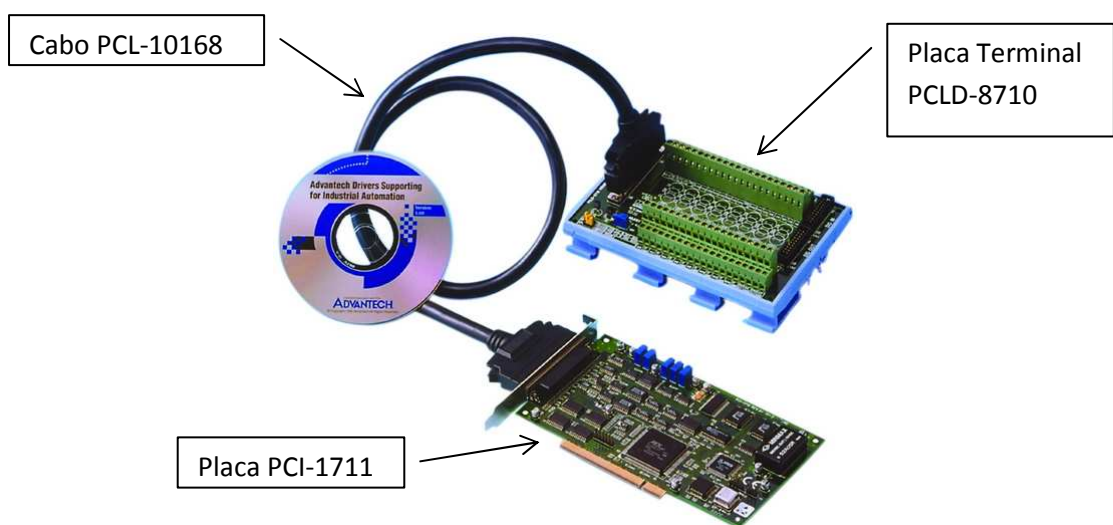


Figura 7 - Foto ilustrativa da Placa de aquisição de dados PCI-1711 e seus acessórios.

### 3.1.2) Eletromagneto (modelo EM4-HV LakeShore)

O eletromagneto utilizado neste trabalho é mostrado na figura 8.

Este equipamento tem por finalidade produzir um campo magnético proporcional à entrada de corrente em suas bobinas. Seus pólos possuem ajuste manual, possibilitando com isso a variação do campo magnético em função do entreferro desejado.

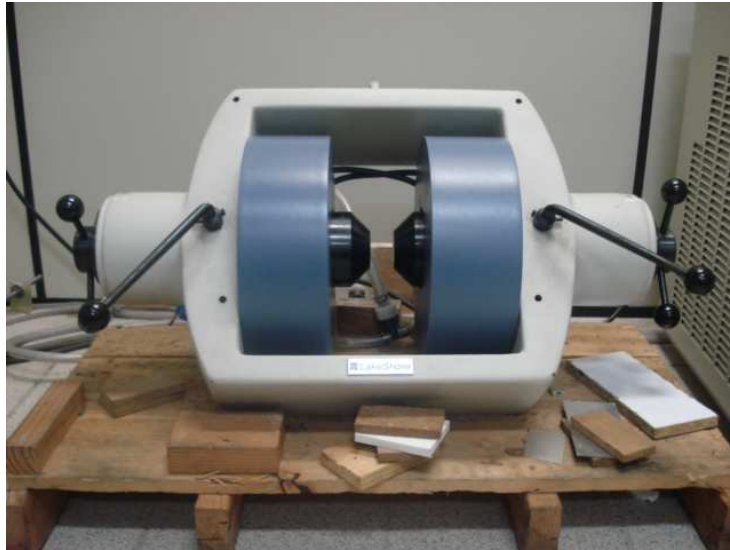


Figura 8 - Foto do eletromagneto modelo EM4-HV LakeShore.

As bobinas presentes nos pólos produzem uma força magnetomotriz, resultante da corrente elétrica que flui pelo mesmo. Essa f.m.m. produz um fluxo magnético que quando varia no tempo, gera uma indução eletromagnética na bobina sensora situada no entreferro do eletromagneto. O eletromagneto permite um gap máximo de 10,2cm e possui corrente de operação de  $\pm 70A$  e tensão de operação de  $\pm 35V$  [10].

Uma fonte de corrente, que será explicada adiante, é responsável por injetar a corrente no eletromagneto. Devido a esta corrente de até 70A, o eletromagneto poderia apresentar um sobreaquecimento. Por esse motivo foi necessário um sistema de arrefecimento para o perfeito funcionamento do eletromagneto. Tal sistema de arrefecimento, também chamado de Chiller, será apresentado mais a frente.

### 3.1.3) Fonte de corrente (modelo 662, LakeShore)

Para o funcionamento e controle do campo magnético produzido pelo eletromagneto, utiliza-se uma fonte de corrente analógica que produz uma corrente elétrica estável, que

varia entre  $\pm 70A$ . Assim como o eletromagneto, a fonte de corrente necessita de um sistema de arrefecimento, pois há uma grande dissipação de calor por efeito Joule em seu circuito. A temperatura de operação da fonte de corrente deve ficar entre  $+11^{\circ}C$  e  $+25^{\circ}C$ , com consumo de potência menor que  $4,5kVA$  [11].

A figura 9 apresenta a fonte de corrente utilizada no sistema de medidas.



Figura 9 - Foto da fonte de corrente LakeShore, modelo 662.

O painel frontal da fonte de corrente possui uma série de funções, como por exemplo, chave de *stand by*, botões de liga e desliga com indicadores luminosos, seletor de polaridade da corrente e leds indicadores de defeitos, avisos e faltas. Uma função muito importante para este sistema, presente no painel frontal, é a chave seletora Local/Remote. Utilizou-se a chave na posição local quando testes eram realizados, assim era possível controlar manualmente a corrente injetada no eletromagneto. Para realizações das medidas, a chave seletora estava na posição remote, controlando a corrente por um sinal externo através do Simulink.



Figura 10 - Foto do painel frontal da fonte de corrente, destacando a chave seletora Local/Remote.

O controle da fonte de corrente é realizado por um sinal de tensão externo, variante no intervalo de  $\pm 10V$ . A fonte por sua vez, injeta no eletromagneto proporcionalmente a essa variação de tensão, limitada a  $\pm 70A$ . A taxa de variação máxima de corrente elétrica gerada na fonte é de  $10A/s$ . Por esse motivo, o sinal de controle na entrada analógica não pode ter variação superior a  $1,43V/s$ .

### 3.1.4) Sistema de arrefecimento (Thermo Neslab, série Merlin M-75)

Como foi visto anteriormente, dois equipamentos tanto o eletromagneto quanto a fonte de corrente possuem faixas seguras de temperatura para o bom funcionamento dos mesmos, por esse motivo, foi necessário a instalação de um sistema arrefecedor. Foi utilizado então um *Chiller* do fornecedor Thermo Neslab, série Merlin, modelo M-75, que utiliza a água como fluido trocador de calor, através de absorção cíclica [12].

A figura 11 apresenta uma foto do chiller utilizado no sistema.



Figura 11 - Foto do sistema de arrefecimento, Thermo Neslab, série Merlin M-75

A temperatura utilizada no trabalho foi de  $+20^{\circ}C$ . Essa temperatura pode ser controlada por um painel na parte frontal do chiller, onde se encontrava também um manômetro para monitoramento da pressão do fluido.

Caso haja algum problema e a temperatura da água circulante ultrapasse os valores de máximo ou mínimo pré-estabelecidos, o chiller emite continuamente um sinal sonoro até que o problema seja corrigido e a temperatura volte aos limites pré-estabelecidos.

### 3.1.5) Fontes de tensão

O sistema apresentava anteriormente apenas uma fonte de tensão com três fontes independentes no mesmo gabinete [13]. Duas fontes com capacidade de 6A e fornecimento de tensões variantes entre 0-30V, além de uma fonte com capacidade de 3A fornecendo um valor fixo de 5V. Tais fontes têm por finalidade alimentar o circuito condicionador de sinais que será visto na seção 3.2.1. As duas fontes de tensão variante foram ligadas em série para a obtenção de -12V e +12V.

A figura 12 mostra uma foto da fonte digital ICEL PS-6100.



Figura 12 - Foto da fonte digital ICEL, modelo PS-6100.

Ao longo deste trabalho para aumentar a confiabilidade e melhoria dos resultados, uma das primeiras alterações realizadas foi o acréscimo de duas fontes independentes e desacopladas de tensão. Tal alteração foi necessária, pois uma das fontes independentes de tensão variável, não se mostrou confiável, apresentando problemas em seu funcionamento. Com isso, ela se tornou incapaz de fornecer tensão constante ao circuito. Por esse motivo, decidiu-se utilizar três fontes separadas de tensão, ao invés de três fontes em um só gabinete.

Optou-se então pela aquisição de duas fontes de tensão ajustáveis continuamente entre 0 e 30V da marca ICEL, modelo PS-4000 [14]. Esta fonte apresenta corrente de saída variável de acordo com a carga, com valores entre 0 e 3A.



As ligações foram feitas conforme explicado anteriormente. As duas fontes variantes foram ligadas em série, de forma a se obter +12V e -12V. A fonte fixa de +5V também continuou presente nesta nova configuração das fontes. A figura 13 mostra uma foto da nova fonte de tensão que foi adicionada ao sistema.



Figura 13 - Foto da fonte regulada simples ICEL, modelo PS-4000

### 3.1.6) Sensor Hall CYSJ

Neste trabalho foi utilizado uma ponteira Hall para obter uma tensão proporcional à indução magnética. Para o seu funcionamento, é necessário uma alimentação estável com um nível de corrente entre 1mA e 10mA [15]. O sensor é composto de quatro pinos, onde os pinos 1 e 3 recebem a corrente de alimentação e os pinos 2 e 4 devolvem a tensão proporcional à indução magnética. A ponteira construída no laboratório [7] para medida da densidade de fluxo magnético é apresentado na figura 14.

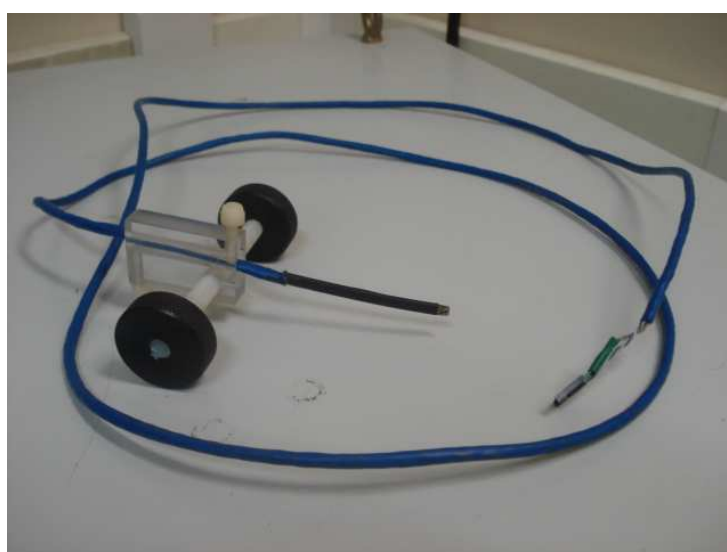


Figura 14 - Foto do conjunto sensor Hall, dois pares de fios trançados e um suporte para fixação perpendicular aos pólos do eletromagneto.



Tal componente foi conectado a um circuito condicionador de sinais que será abordado a seguir, na seção 3.2.1. Para a obtenção de melhores resultados, foi utilizado um cabo de sinais de fios trançados e ele foi fixado perpendicularmente à entrada de campo no entreferro do eletromagneto. A figura 15 é uma foto ampliada do sensor Hall onde é possível notar que seu tamanho não ultrapassa 4 mm.



Figura 15 - Foto do sensor Hall ampliada.

### 3.1.7) Bobinas sensoras de tensão induzida

Neste trabalho foram utilizadas duas bobinas diferentes como sensores de tensão induzida. Todas as bobinas foram feitas no Laboratório de Máquinas da UFRJ. Uma bobina (será usado o termo Bobina 1) foi utilizada para obtenção de curvas magnéticas sem nenhum tipo de material em seu interior, apenas o efeito do ar. A outra bobina (Bobina 2) foi utilizada apenas com materiais supercondutores em seu interior. A tabela 1 resume as características das bobinas citadas e a tabela 2 mostra as características do fio utilizado na fabricação destas bobinas.

	<b>Formato</b>	<b>Número de espiras</b>	<b>Área da seção transversal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Fio magnético esmaltado</b>
<b>Bobina 1</b>	Circular	1000	$8.5789 \times 10^{-4}$	34AWG
<b>Bobina 2</b>	Circular	1000	$9.1863 \times 10^{-4}$	34AWG

Tabela 1 - Características das Bobinas utilizadas no projeto.

	Diâmetro (mm)	Secção (mm <sup>2</sup> )	Peso por Kilômetro (Kg/Km)	Ohms por Km	Corrente máxima (A)
<b>34AWG</b>	0,159	0,0201	0,183	858	0,06

Tabela 2 - Características físicas e elétricas do fio utilizado na construção das bobinas.

A figura 16 apresenta uma foto da Bobina 1 e da Bobina 2.



Figura 16 - A) Foto da Bobina 1, utilizada sem material magnético em seu interior. B) Foto da Bobina 2, utilizada com materiais supercondutores.

### 3.1.8) Blocos Supercondutores

O laboratório possui uma série de blocos supercondutores, dentre eles há 10 blocos supercondutores iguais, de formato circular, com diâmetro de 28 mm e espessura de 10 mm. Tais blocos foram identificados desde C1 a C10.

Neste primeiro momento, serão utilizados apenas seis dos dez blocos citados acima, mais especificamente os blocos C1, C2, C3, C4, C5 e C10. Nas próximas etapas do projeto e trabalhos futuros serão utilizados blocos supercondutores de outros formatos e dimensões.



Figura 17 - Foto do bloco supercondutor, comparando-o com uma tampa de caneta "BIC".

### 3.2) Princípio de funcionamento do sistema

Antes da descrição do funcionamento do sistema, é necessário descrever o equipamento responsável por todo o condicionamento do sinal. Este equipamento, chamado de circuito condicionador de sinais, será explicado sucintamente no tópico a seguir. Para maiores detalhes e informações vide o trabalho de C. L. Marcelino [7].

#### 3.2.1) Circuito condicionador de sinais

O circuito condicionador de sinais foi projetado para desempenhar três funções:

- Ajustar o sinal de controle de corrente gerado na placa de aquisição pela saída analógica;
- Ajustar os sinais de tensão lidos pelos sensores de campo e tensão;
- Gerar corrente para alimentação do sensor Hall CYSJ mencionado no parágrafo anterior.

A figura 18 apresenta o circuito condicionador de sinais construído no laboratório [7].

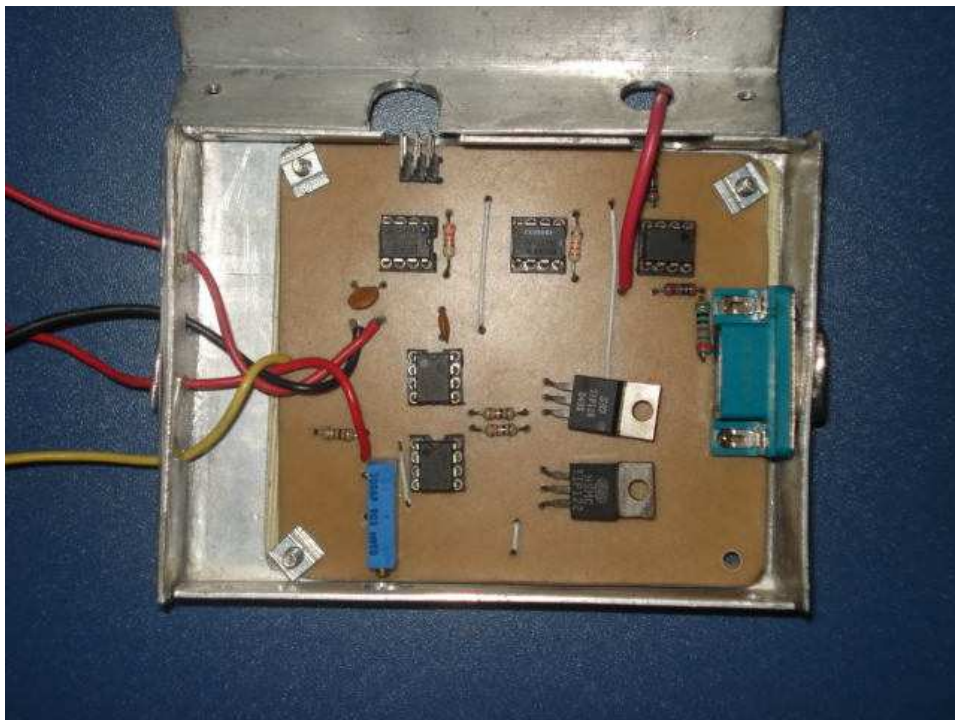


Figura 18 - Foto do circuito condicionador de sinais.

A figura 19 mostra o esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais.

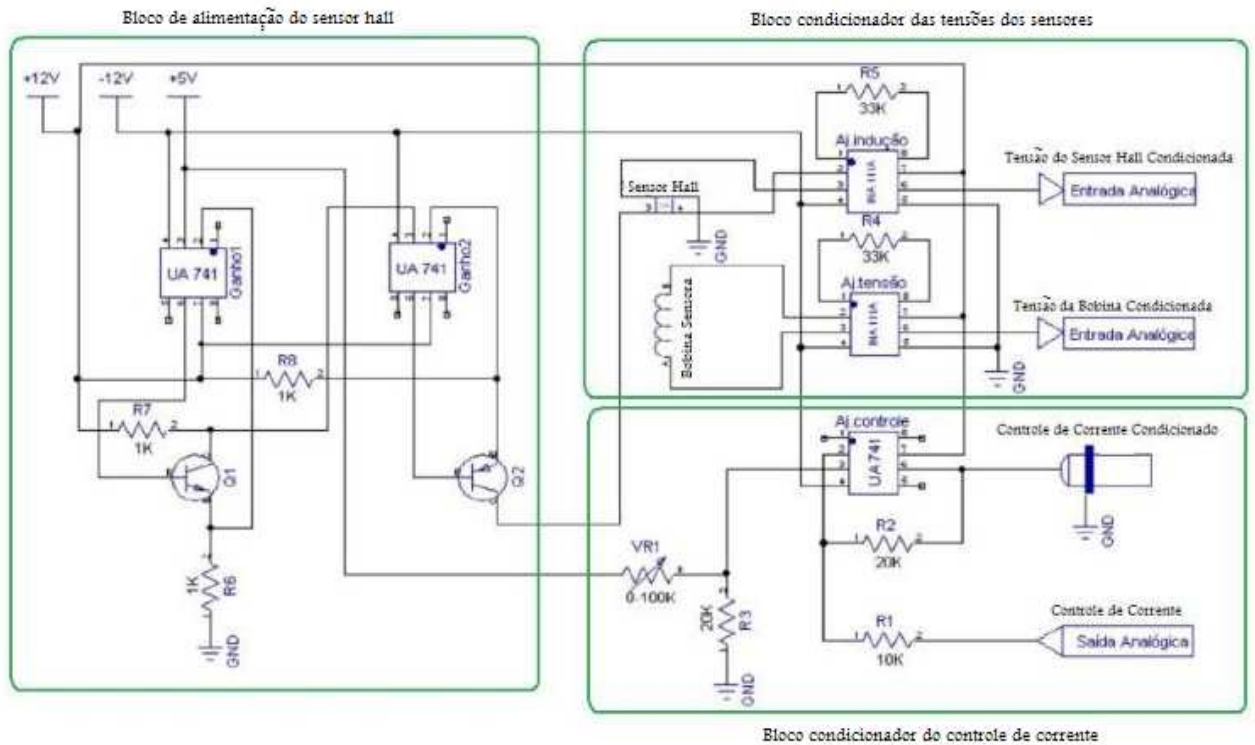


Figura 19 - Esquema eletrônico do circuito condicionador de sinais [7]. Destacados em verde os blocos de condicionamento e alimentação do sensor Hall.

### 3.2.1.1) Bloco para alimentação do sensor Hall CYSJ.

Como visto anteriormente, o sensor Hall CYSJ necessita de uma alimentação com valores bem reduzidos (entre 1mA e 10mA), por isso, foi construído um circuito para gerar uma corrente estável e garantir o correto funcionamento do sensor. Neste circuito foram utilizados dois amplificadores operacionais, dois transistores (TIP 122 NPN, TIP 126 PNP) e três resistores de 1kΩ, com uma entrada de 5V.

Os dois transistores foram utilizados com a finalidade de garantir a estabilidade da corrente que alimenta o sensor. Foram escolhidos resistores de 1kΩ e alimentação de 5V para obter uma corrente de saída de 5mA, visto que a alimentação máxima do sensor é 10mA.

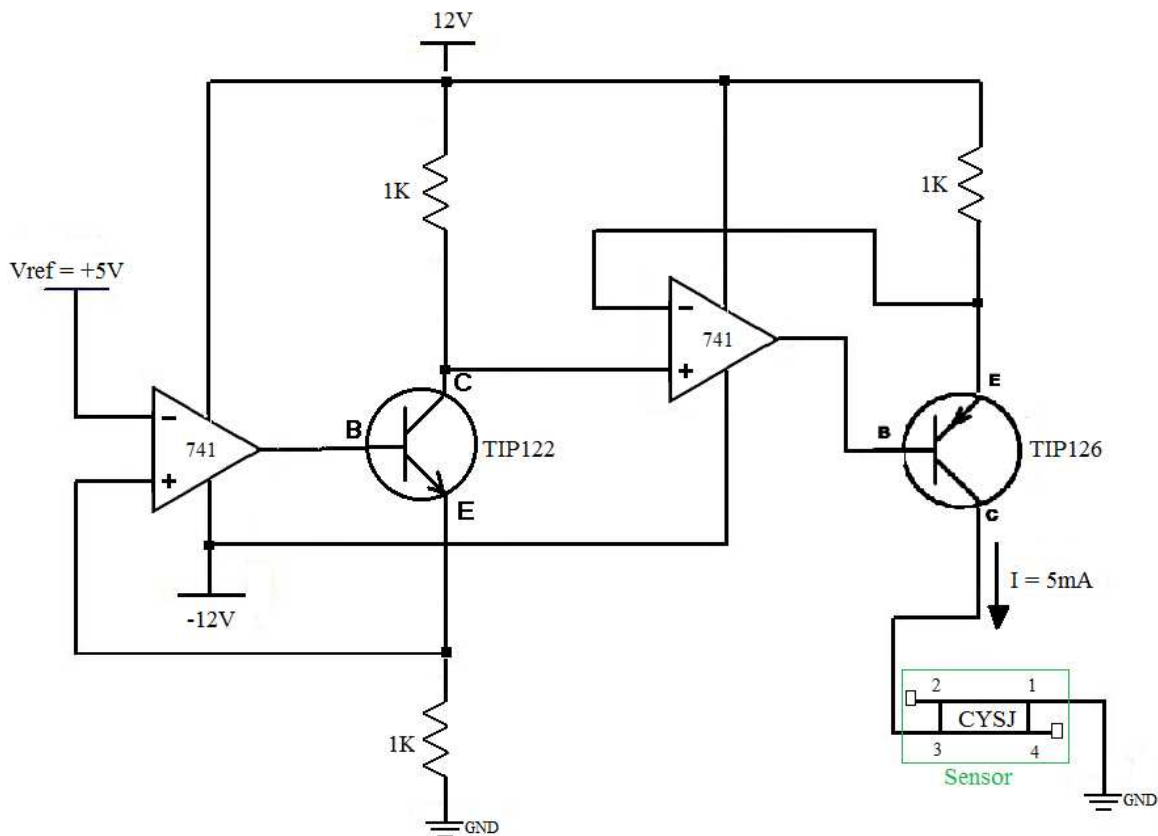


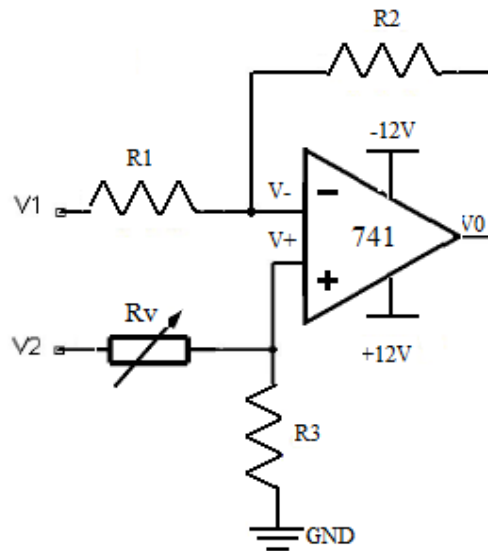
Figura 20 - Ilustração do circuito para alimentação do sensor Hall.

### 3.2.1.2) Bloco de condicionamento de controle de corrente.

No sistema para o controle de corrente adotou-se um sinal triangular que terá amplitude de até  $\pm 10V$ , mas isso seria impossível, visto que, a placa de aquisição de dados utilizada (PCI-1711) gera em seu conversor D-A, apenas sinais entre 0 e 10V. Portanto, foi necessária a construção de um circuito que realizasse o ajuste do sinal gerado pela placa.

O circuito utilizado foi um amplificador operacional com configuração inversora e simultaneamente com um divisor de tensão na entrada não inversora do mesmo. Tal medida foi feita para ajustes de *offset*. Para a realização deste ajuste, utilizou-se um potenciômetro multi-volta de 0 – 100k $\Omega$ , que também faz o ajuste de *offset* da fonte de corrente. O circuito utilizado é ilustrado na figura 21.

Após a realização de algumas considerações e de alguns cálculos matemáticos, foi concluído que para a faixa de tensão requerida, era necessário que R2 fosse igual a R3, com valor de 20k $\Omega$ . R1 foi calculado em 10k $\Omega$ , Rv entre 0 e 100k $\Omega$  e para a entrada V2 foi utilizado 5V.



**Figura 21 - Ilustração do circuito utilizado para condicionamento do sinal de controle de corrente.**

Para obter os valores de V1, sabendo que, estes são os valores que devem aparecer na saída analógica, foi necessário usar uma relação em função da percentagem da corrente desejada, ou seja, foi feita uma transformação linear. A função encontrada está definida abaixo.

$$V1 = 10C + 5 - 5C, \text{ onde } C \text{ é controle de corrente em percentagem.}$$

A função acima não foi reduzida justamente para facilitar a compreensão do diagrama de blocos utilizado no Simulink.

### **3.2.1.3) Bloco condicionador da tensão dos sensores**

Para o condicionamento dos sinais dos sensores (bobina e sensor Hall), foram construídos dois circuitos com um amplificador operacional de instrumentação cada (INA111). O objetivo de seu uso é eliminar qualquer tipo de ruído em modo diferencial que possa ocorrer durante a coleta dos resultados.

O INA111 é composto em seu interior por três amplificadores operacionais e seis resistores (4 resistores de  $10k\Omega$  e dois de  $25k\Omega$ ). O ganho do circuito amplificador é ajustado por um resistor ( $R_g$ ) colocado externamente, de acordo com as necessidades do projeto conforme a expressão abaixo. A figura 22 mostra o diagrama interno do amplificador operacional INA111.

$$G = 1 + (50k/R_g).$$

No presente trabalho, foi escolhido um ganho de tensão em torno de 2,5, para isso foi utilizado um resistor de  $33\text{k}\Omega$ , resultando em um ganho de 2,515.

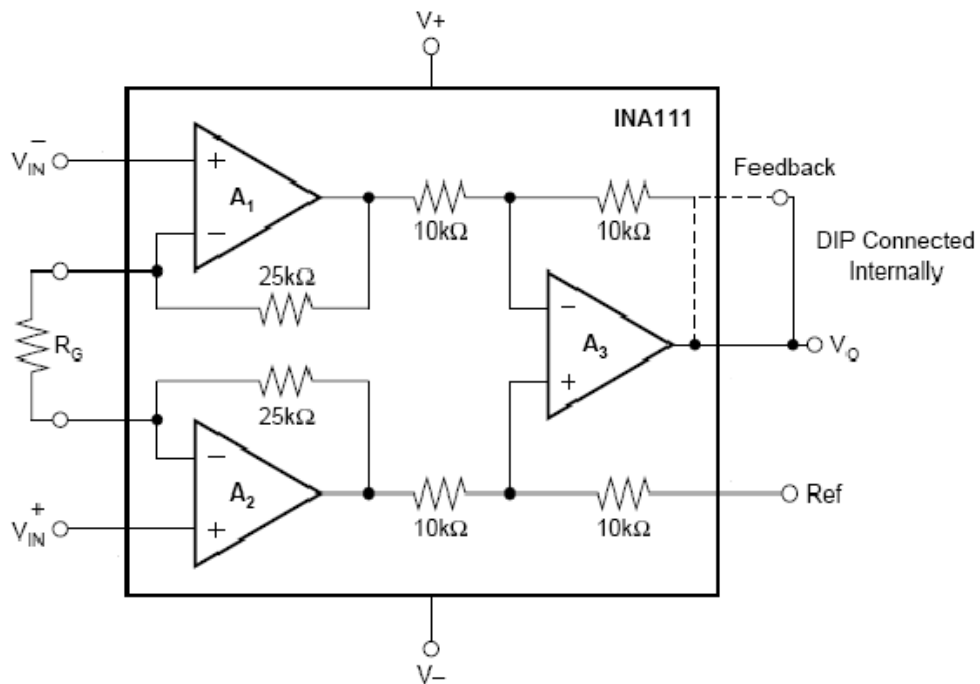


Figura 22 - Diagrama interno do amplificador operacional de instrumentação INA111.

### 3.2.2) Funcionamento do sistema

Visto todos os equipamentos do sistema, bem como suas principais características e funções, será apresentado agora como todos esses equipamentos estão conectados entre si, explicando o funcionamento deles no sistema. O Simulink serviu como ferramenta de controle para digitalização dos dados analógicos recebidos pela placa de aquisição PCI-1711. Portanto, foi construído um *script* em Matlab que fixa os valores para o arquivo do Simulink onde está o diagrama de blocos responsável pelo controle do sistema. O nome dado ao *script* foi *histerese* e ao diagrama de blocos foi *controle*.

A figura 23 mostra a configuração do sistema para obtenção das curvas B vs. H.

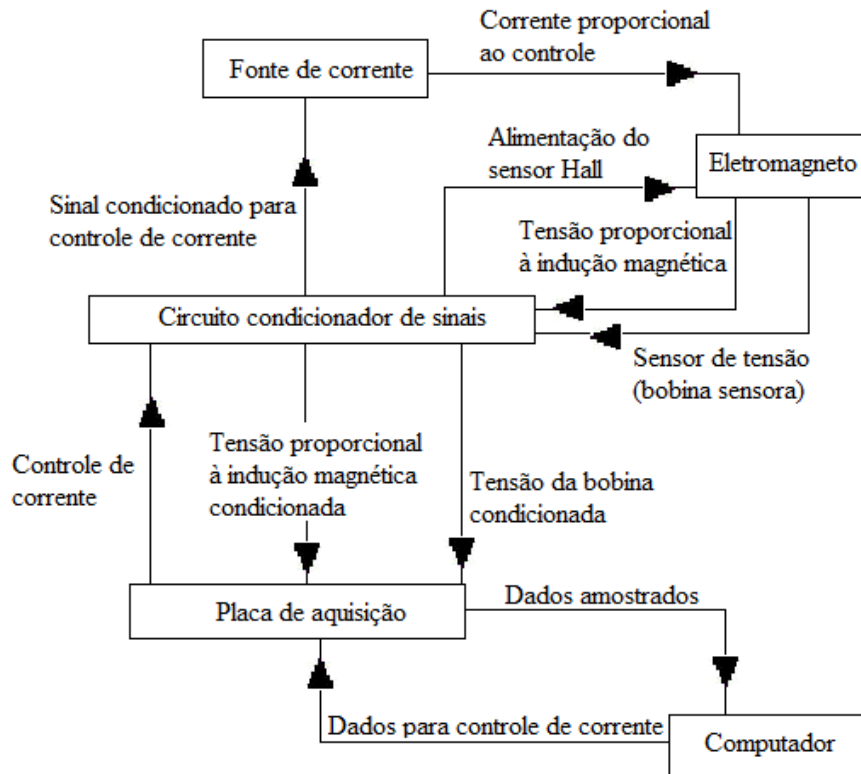


Figura 23 - Configuração do sistema de medidas.

➤ Diagrama de Blocos do Simulink.

Primeiramente é necessário gerar um sinal de tensão que varie no intervalo de -10V a 10V. Para isso, o circuito condicionador de sinais, converte o sinal 0-10V enviado pelo microcomputador através da placa PCI-1711 para -10V a 10V. O diagrama de bloco responsável por esta conversão está na figura 24.

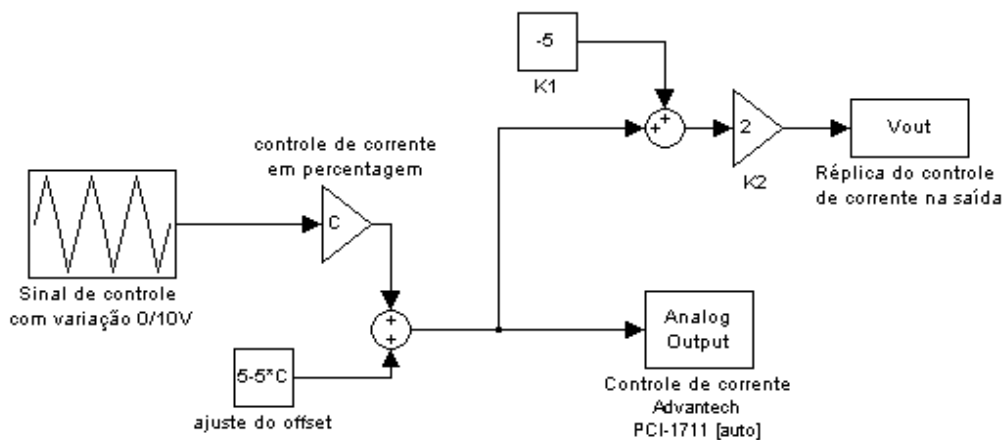
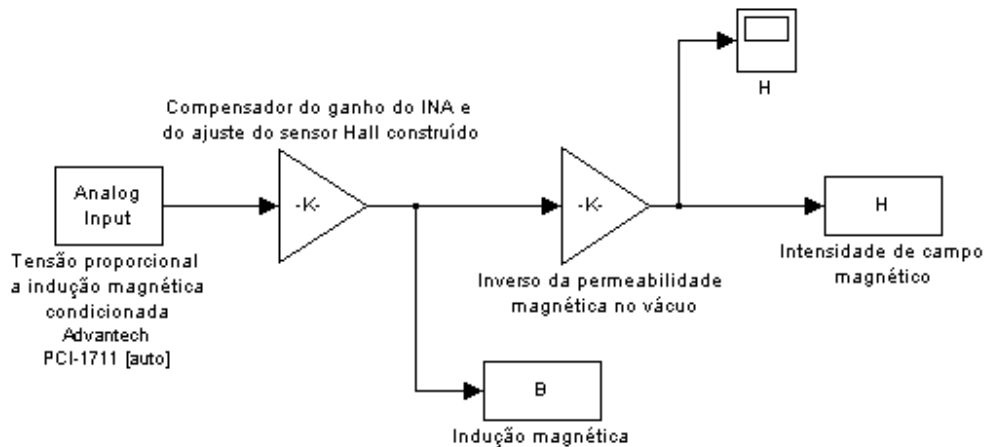


Figura 24 - Bloco responsável pela geração do sinal para controle de corrente.



O bloco indicado por sinal de controle com variação 0/10V permite ao usuário o ajuste do período e da amplitude da função triangular. Como citado anteriormente na seção 3.2.1, são utilizados dois blocos, chamados controle de corrente em percentagem e ajuste de *offset*, para o ajuste de tensão em função do percentual de corrente desejado. Depois deste ajuste, o sinal irá controlar a fonte de corrente através da entrada analógica da mesma.

A fonte de corrente, por sua vez, irá gerar uma corrente proporcional ao valor de tensão recebida, no intervalo entre -70A e +70A. Esta corrente gerada, atravessa as bobinas do eletromagneto, gerando uma força magnetomotriz. Esta força gerada produz um fluxo magnético entre os pólos, que resulta em uma indução magnética proporcional a corrente elétrica. O sensor Hall está fixado entre os pólos do eletromagneto e mede a indução magnética produzida.

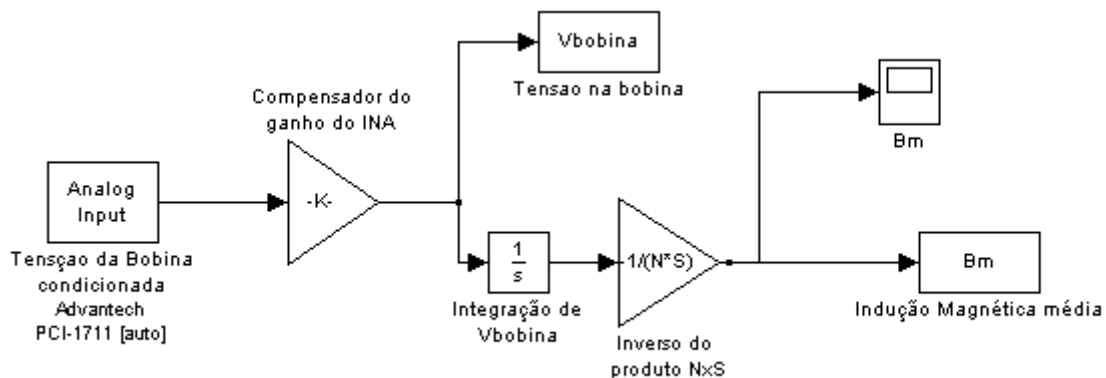


**Figura 25 - Bloco responsável pela aquisição do sinal do sensor Hall CYSJ.**

A figura 25 mostra o diagrama de blocos responsável pela aquisição do sinal de tensão proporcional a indução magnética. É possível notar a presença de dois blocos de ganho. Um destes blocos é responsável por compensar o ganho do INA presente no circuito condicionador de sinais, além do ajuste de calibração da ponteira Hall. O outro bloco é responsável por dividir a indução magnética pela permeabilidade magnética no vácuo, para assim obter a intensidade de campo magnético (H) que será usada na curva de magnetização.

Com os valores de intensidade do campo magnético devidamente registrados no Matlab, repete-se o procedimento, mas agora com a bobina sensora (com ar ou supercondutor em seu interior) entre os pólos do eletromagneto, ao invés do sensor Hall. O fluxo magnético variante e passante entre os pólos induzirá uma força eletromotriz entre os terminais da bobina sensora. De posse dos dados da tensão da bobina, é necessário integrá-

los para assim determinarmos os valores da indução magnética. O diagrama da figura 26 faz essa coleta de dados da bobina e a integração dos mesmos.



**Figura 26 - Bloco responsável pela aquisição da tensão induzida na bobina sensora.**

A entrada analógica da placa PCI-1711 recebe os dados de tensão da bobina sensora. Esses dados passam por um bloco responsável por compensar o ganho produzido no INA presente no circuito condicionador. Após esse ajuste, os dados de tensão são integrados e em seguida multiplicados pelo inverso do produto  $N \times S$  ( $N$  - número de espiras e  $S$  - área da seção da bobina). Essas operações resultam na indução magnética média, que é devidamente registrada dentro do Matlab.

Vale ressaltar que o campo magnético é obtido pelo sinal de tensão proporcional a indução magnética obtido por um sensor Hall e o sinal de indução magnética é obtido pela integração do sinal da tensão induzida na bobina sensora, em etapas diferentes. Seria mais adequado a obtenção dos resultados ao mesmo tempo, mas com isso o sensor Hall também obterias leituras de campo de dispersão, acarretando em uma distorção do valor da indução magnética no entreferro devido à presença da amostra no interior da bobina sensora.

## Capítulo 4 – Melhorias no Sistema e Resultados

Neste capítulo serão apresentadas todas as principais mudanças que foram feitas no sistema anterior, bem como os resultados obtidos com essas mudanças. Algumas destas mudanças surtiram o efeito desejado, outras acabaram prejudicando os resultados anteriores e foi necessário descartá-las. Entretanto, esses resultados ruins serão explicitados aqui com a finalidade de ter algum registro para futuras consultas e eventuais mudanças na utilização do sistema. Pode-se dividir essas principais mudanças em dois objetivos distintos:

- Eliminar o ruído da tensão induzida na bobina;
- Eliminar o problema de *offset* do sistema.

### 4.1) Eliminação do ruído

Como pode ser visto no trabalho de C. L. Marcelino [7], com as alterações no sistema de medidas, verificou-se a presença de um ruído tanto no sinal de indução magnética (B) lido pelo sensor Hall, quanto no sinal da tensão induzida na bobina ( $V_{bobina}$ ). Este ruído dificulta a obtenção com acurácia das curvas  $B_m$  vs. H, visto que o sinal da indução magnética ( $B_m$ ) é obtido integrando a tensão induzida na bobina. Este ruído também influencia no valor de H, pois o valor de H é obtido dividindo-se o sinal de B (do sensor Hall) pela permeabilidade magnética no vácuo.

Dois fatos a respeito deste ruído causaram grandes dificuldades para a descoberta da origem do problema. Um destes fatos é que o ruído só ocorria a cada meio período do sinal de tensão induzida. O outro fato é que o ruído simplesmente desaparecia por completo em algumas ocasiões. Este fato levantou a suspeita de que em determinado horário do dia a rede elétrica do CT poderia estar sobrecarregada, com a presença de muitos harmônicos na rede interferindo nas medições realizadas. Mas essas suspeitas não foram confirmadas visto que o ruído não seguia um horário certo de ocorrência, tanto aparecia na parte da manhã quanto na parte da tarde, inclusive antes das 08:00 horas e após as 17:00 horas (teoricamente horários com menos equipamentos ligados).

No trabalho de Clayton Marcelino [7], algumas mudanças foram testadas para eliminar, ou ao menos reduzir, o “efeito” deste ruído. Como exemplo, ele realizou o levantamento de terra das tomadas utilizadas pelos equipamentos, trocou todos os componentes do circuito condicionador, adicionou filtros numéricos no diagrama de blocos

do Simulink, entre outras modificações e testes. Tais medidas surtiram algum efeito, mas não eliminaram o ruído. A figura 27 apresenta o resultado obtido no começo do presente trabalho, com o ruído presente nas medidas.

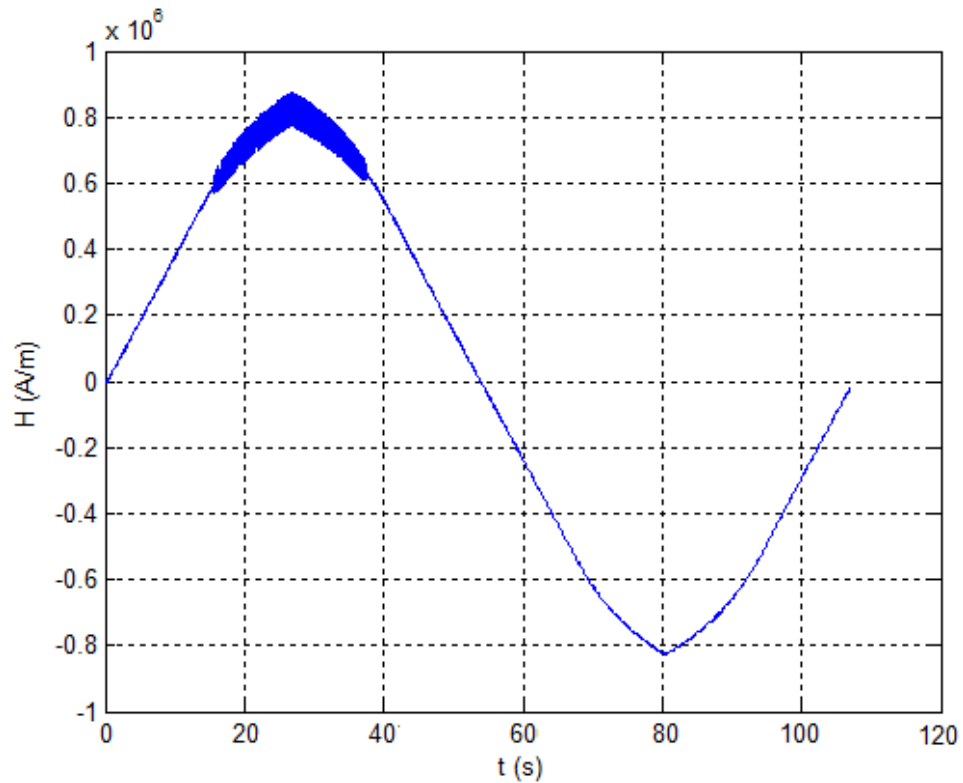


Figura 27 - Curva do campo magnético para  $\pm 50A$ , sem material no entreferro, com gap de 25,4 mm.

Ainda na figura 27 nota-se a presença do ruído na curva de campo magnético em função do tempo. Vale lembrar que o ruído está presente no sinal da indução magnética lido pelo sensor Hall. É importante observar que as mudanças realizadas no trabalho de Clayton Marcelino [7] surtiram efeito, mas não eliminaram o ruído. O primeiro objetivo para a realização de medidas acuradas é eliminar por completo o ruído, em seguida resolver os problemas de *offset*.

Uma das primeiras alterações foi a troca da resistência variável do bloco de condicionamento de controle de corrente (descrito na seção 3.2.1.2). Então o resistor de  $0 - 100\Omega$  foi substituído por um de  $0 - 50\Omega$  com o objetivo de limitar a faixa de variação desta resistência para obter um melhor ajuste do zero da fonte de corrente. Aliado a isso, observou-se que os pólos do eletromagneto apresentavam uma forte vibração a partir de determinado valor de corrente. Comparando-se com os resultados obtidos, foi possível observar que a vibração ocorria na mesma faixa de valores de corrente que ocorria o ruído.

Portanto, além da troca do resistor, foram colocados dois calços no eletromagneto, com o intuito de fixar os pólos e evitar ao máximo a vibração mecânica.

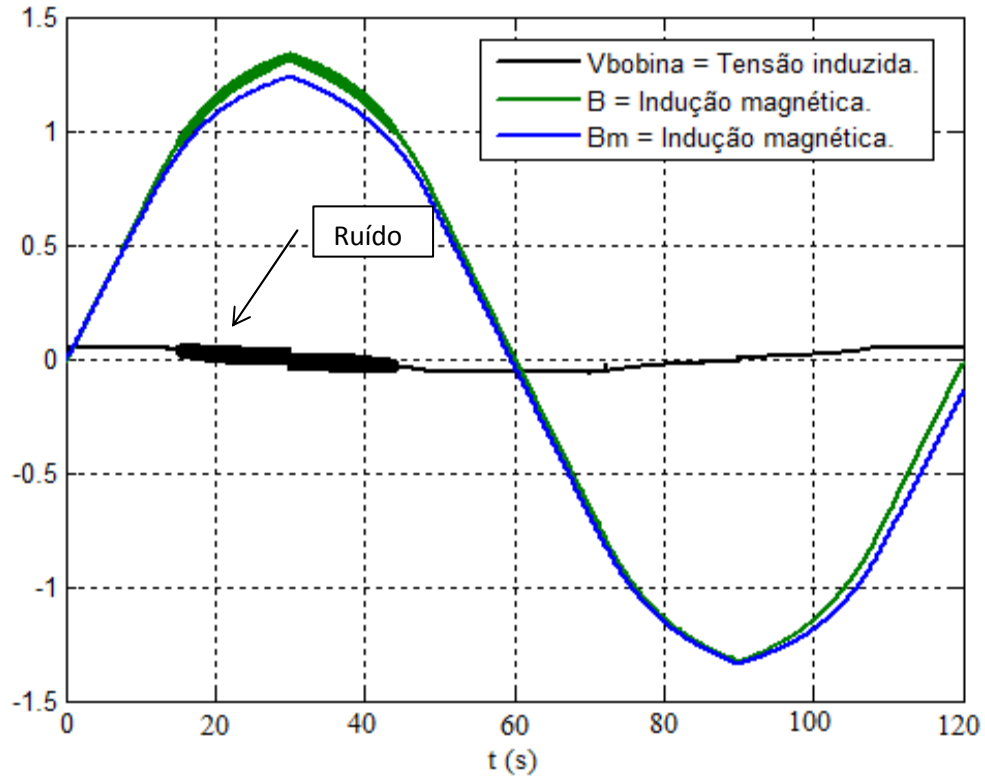


Figura 28 - Curvas para  $\pm 70A$ , sem material no entreferro, com gap de 25,4 mm.

Na figura 28,  $V_{bobina}$  é a tensão induzida na bobina,  $B$  é a indução magnética medida pelo sensor Hall e  $B_m$  é a indução magnética calculada a partir da integração de  $V_{bobina}$ . É possível ver os dois problemas no mesmo gráfico, tanto o ruído quanto o *offset*. Vale ressaltar que os resultados mostram que o ruído não foi eliminado com a realização das mudanças citadas acima, apenas reduzido. Tais mudanças foram importantes, pois através delas, foi possível descartar problemas no eletromagneto e no circuito condicionador de sinais.

Foi feito um teste alterando o período que estava fixado em 120 segundos para 90 segundos e constatou-se que proporcionalmente o ruído era menor, devido ao sinal de  $V_{bobina}$  ser proporcional a  $d\phi/dt$ . A partir desta constatação, foram realizadas diversas medidas com períodos diferentes (30s, 45s, 60s, 75s), e observou-se que quanto menor o período, maior era a razão sinal/ruído. O período não poderia ser constante, teria que variar

de acordo com a corrente desejada, para tal estipulou-se o período em função de  $dI/dT$  da placa de aquisição de dados. Para o primeiro teste com o período variável foi escolhido  $dI/dT$  igual a 10, que é o valor máximo lido pela placa PCI-1711. Os resultados não foram próximos do esperado, mostrando que a taxa de variação da corrente não acompanhou a taxa de leitura da placa de aquisição

Foi escolhido então  $dI/dT$  igual a 8. Por se tratar de uma onda triangular, a variação de corrente ocorre a cada um quarto de período, portanto a variação de corrente dividido por  $T/4$  deve ser igual a 8. Então na hora de rodar o script e o diagrama de blocos, deve-se informar o valor da corrente desejada no script, e no digrama de blocos deve-se informar o número de ciclos que serão feitos, assim o programa irá informar o período calculado.

Paralelamente a essa mudança no período, passou-se a utilizar uma função presente no Matlab chamada *smooth*. Esta função tem a finalidade de filtrar as pequenas ondulações e ruídos que possam existir no resultado. Na figura 29 são apresentados alguns resultados com  $dI/dT$  igual a 8 usando a função *smooth*.

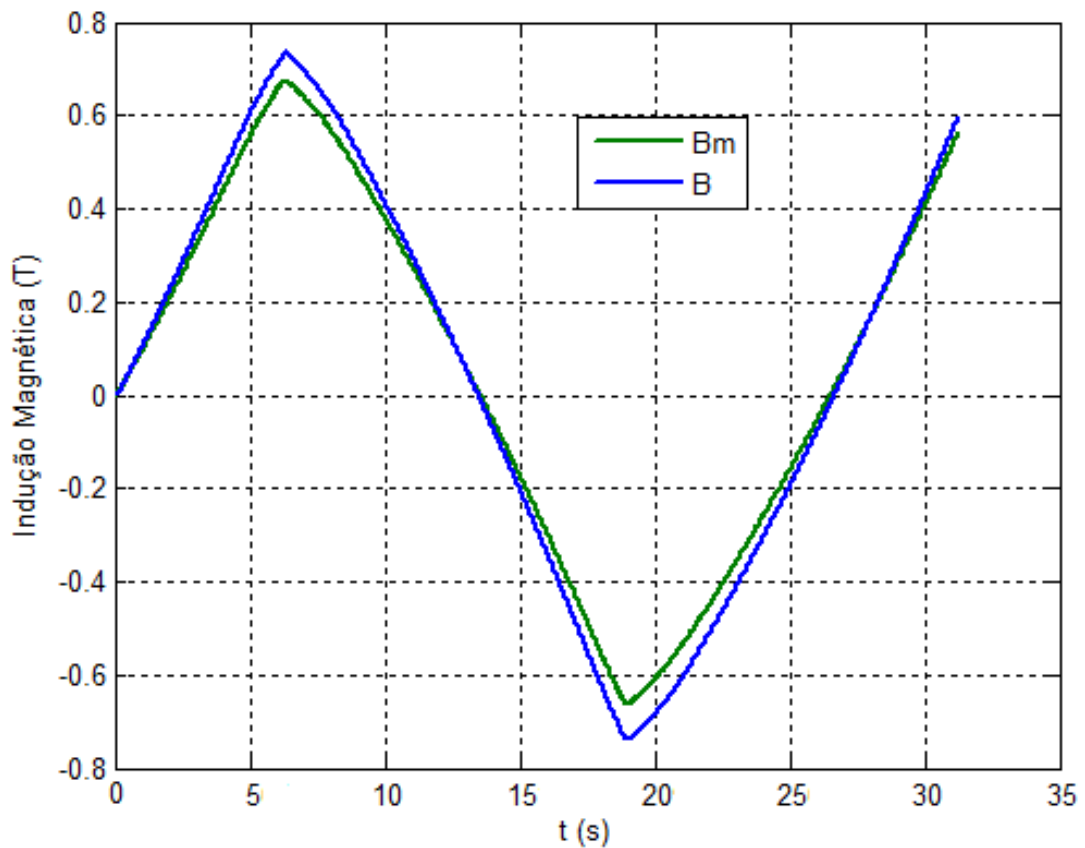


Figura 29 - Curvas de indução magnética,  $\pm 50A$ , gap de 46 mm.

O gráfico da figura 29 acima mostra que a função *smooth* é uma importante ferramenta do Matlab no que diz respeito à filtragem dos ruídos, mas o objetivo do projeto é obter resultados sem o auxílio desta ferramenta. Vale ressaltar que os resultados ainda estão apresentando um *offset*, mas esse problema será visto mais a frente. O gráfico da figura 30 mostra uma curva da tensão induzida na Bobina 1, sem o auxílio do *smooth*, sendo possível observar a presença do ruído.

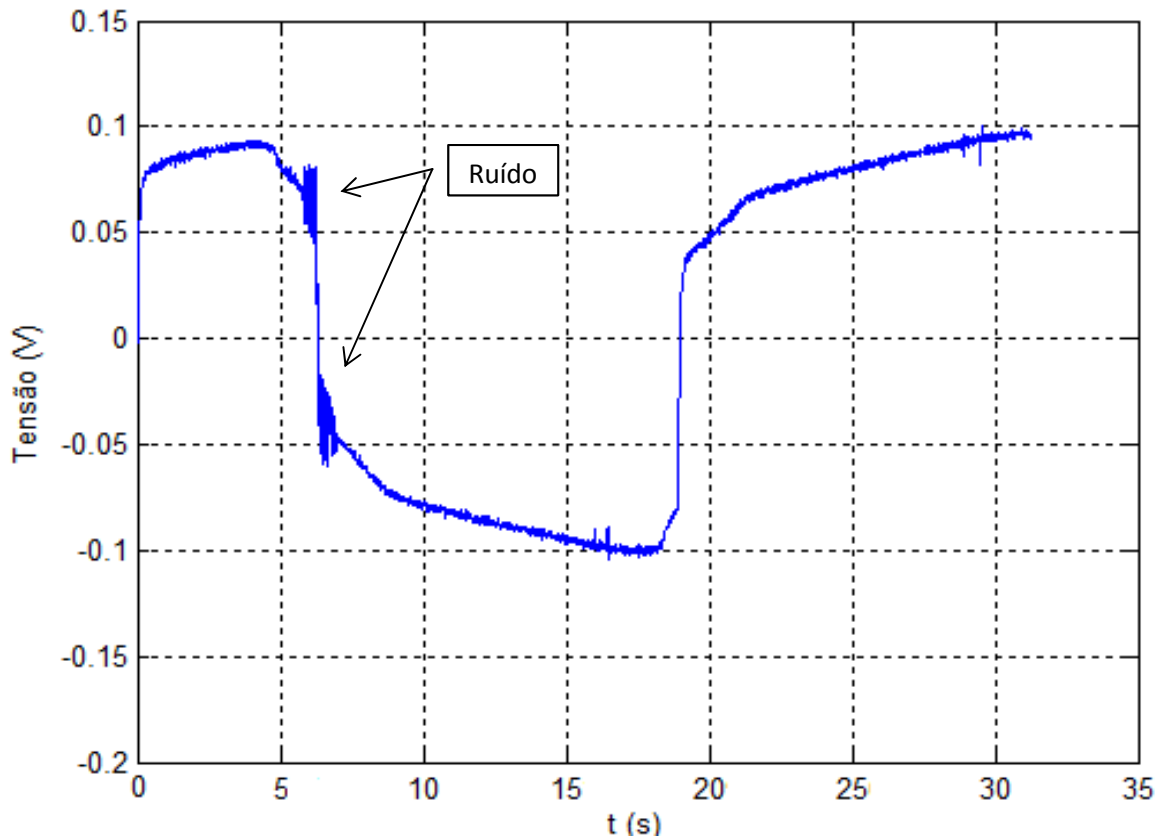


Figura 30 - Curva de tensão induzida na Bobina 1,  $\pm 50A$ , gap de 46 mm.

Até o momento foi utilizado somente a Bobina 1 como bobina sensora. Agora, com a melhoria dos resultados, será utilizada também a Bobina 2 como bobina sensora, com material supercondutor em seu interior. A figura 29 apresenta alguns resultados com a Bobina 2, utilizando o bloco supercondutor C3 em seu interior.

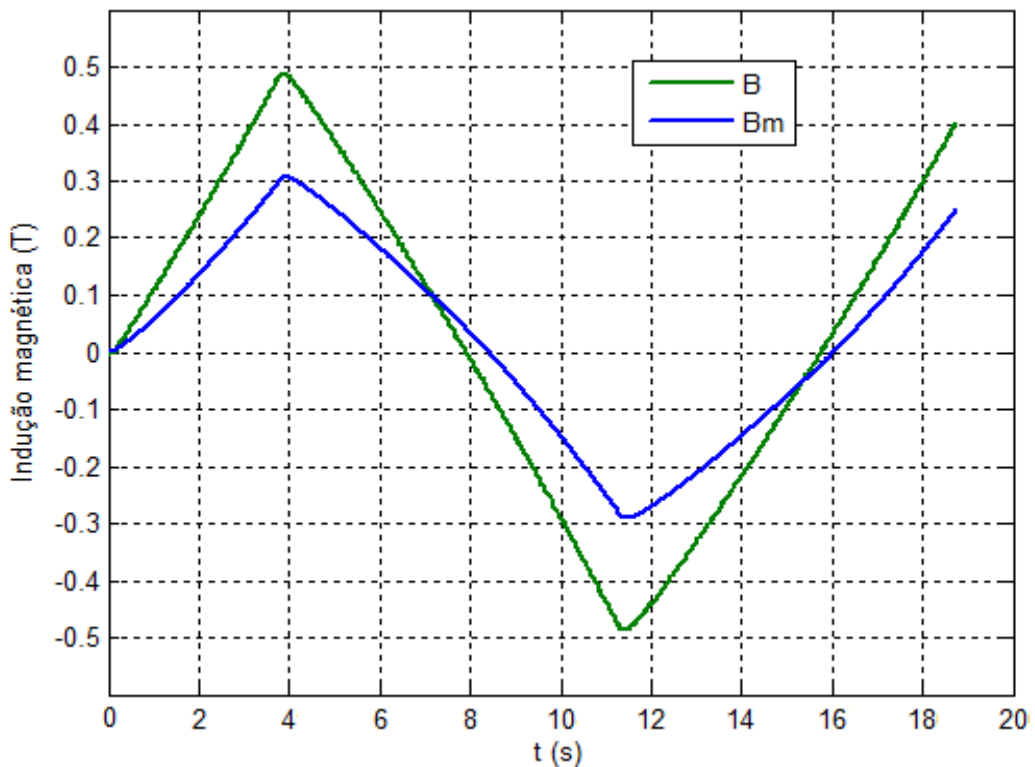


Figura 31 - Curvas de indução magnética com material supercondutor,  $\pm 30A$ , gap de 46 mm.

É possível notar uma grande diferença entre os valores de indução magnética obtidos integrando a tensão induzida na Bobina 2 ( $B_m$ ) e os valores lidos pelo sensor Hall ( $B$ ). Isto se deve ao fato da curva  $B_m$  ter sido resultado da integração do ruído, já na curva  $B$  foi utilizada a função *smooth* diretamente em  $B$ . Este resultado evidencia a necessidade da eliminação do ruído.

Foi feita uma série de tentativas e mudanças na parte eletrônica do sistema para eliminar o ruído, abaixo estão listadas algumas delas:

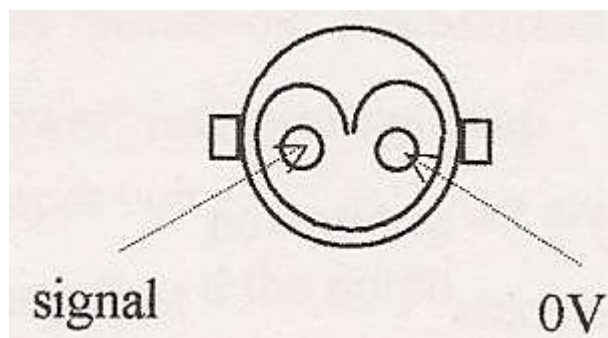
- Construção de um circuito com dois amplificadores operacionais de ganho 1, na tentativa de isolar o circuito das bobinas sensoras do restante do sistema;
- Aumento do número de ciclos, supondo que o ruído poderia ser inicial acompanhando o eletromagneto entrando em operação;
- Montagem de um circuito trocando os amplificadores de instrumentação INA111 por amplificadores AD623AN.



Todas estas tentativas também não surtiram o efeito desejado, apresentando o mesmo ruído no sinal de tensão induzida na bobina e no sinal de indução magnética lido pelo sensor Hall. Realizadas todas as mudanças citadas, foi levantada a hipótese de que o problema não estaria no circuito ou nos programas e sim na fonte de corrente.

Pensando nisso, foram realizados alguns testes com a chave seletora Local/Remote na posição Local (controle de corrente feito manualmente na fonte) e constatou-se que o ruído ainda aparecia. Mas quando a chave estava em Local, e a corrente era variada de 0 a 70A manualmente, o ruído desaparecia. Depois desta constatação e de uma análise no esquema elétrico no manual da fonte, foi feita a abertura da fonte para verificação de existência de algum capacitor danificado no circuito. Esta tentativa fracassou, pois a fonte era uma caixa preta, e não permitia acesso aos componentes internos.

Fazendo mais alguns testes somente com a fonte de corrente, suspeitou-se de um problema no cabo BNC que ligava o circuito condicionador a fonte. A princípio imaginou-se que o terminal que estava conectado a fonte estava invertida, ou seja, de acordo com a figura 32 onde está indicado 0V seria o sinal e vice-versa. Mas alguns testes de continuidade indicaram que a marcação estava certa, onde o sinal correspondia ao pino central do outro terminal e o 0V correspondia à carcaça do terminal.



**Figura 32 - Terminal do cabo BNC ligado a fonte de corrente.**

No sistema, o pino central estava conectado à saída de controle de corrente e a carcaça (0V) estava conectada ao terra do circuito. Então, outro teste foi realizado com o cabo BNC. Foi ligado apenas o pino central, deixando a carcaça sem aterramento. Realizada uma série de medidas, e depois de todas as tentativas feitas anteriormente, foi constatada a causa do

problema. Quando a carcaça era aterrada, a fonte de corrente apresentava um loop de terra, pois provavelmente o cabo BNC já estava aterrado dentro da fonte de corrente. A solução para isto foi conectar apenas o pino central e deixar a carcaça sem conexão, solucionando enfim, o problema intermitente do ruído.

Abaixo, alguns resultados com a Bobina 1 e Bobina 2, sem a presença do ruído e sem a utilização da função *smooth* do Matlab. Para a determinação do período, foi escolhido  $dI/dT$  igual a 6 (pois apresentou resultados melhores que  $dI/dT = 8$ ).

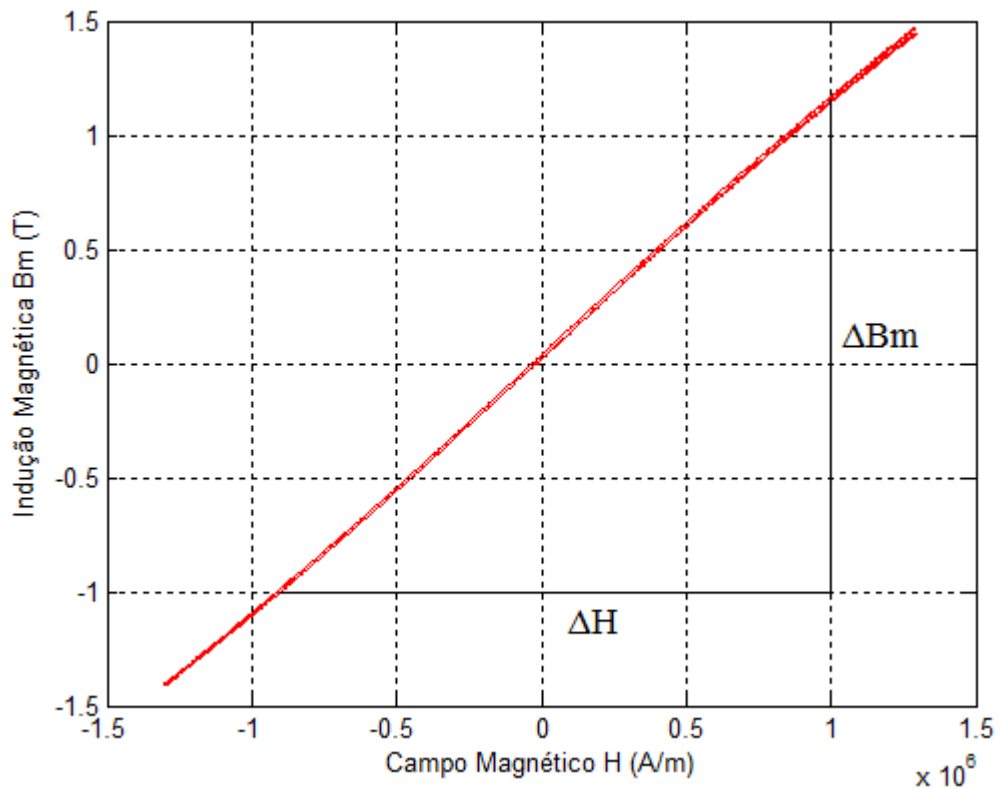


Figura 33 - Curva  $B_m$  vs.  $H$ , Bobina 1,  $\pm 70A$ , gap de 46 mm, 1 ciclo e 1/4.

Utilizando-se a curva acima, pode-se calcular a permeabilidade magnética com os intervalos destacados:

$$\mu_0 = \Delta B_m / \Delta H = (1,15 - (-1,0)) / (1 \times 10^6 - (-0,91 \times 10^6)) = 1,126 \times 10^{-6} \text{ H/m.}$$

A curva de histerese é uma reta como o esperado, porém o valor de permeabilidade magnética encontrada não está satisfatoriamente próximo do valor teórico ( $1,257 \times 10^{-6}$ ). Tal erro pode estar associado à presença do *offset*, fato este, que impossibilitava o fechamento do laço de histerese.

A figura 34 apresenta uma curva  $B_m$  vs  $H$  utilizando a Bobina 2, com o bloco supercondutor C1.

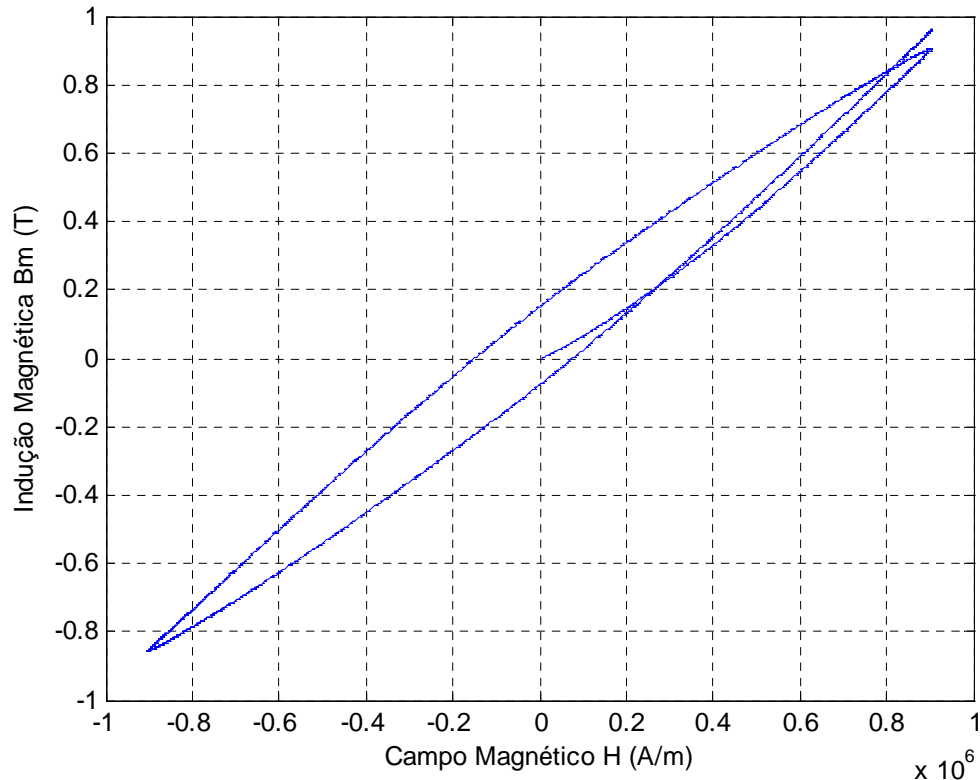


Figura 34 - Curva  $B_m$  vs.  $H$ , Bobina 2, supercondutor C1,  $\pm 70A$ , gap de 44 mm, 1 ciclo e 1/4.

Com a curva acima fica evidente o problema de *offset* que o sistema apresenta, impossibilitando o fechamento do laço de histerese. Portanto, foram feitos alguns testes e utilizadas algumas ferramentas do Matlab, para reduzir e eliminar esse *offset*. Tais testes e ferramentas serão detalhados a seguir na seção 4.2.

## 4.2) Eliminação do offset

Encontrada a origem do ruído e enfim solucionado o problema, partiu-se para uma nova etapa do projeto; encontrar e posteriormente solucionar o *offset* presente no sinal da tensão induzida na bobina. Todos os resultados que serão apresentados a partir de agora foram obtidos com  $dI/dT = 6$ .

Uma primeira hipótese era de que o ganho escolhido para o INA111 era muito baixo, se comparado com a faixa em que ele pode ser utilizado (1 até 1000). Então foi trocado o resistor de  $33K\Omega$  por um de  $10K\Omega$ , dando um ganho de aproximadamente 6. Através do resultado mostrado na figura 35, é possível notar que essa alteração não afetou o *offset*.

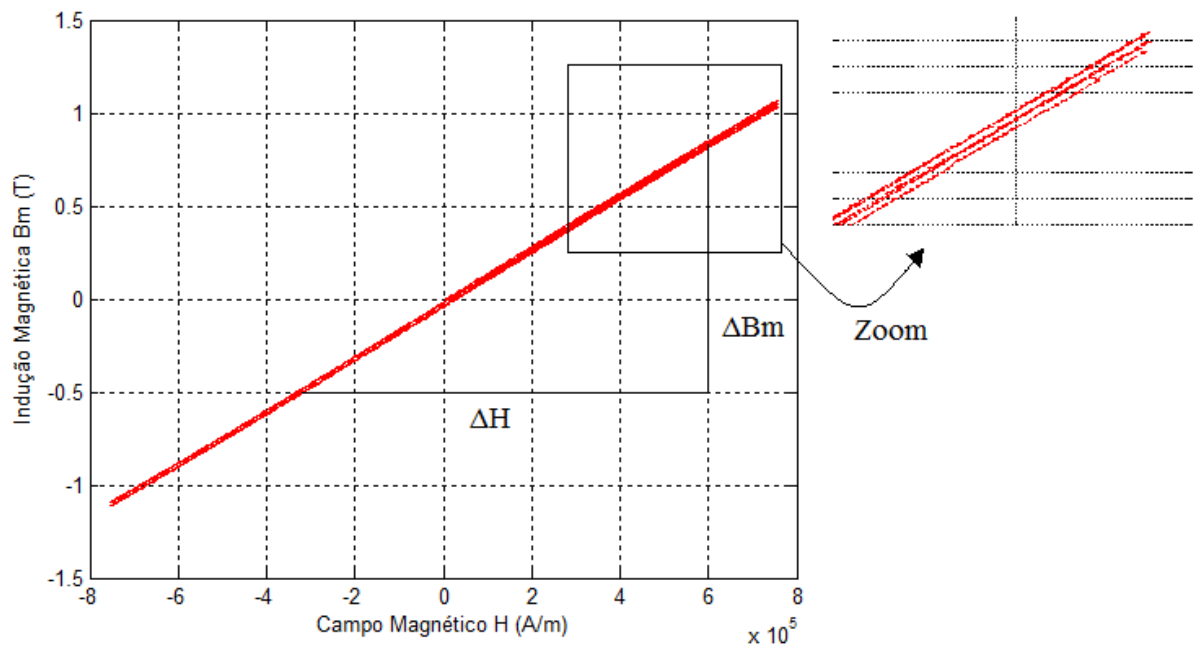


Figura 35 - Curva Bm vs. H, Bobina 1, Ar, ± 40A, gap de 23.6 mm, 2 ciclos e 1/4.

Vale ressaltar que essa alteração não solucionou o problema do *offset*, como também não obteve um valor de  $\mu_0$  próximo do esperado.

$$\mu_0 = \Delta B_m / \Delta H = (0,83 - (-0,5)) / (6 \times 10^5 - (-3,25 \times 10^5)) = 1,438 \times 10^{-6} \text{ H/m.}$$

Descartada a possibilidade de erro na escolha do ganho, foram feitas mais algumas tentativas, como por exemplo, a limpeza dos contatos da placa PCI-1711 que fica dentro do microcomputador, aterramento da blindagem do par trançado que conecta as bobinas sensoras ao circuito condicionador e até a retirada do circuito amplificador da tensão induzida na bobina, ligando diretamente na placa com ganho 1.

Nenhumas das alterações listadas acima surtiram efeito, nem provocaram uma diminuição no valor do *offset*. A figura 36 mostra uma curva Bm vs. H do bloco supercondutor C5, com o ganho 6 no amplificador operacional, para 10 ciclos.

Como não foi encontrado erro no circuito condicionador, nas constantes e ganhos escolhidos e não tem influência com a quantidade de ciclos realizados, foi realizado um teste com a placa de aquisição. O teste consistia em aplicar um curto na entrada analógica da placa de aquisição e observar o resultado. Feito o teste, foi possível constatar que o sinal medido pela entrada analógica era de alguns milivolts. Este evento ocorreu para todas as entradas da placa de aquisição. Este termo DC da placa, somado ao *offset* do amplificador,

após ser integrado acarretaria em um erro que é proporcional ao tempo de execução da medida.

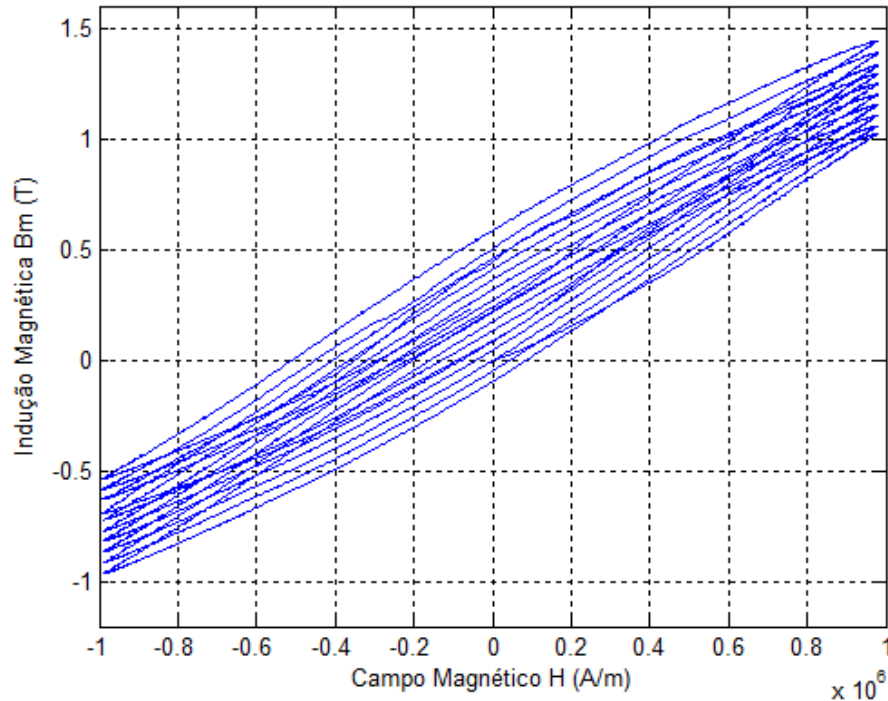


Figura 36 - Curva Bm vs. H, Bobina 2, supercondutor C5,  $\pm 50A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos.

Para garantir a confiabilidade no resultado encontrado, foi feito o mesmo teste em outra placa de aquisição presente no laboratório, obtendo o mesmo resultado. Portanto, concluiu-se que era uma limitação da placa, modelo PCI-1711, que apesar de ser muito versátil, é um equipamento de baixo custo.

Encontrada a origem do problema e a impossibilidade de conserto da placa, foram encontradas quatro possibilidades para resolver o problema. Uma das opções seria pesquisar e comprar um modelo novo de placa de aquisição de dados, o que demandaria muito tempo; construir um circuito eletrônico capaz de linearizar o sinal que a placa acrescentava ao sistema, também demandaria certo tempo; subtrair o *offset*, o que não foi adotado pois a cada medida realizada, o valor do *offset* era diferente; utilizar uma análise numérica dos dados para tratar os resultados obtidos pelo sistema de medidas.

Por ser mais rápida e prática, foi escolhido utilizar, nesse primeiro momento, uma ferramenta do Matlab (*cftool*) para tratamento dos dados. Paralelo a solução escolhida,

estuda-se a compra de novos modelos de placa de aquisição para solucionar definitivamente o problema de *offset*.

A figura 37 apresenta uma curva de indução magnética obtida da integração da tensão da bobina, que mostra claramente o efeito do *offset*. Para corrigir esse *offset*, utilizou-se uma ferramenta chamada *cftool*. Com ela o usuário deve escolher quais são os dados que serão tratados (no presente trabalho, Bm x tempo) e que tipo de análise será feita.

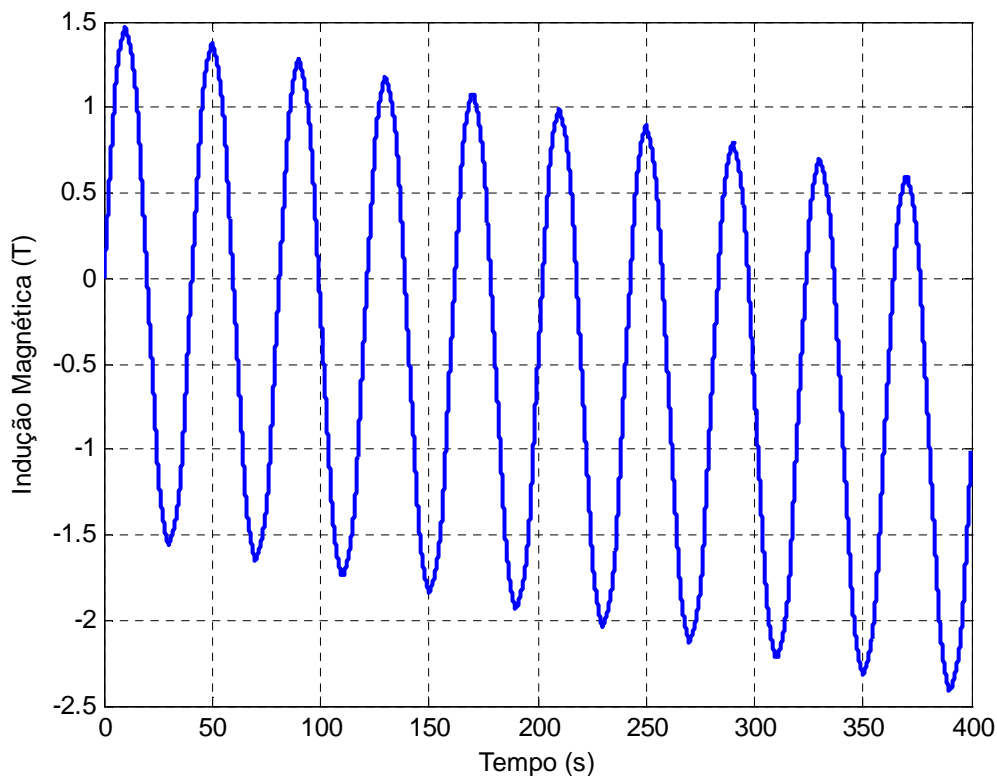


Figura 37 - Curva de indução magnética, Bobina 1, ar,  $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos.

Portanto, foi criada no *cftool* uma equação com um termo em função do seno mais uma função do primeiro grau para ajustar o sinal de Bm, como segue:

$$Y = a*\sin(w*x) + b*x +c,$$

onde x é a variável independente.

O trabalho agora é nas colunas *Lower* e *Upper* limitar ao máximo a faixa de valores da frequência angular (w) e da amplitude do sinal (a), até a obtenção de duas curvas sobrepostas. A figura 38 mostra a janela do *cftool* onde se cria a função a ser usada e ajusta os valores de frequência e amplitude.

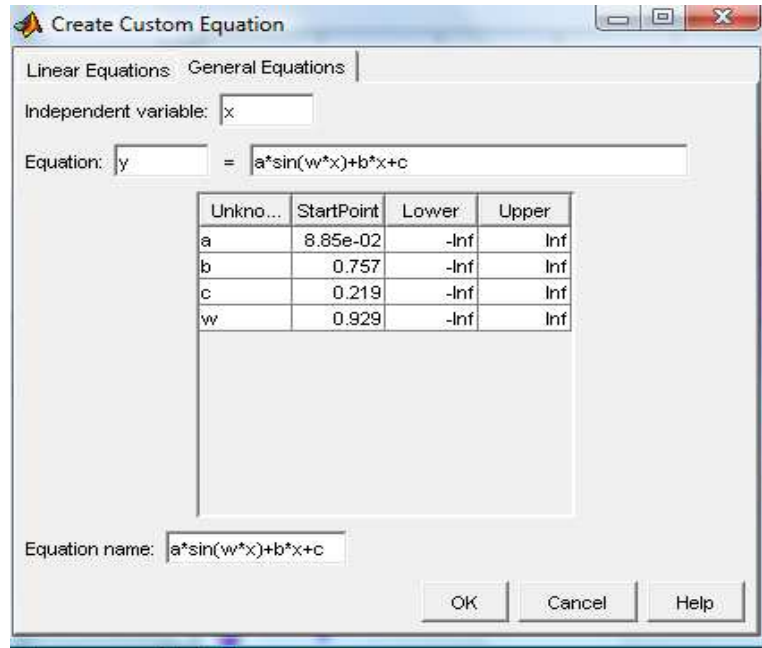


Figura 38 - Janela do *cftool* onde se cria a equação que será utilizada para ajuste de uma função.

A figura 39 apresenta a curva de indução magnética obtida no *cftool* com os valores de “w” e “a” ajustados.

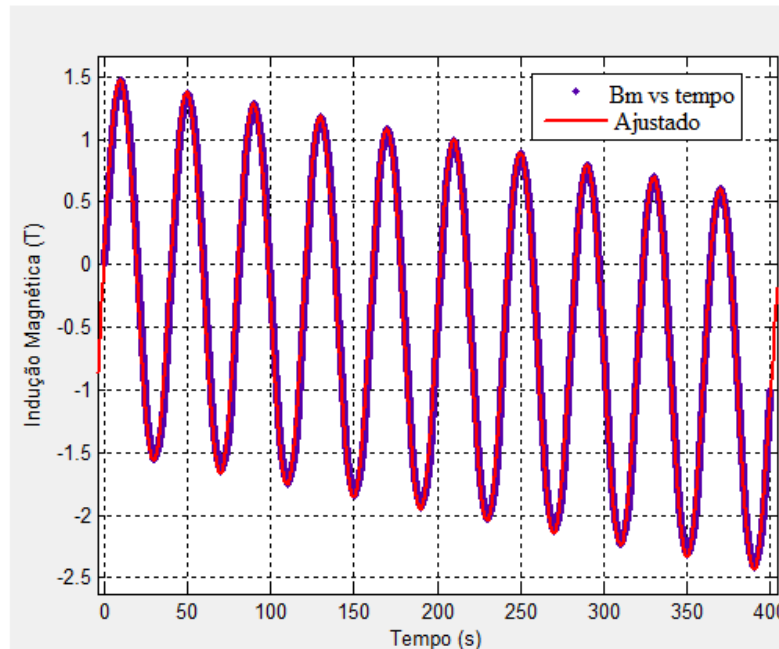


Figura 39 - Ajuste da curva de indução magnética, Bobina 1, ar,  $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos, *cftool* com “w” e “a” ajustados.

Com os coeficientes “b” e “c” encontrados, basta diminuir Bm destes coeficientes que a curva estará ajustada. Observando-se o gráfico da figura 40, nota-se que o ajuste aplicado

aos dados foi bem próximo do esperado e o *offset* foi eliminado com sucesso. Agora, serão apresentados alguns resultados com a Bobina 1 (ar) e Bobina 2 (supercondutor), já ajustados.

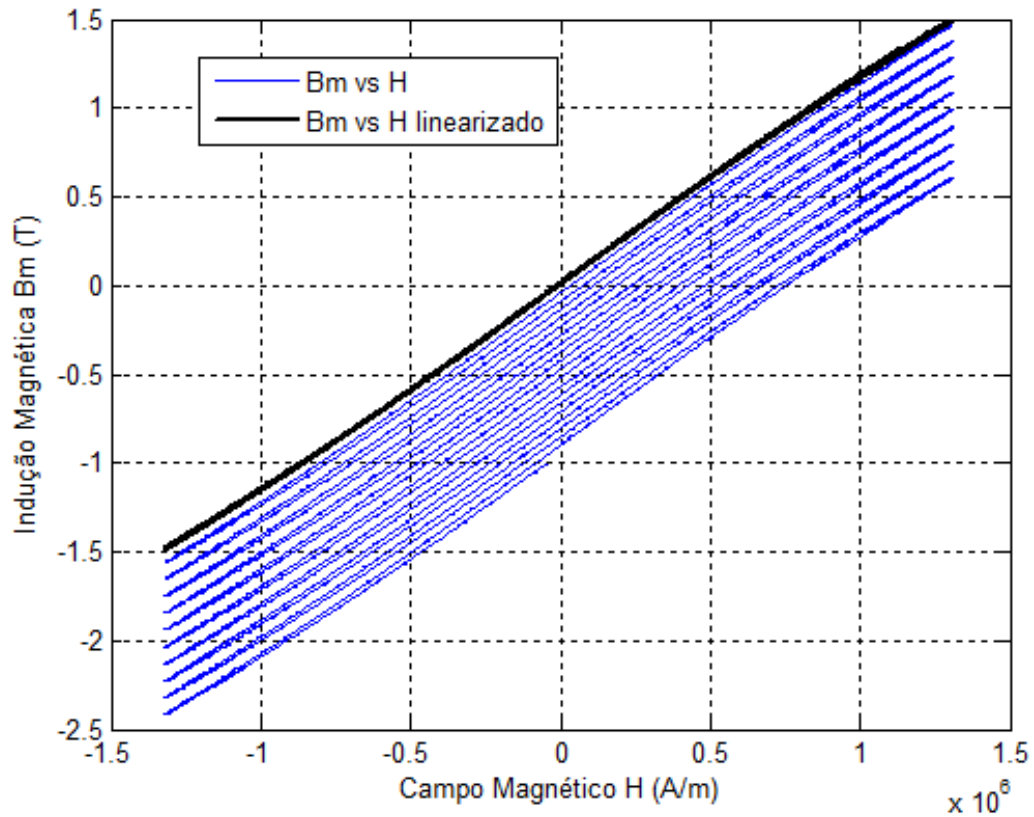


Figura 40 - Curvas Bm vs. H, com linearização e sem linearização, Bobina 1, ar,  $\pm 60A$ , gap de 23.5 mm, 10 ciclos.

A figura 41 mostra uma melhora considerável nos dados se comparado aos resultados anteriormente apresentados. O valor calculado para a permeabilidade magnética do vácuo, após o ajuste, foi de:

$$\mu_0 = \Delta B_m / \Delta H = (1,27 - (-1,0)) / (1 \times 10^6 - (-0,86 \times 10^6)) = 1,221 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$



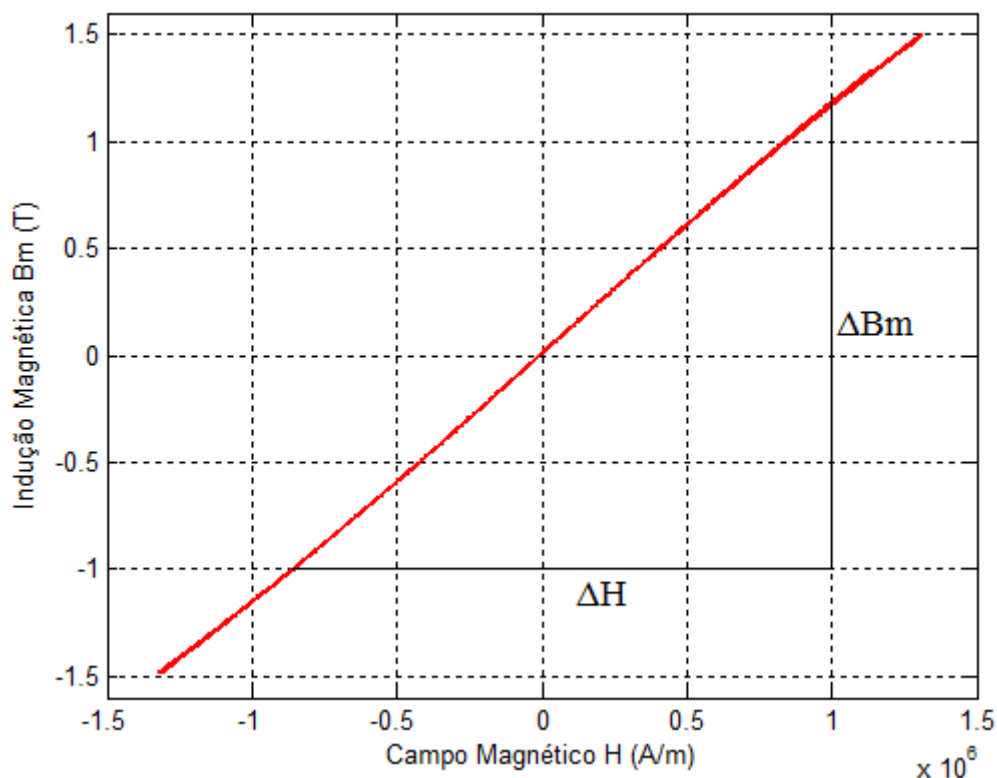


Figura 41 - Curva Bm vs. H, Bobina 1, Ar, ± 60A, gap de 23.6 mm, 10 ciclos.

O valor calculado está agora bem mais próximo ao valor teórico ( $1,257 \times 10^{-6}$  H/m), fornecendo maior confiança nos resultados após as mudanças feitas com o intuito de eliminar os dois problemas que existiam, tanto o ruído quanto o *offset*.

A figura 42 apresenta duas curvas Bm vs. H, com as mesmas condições (corrente, gap, ciclos), para dois blocos supercondutores diferentes. Na figura 43, com as duas curvas traçadas no mesmo gráfico, é possível notar que o bloco C10 alcançou valores de Bm (em módulo) maiores que o bloco C2. Isto condiz com as expectativas, pois o bloco C10 sofreu muito menos ciclos térmicos que o bloco C2, que se encontra então em melhores condições físicas.

Bm Bloco C2: -0,7T, +0,7T;

Bm Bloco C10: -0,78T, +0,71T.

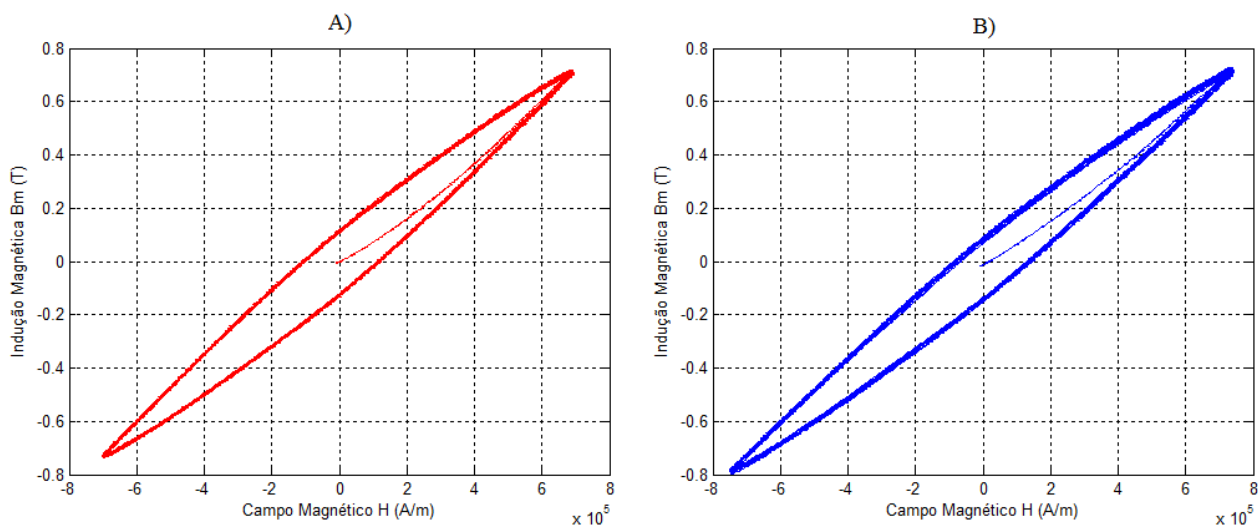


Figura 42 - Curvas  $B_m$  vs.  $H$ , Bobina 2,  $\pm 40A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos. A) Bloco supercondutor C2; B) Bloco supercondutor C10.

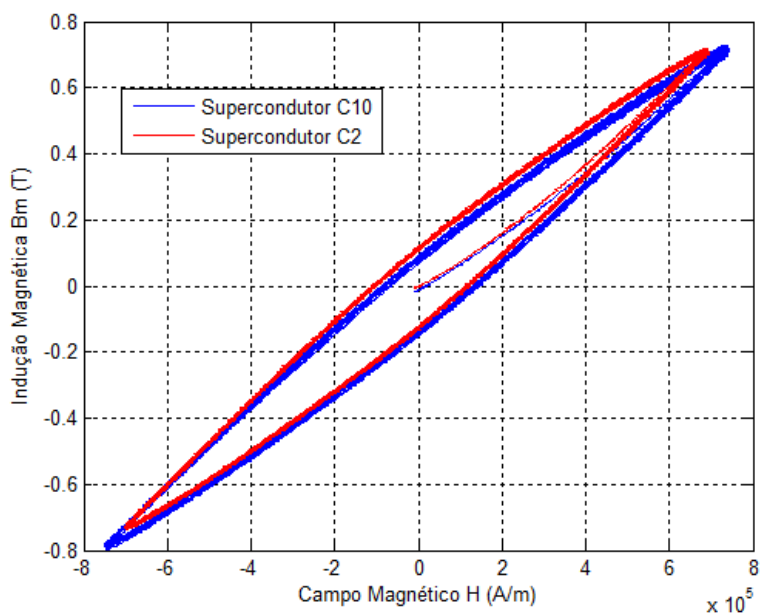
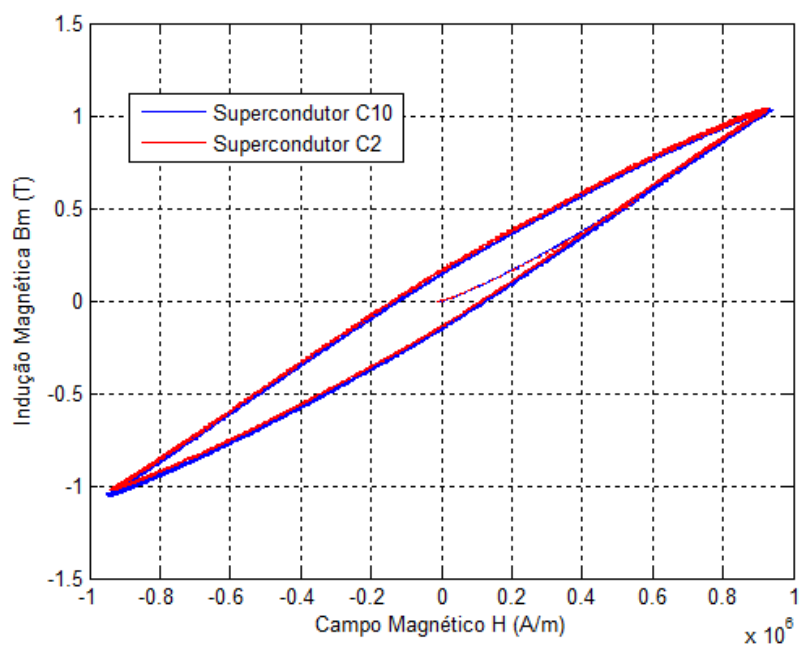


Figura 43 - Curvas  $B_m$  vs.  $H$  comparando os dois blocos supercondutores C2 e C10, Bobina 2,  $\pm 40A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos.

Já para curvas  $B$  vs.  $H$  apresentadas na figura 44, com  $\pm 70A$ , as curvas não foram tão diferentes quanto às mostradas na figura 43, mesmo assim os valores de  $B_m$  para o bloco C10 continuam um pouco maiores.

$B_m$  Bloco C2: -1,02T, +1,03T;

$B_m$  Bloco C10: -1,05T, +1,05T.



**Figura 44 - Curvas  $B_m$  vs.  $H$  comparando os dois blocos supercondutores C2 e C10, Bobina 2,  $\pm 70A$ , gap de 31.5 mm, 10 ciclos.**

## Capítulo 5 - Conclusões

O sistema original presente no laboratório apresentava alguns problemas intermitentes que acabavam prejudicando os resultados. Portanto, o trabalho foi voltado para resolver inicialmente tais problemas para então obter resultados que permitam uma caracterização dos blocos supercondutores.

Foram feitas diversas alterações e configurações em busca da solução do problema. Como exemplo destas tentativas é possível citar: blindagem eletromagnética dos circuitos utilizados, troca de resistores e circuito integrados e análise de problemas de ruído na rede. Ajustes no Simulink, ajustes dos dados adquiridos através de procedimentos numéricos, estudo das constantes adequadas para resultados mais refinados, além da revisão de unidades, foram atividades relevantes para boa melhora no resultado global.

Depois de diversos testes, foi constatado que os dois maiores problemas estavam no cabo BNC da fonte de corrente e na placa de aquisição PCI-1711. No cabo BNC, o problema era um loop de terra dentro da fonte de corrente, que acabava gerando um ruído no sinal de tensão induzida na bobina e no sinal de indução magnética lido no sensor Hall. Na placa de aquisição, o problema é a introdução de um *offset* no sinal de tensão induzida na bobina.

Neste trabalho, verificou-se também a grande utilidade do Matlab, com ferramentas importantes como Simulink, *smooth* e *cftool*. Esta última, de suma importância para ajustes dos dados permitindo a obtenção de curvas  $B$  vs.  $H$  bem próximas às curvas apresentadas pela literatura. Estes dados de curvas de  $B$  vs.  $H$  podem ser usados em outros trabalhos para obter informações importantes sobre o supercondutor, como sua densidade de corrente crítica.

Para projetos futuros, o laboratório está estudando a hipótese de adquirir novos modelos de placa de aquisição de dados, visto que, o modelo atualmente utilizado se mostrou falho.

Especificamente falando de supercondutores, é interessante a aquisição ou fabricação dentro do laboratório de um criostato para melhor fixação da bobina sensora com bloco supercondutor. Pois com a intensidade do campo magnético, o supercondutor tende a ficar em movimento, o que acaba atrapalhando as medições.

Solucionados os problemas de ruído e *offset*, novos alunos podem realizar medidas com os outros blocos supercondutores de diferentes formatos e tamanhos presentes no laboratório. Mas para isso, é preciso a construção de novas bobinas sensoras com o formato desejado.

## Bibliografia

- [1] OSTERMANN, F., PUREUR, P., **Supercondutividade**, Livraria da física, 1ªEd, 2005.
- [2] Disponível em:< <http://www.lasup.com.br/?p=70> > Último acesso 09 de Julho de 2009.
- [3] ROSE-INNE, A. C., RHODERICK, E. H., **Introduction to superconductivity**, 1ªEd., Pergamon Press, 1969.
- [4] Giancarlo Cordeiro da Costa. **Estudo da levitação magnética e determinação da corrente crítica de blocos supercondutores de alta Tc pelo método dos elementos finitos**. Tese de doutorado, COPPE, UFRJ, Junho de 2005.
- [5] Disponível em:< [http://home.utad.pt/~ptavares/t\\_cap2.pdf](http://home.utad.pt/~ptavares/t_cap2.pdf) > Último acesso 12 de Julho de 2009.
- [6] HAYT, W.H.Jr., **Eletromagnetismo**, 6ªEd., LTC, 2003.
- [7] Clayton Luiz Cordeiro Marcelino. **Automação de um sistema de medida para obtenção de curvas B vs. H**. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2008.
- [8] ADVANTECH; **User's Manual PCI-1711 Series**. 1st ed. Printed in Taiwan, June 2001.
- [9] Raphael das Neves Calvo. **Uso de observadores em malha fechada no controle de velocidade de motores de corrente contínua**. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2006.
- [10] LAKESHORE; **User's Manual EM4 Series & EM7 Electromagnets**. Revision 1.5. , 11 April 2002.
- [11] LAKESHORE; **Technical Manual ± 35V ± 70A Power Suply 100 PPM 208/220/380/400V**.

[12] Thermo NESLAB; **Thermo NESLAB Manual, Merlin Recirculating Chillers.** Revision 02 de Março de 2003.

[13] *ICEL MANAUS*; Disponível em: <[http://www.icel-manaus.com.br/imagens/produtos/PS-6100\\_manual.pdf](http://www.icel-manaus.com.br/imagens/produtos/PS-6100_manual.pdf)> Último acesso 04 de Julho de 2009.

[14] *ICEL MANAUS*; **Manual de Instruções da fonte de alimentação 30V / 3A modelo PS-4000.**

[15] *BB AUTOMAÇÃO LTDA*; Disponível em: <[http://www.bbautomacao.com.br/hall\\_magnetico/PDFs\\_Portugues/Elementos%20Efeito%20Hall%20GaAs%20CYSJ1069.pdf](http://www.bbautomacao.com.br/hall_magnetico/PDFs_Portugues/Elementos%20Efeito%20Hall%20GaAs%20CYSJ1069.pdf)> Último acesso 09 de Julho 2009.

# Anexos

## Anexo A

```
%-----Script para cálculo da Curva de Histerese-----
%
% *** Constantes de proporcionalidade para cálculo de Bm ***
%
% N= número de espiras.
% S= Área de seção da bobina.
%
% *** Constantes de tempo ***
%
% T= Tempo do período.
% h= Tempo de amostra.
% O valor de T é proporcional a C para termos uma varredura em
% um tempo adequado, ou pode ser alterado se desejar.
% O "default" de T e h são respectivamente T=120 segundos
%(para 70 ampères) e h= 1e-3 segundos.
%
% *** Ajuste da rampa de corrente ***
%
% C= Percentagem de variação de corrente a ser submetida a rampa.
%
clc
% T=120;
h=1e-2;
C=1;
% % Bobina para ar
% N=1000;
% S=8.5789e-004;
% % Bobina para Supercondutor Circular
% S=9.0732e-004;
% N=1000;
% % Bobina com Ferrite
% S=2.14e-4;
% N=4010;
% % Bobina para Supercondutor Quadrado
% N=100;
% S=0.0015;
% Bobina para Supercondutor Circular(C1-C9)
N=1000;
S=9.1863e-004;
disp('Entre com o valor do máximo ou mínimo de corrente desejada. ');
x=input('O máximo que a fonte suporta é 70A: ');
clc
if abs(x)>70
    x=70;
    corrente=x;
    disp('O valor digitado é maior que 70A, portanto foi setado para 70A')
    disp('Digite qualquer tecla para continuar... ');
    pause
else
C=x/70;
corrente=x;
T=2*x/3;
t=(0:h:T*10-h)';
end
clc
% T=T*C;
```



```

disp('O medidor hall esta ajustado para imersao ao nitrogenio.')
resp=input('Deseja modifica-lo para temperatura ambiente? s/n ','s');
if resp ==('s')
% aj=1.3762;
% aj=.574;
aj=1.3021;
else
% aj=0.6298;
% aj=1.5101;
aj=1.3021*1.2;
end
% clc
% disp('Os valores de N=1000 espiras e S=7.0686e-004 m².')
% resp=input( 'Deseja modificá-los s/n? ','s');
% clc
% if resp==( 's')
% N=input('Entre com o valor do número de espiras: ');
% clc
% resp=input('E da área de seção da bobina, deseja modificar s/n?
','s');
% clc
% if resp==( 's')
% S=input('Entre com o valor da área de seção da bobina: ');
% clc
% end
% else
% disp('Valores mantidos')
% pause(0.7)
% end
clc
% % % a=strcat('Os valores de T= ',int2str(T),' segundos e h=
',num2str(h),' segundos. ');
% % % disp(a);
% % % resp=input( 'Deseja modificá-los s/n? ','s');
% % % clc
% % % if resp==( 's');
% % % T=input('Entre com o tempo do período: ');
% % % clc
% % % resp=input('E o tempo de amostra, deseja modificar s/n? ','s');
% % % clc
% % % if resp==( 's')
% % % h=input('Entre com o tempo de amostra: ')
% % % clc
% % % end
% % % else
% % % disp('Valores mantidos')
% % % pause(0.7)
% % % end
clc
corrente
N
S
T
h
aj

```