

AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIDA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS $B_{vs.H}$

Clayton Luiz Cordeiro Marcelino

*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:

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

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

Prof. ANTONIO LOPES DE SOUZA, Ph.D.

Prof. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.
MARÇO DE 2008

Agradecimentos

Agradeço a todos professores do departamento de Engenharia Elétrica da UFF e da UFRJ que contribuíram na minha formação, tanto diretamente como indiretamente. São todos sem dúvida grandes missionários para sociedade.

Agradeço aos caros amigos Rubens de Andrade Junior e Guilherme Gonçalves Sotelo, que não foram apenas meros orientadores acadêmicos, mais sim dedicados irmãos a quem eu devo todo respeito e consideração.

Agradeço aos caros amigos de jornada na graduação, tanto da UFF quanto da UFRJ, cujos todos nomes estão guardados ternamente em minha memória, pela ajuda constante nos momentos de dificuldades. O companheirismo mútuo foi a grande marca de todos esses amigos.

Agradeço todos meus familiares pelo apoio que me deram neste grande empreendimento pessoal.

Agradeço a meus pais pelo apoio em todos momentos de minha vida, pela oportunidade que me deram de ser filho, por terem me ajudado em mais essa fase da vida e por todas qualidades morais ensinadas que serviram de suporte para meu caráter.

Agradeço a Bárbara Vasconcellos da Silva, grande companheira nessa vida, pelo imenso apoio pessoal e pela dedicação constante na batalha diária.

Por fim, agradeço a Deus, criador de tudo que conhecemos, por nos ter dado a oportunidade de existir e progredir.

Resumo

CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MEDIDAS PARA OBTENÇÃO DE CURVAS B_m vs. H DE MATERIAIS

Este trabalho destinou-se à automação de um sistema para obtenção de curvas B_m vs. H . Estas curvas terão serventia na análise das características magnéticas dos materiais através da simples análise e interpretação das informações nelas contidas.

A modelagem matemática para obtenção dos resultados será discutida a partir da caracterização dos fenômenos magnéticos e das características físicas relacionados aos equipamentos utilizados no presente trabalho.

Para a obtenção automatizada das curvas B_m vs. H fez-se necessário construir um sistema de medidas que foi idealizado a partir dos equipamentos disponíveis e que já haviam sido utilizados em um trabalho anterior. A partir deste trabalho foram realizados testes para aprimoramento do sistema. Após este ter sido aprimorado, mostrou-se limitado para obtenção das medidas desejadas e por essa razão fez-se necessário a construção de um segundo sistema substituinte, onde foram obtidos novos resultados.

Também serão discutidos como foram criados os códigos computacionais para construção e implemento sistemático para obtenção das curvas B_m vs. H , tanto do primeiro quanto do segundo sistema. Outro importante tópico a ser discutido é a implementação de dispositivos para auxiliar o funcionamento do sistema substituinte e mostrar como estes foram confeccionados, ajustados e incorporados ao anterior.

Serão também discutidos os problemas enfrentados na busca de realizar o funcionamento satisfatório do sistema e quais as medidas tomadas para solucioná-los.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 – Fundamentos teóricos.....	3
2.1) Indução magnética média (B_m)	3
2.2) Intensidade de campo magnético (H).....	5
2.3) Curvas B_m vs. H típicas dos materiais estudados:	8
2.3.1) Curvas B_m vs. H no ar.	8
2.3.2) Curvas de histerese de materiais ferromagnéticos.	11
Capítulo 3- Apresentação e configuração dos equipamentos	17
3.1) Equipamentos comuns aos dois sistemas.....	17
3.1.1) Eletromagneto (modelo EM4-HV LakeShore) [4].....	17
3.1.2) Fonte de corrente (modelo 662 da plataforma LakeShore) [5].	19
3.1.3) Sistema para arrefecimento (<i>Chiller</i>)[6].	21
3.2) Equipamentos utilizados no SGPIB.	23
3.2.1) Placa GPIB [8].	23
3.2.2) Multímetro HP 34401A [10].	24
3.2.2) Gaussímetro (modelo 450 da LakeShore)[11].	26
3.3) Equipamentos utilizados no SPAD.	29
3.3.1) Placa PCI-1711 de aquisição de dados [12].	29
3.3.2) Fonte de tensão [15].	31
3.4) Descrição do princípio de funcionamento do sistema de medida	32
Capítulo 4 – Sistema de medidas utilizando interface GPIB (SGPIB)	34
4.1) Equipamentos utilizados e procedimentos de montagem	34
4.2) Configuração inicial do SGPIB.....	36
4.3) Funcionamento do SGPIB.....	37
4.4) Resultados do SGPIB.....	38
4.4.1) Problemas de ondulação periódica no sinal de indução magnética.	38
4.4.2) O ruído no sinal de tensão da bobina	42
4.4.3) O ruído da rede Elétrica	43
4.5) Nova configuração do SGPIB.....	43
4.6) Alterações no programa e desenvolvimento da interface gráfica.	44
4.6.1) Construção da rotina de integração no código principal	44
4.6.2) Interface gráfica GUI (<i>Graphical User Interface</i>)	46
4.7) Resultados após o aterramento da rede elétrica do laboratório.....	48
4.7.1) Resultados para o ar com intervalo de corrente -35–35A para mínima frequência do gerador de funções.....	49
4.7.2) Resultados para o ar com intervalo de corrente -35–35A para frequência de 16mHz no gerador de funções.....	50
4.7.3) Resultados para o ferrite com intervalo de corrente -2,5–2,5A para mínima frequência do gerador de funções.....	52
4.8) Limitações do SGPIB.....	54
4.8.1) Atraso na leitura de campo magnético.....	54
4.8.2) Necessidade de controle manual.....	54

Capítulo 5 - Sistema de medidas utilizando uma placa de aquisição de dados(SPAD):	55
5.1) Características gerais do segundo sistema	55
5.1.1) Equipamentos utilizados no SPAD.	55
5.1.2) Principais diferenças do SPAD em relação ao SGPIB.....	56
5.1.3) Configuração do SPAD.....	58
5.2) Funcionamento do SPAD.....	59
5.2.1) Calibração da ponteira Hall CYSJ.	61
5.2.2) Construção do circuito condicionador de sinais.....	61
5.2.2.1) Bloco de condicionamento do controle de corrente.....	62
5.2.3.2) Bloco de condicionamento da tensão dos sensores.....	65
5.2.3.3) Circuito auxiliar para alimentação do sensor Hall CYSJ.....	65
5.4) Resultados do SPAD	66
5.4.1) Resultados utilizando o gaussímetro e placa de aquisição.....	66
5.4.2) Resultados utilizando o novo sensor Hall para o ar.	67
5.4.3) Problema de ruído a cada meio período.	69
5.4.4) Procedimento para atenuação do ruído.	71
5.4.5) Resultados para o ferrite.....	71
5.4.6) Resultados para o Nd ₂ Fe ₁₄ B.....	74
Conclusões	77
Trabalhos Futuros	79
Bibliografia.....	80
Anexos.....	82

Índice de figuras

Figura 1: Bobina alocada no entreferro de um eletromagneto.	3
Figura 2: Circuito magnético representativo de um Eletromagneto.....	6
Figura 3: Circuito elétrico análogo considerando as relutâncias.....	6
Figura 4: Curva B_m vs. H teórica no ar para a aplicação de corrente variante $\pm 70A$ e entreferro de 1 pol.....	9
Figura 5: Campo magnético em função do tempo.....	10
Figura 6: Indução magnética em função do tempo.....	10
Figura 7: Curva de histerese típica de material ferromagnético, incluindo os pontos principais..	11
Figura 8: Curva de histerese do ferrite 3c15.....	15
Figura 9: Campo magnético em função do tempo para o ferrite 3c15.	15
Figura 10: Indução magnética em função do tempo para o ferrite 3c15.....	16
Figura 10: Eletromagneto utilizado nos sistemas implementados.	17
Figura 11: Curva $H \times I$ do eletromagneto utilizado, para diversos entreferros em polegadas [4]..	19
Figura 12: Fonte de corrente utilizada nos sistemas implementados.	20
Figura 13: Resfriador de líquidos (<i>Chiller</i>).	22
Figura 14: Eficiência de remoção de calor em função da temperatura para <i>chillers</i> da série Merlin.[6].....	23
Figura 15: Placa GPIB utilizada em um dos sistemas implementados.	24
Figura 16: Multímetro HP 34401A utilizado no SGPIB [10].	25
Figura 17: Gaussímetro modelo 450 (painel frontal) [11].....	27
Figura 17: Gaussímetro modelo 450 (painel traseiro) [11].	28
Figura 18: Ponteira Hall HSE [11].	28
Figura 19: Placa de aquisição de dados e seus demais componentes [13].	30
Figura 20: Fonte de tensão.	31
Figura 21: Equipamentos envolvidos no sistema SGPIB.....	35
Figura 22: Bobina de 100 espiras.	35
Figura 23: Bobina de 1000 espiras.	36
Figura 24: Configuração inicial do SGPIB.	36
Figura 25: Rampa de B completa para diversos tempos de amostra.....	39
Figura 26: Ampliação da região em destaque da figura 25.....	39
Figura 27: Rampa de B completa para diversos incrementos percentuais de corrente.	40
Figura 28: Ampliação da região em destaque da figura 27.....	41
Figura 29: Tensão induzida na bobina obtida para cada incremento percentual de corrente.....	42
Figura 30: Nova configuração do SGPIB.....	44
Figura 31: Resultado da integração da tensão induzida na bobina para o ar.....	45
Figura 32: Janela gerada pelo comando <i>guide</i> no <i>workspace</i> do Matlab.....	46
Figura 33: Janela de construção do programa.....	47
Figura 34: primeira versão do programa SGPIB de nome provisório “Teste”.....	48
Figura 35: Resultados do ar para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.	49
Figura 36: Curva B_m vs. H do ar para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.	50
Figura 37: Resultados do ar para a frequência de 16mHz no gerador de funções.	51
Figura 38: Curva B_m vs. H do ar para a frequência de 16 mHz no gerador de funções.	51
Figura 39: Resultados do ferrite para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.....	52
Figura 40: Curva B_m vs. H do ferrite para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.....	53

Figura 41: Equipamentos envolvidos no SPAD.....	55
Figura 42: Sensor Hall CYSJ construído.....	57
Figura 43: Circuito condicionador de sinais.....	57
Figura 44: Configuração do SPAD.....	58
Figura 45: Diagrama de blocos do SIMULINK: A-Geração do sinal para controle da fonte de corrente; B- Aquisição do sinal do sensor Hall CYSJ; C- Aquisição da tensão induzida na bobina sensora.	60
Figura 46: Esquemático eletrônico do circuito condicionador.....	62
Figura 47: Circuito para condicionamento do sinal de controle de corrente.....	63
Figura 48: Circuito auxiliar para alimentação do sensor Hall CYSJ.....	65
Figura 49: Curvas principais para $\pm 70\text{A}$; ar; 1 pol; com gaussímetro e placa de aquisição.	66
Figura 50: Curvas principais para $\pm 70\text{A}$; ar; 1 pol com o novo sensor.....	67
Figura 51: Curva B_m vs. H para $\pm 70\text{A}$; ar; 1 pol.	68
Figura 52: Curvas principais para $\pm 70\text{A}$; ar; 1 pol; com ruído.	70
Figura 53: Curva B_m vs. H para $\pm 70\text{A}$; ar; com ruído.	70
Figura 54: Figura ilustrativa para procedimento de construção da bobina.....	72
Figura 55: Fotografias da amostra em forma de carretel colada em um suporte de madeira (à esquerda) e da máquina bobinadeira (à direita).....	72
Figura 56: Curvas principais para $\pm 2,5\text{A}$; ferrite; 0,9pol.	73
Figura 57: Curva B_m vs. H para $\pm 2,5\text{A}$; ferrite; 0,9pol.....	74
Figura 58: Curvas principais para $\pm 70\text{A}$; NdFeB; 0,9pol.	75
Figura 59: Curva B_m vs. H para $\pm 70\text{A}$; NdFeB; 0,9pol.....	75

Índice de tabelas

Tabela 1: Valor da magnetização de saturação de materiais ferromagnéticos [1].	12
Tabela 2: Principais parâmetros de materiais ferromagnéticos [1].	13
Tabela 3: Valores de temperaturas de Curie para materiais ferromagnéticos [1].	14
Tabela 4: Especificações técnicas da unidade M-75 Thermo NESLAB [6].	21
Tabela 5: Especificações do Multímetro HP 34401A. [10]	25
Tabela 6: Alcances e resoluções do gaussímetro 450 [11].	29
Tabela 7: Tabela analítica para ajuste e obtenção de V_1	64
Tabela 8: Tabela analítica relativo as variáveis de V_1	64

Capítulo 1 - Introdução

O objetivo central desse trabalho é a automação das medidas produzidas por um eletromagneto para a realização de curvas de magnetização (B_m vs. H). Estas curvas têm como finalidade caracterizar as propriedades magnéticas dos materiais, para que posteriormente possam ser analisadas.

Os materiais estudados mais frequentemente são os materiais ferromagnéticos, que são amplamente empregados em aplicações de engenharia elétrica. Futuramente este sistema poderá ser utilizado no estudo de materiais mais complexos, como os supercondutores.

O laço de histerese ou curva de magnetização relaciona a indução magnética com a intensidade de campo. O processo de obtenção desta curva será feito em várias etapas de um programa computacional a partir de dados amostrados pelos sistemas de medidas feitos em tempo real. Para a implementação do sistema foram utilizados alguns equipamentos de medição de precisão desenvolvidos por fornecedores especializados. Em conjunto com estes equipamentos foram construídos dispositivos que viabilizaram novos meios de implementação, auxiliando no funcionamento ou refinamento dos resultados. Dois sistemas de medidas foram implementados nesse trabalho, conforme detalhado abaixo:

- *Sistema de medidas utilizando uma placa GPIB (SGPIB)*: Nesse sistema veremos os sucessos, dificuldades e limitações, mostrando quando culminou a necessidade de sua substituição e a idealização de um novo sistema.
- *Sistema de medidas utilizando placa de aquisição de dados (SPAD)*: Esse sistema foi desenvolvido devido aos problemas que o SGPIB havia apresentado. Os resultados obtidos com o SPAD mostraram-se melhores que os realizados com o SGPIB, sendo o sistema atualmente utilizado no laboratório.

Para que haja clareza no desenvolvimento do trabalho, cada sistema será separado em capítulos distintos, evitando possíveis ambigüidades no entendimento e na construção de cada um, além disso, separando desta forma, irão caracterizar duas etapas do trabalho.

A estrutura do trabalho está dividida como se segue:

No **capítulo 2** serão explicados de forma sucinta os fundamentos teóricos, os modelos matemáticos e os fenômenos magnéticos relacionados ao trabalho. Serão também apresentadas curvas teóricas a partir de programas computacionais servindo para fins comparativos.

No **capítulo 3** serão apresentados os equipamentos discriminados quanto ao funcionamento, especificações técnicas, manuseio e função em cada sistema. Além disso, será construído um algoritmo que pretende generalizar o funcionamento dos sistemas.

Os dispositivos construídos serão apresentados ao longo dos capítulos 4 e 5.

No **capítulo 4** será mostrado como foi construído o SGPIB onde serão julgadas suas vantagens e limitações, que por fim, culminaram em sua substituição. Ainda neste capítulo será visto como foi desenvolvido um programa em Matlab com interface gráfica, pela utilização do pacote GUI (*graphical user interface*), responsável pela automação deste sistema.

No **capítulo 5** apresenta-se o SPAD onde serão discutidos sua implementação, distinção em relação ao sistema anterior e seus resultados. Também será mostrado um *script* auxiliar programado em arquivo Matlab, para execução do programa implementado a partir das ferramentas gráficas do SIMULINK. Este programa serviu para controlar o processo automático deste sistema.

Capítulo 2 – Fundamentos teóricos

Neste capítulo serão mostrados os fundamentos teóricos e um modelo matemático utilizado para descrever os fenômenos físicos que são observados nesse trabalho. Logo depois serão mostradas as características típicas de elementos ferromagnéticos, sendo citados os principais pontos contidos na curva de histerese desses materiais. Estes pontos irão descrever suas principais características magnéticas.

2.1) Indução magnética média (B_m)

Quando há variação da taxa de fluxo concatenado em uma bobina é induzida uma f.e.m. entre seus terminais. Este fenômeno é conhecido como indução eletromagnética, cujos princípios serão utilizados nesse trabalho. Faraday e Lenz [1] foram os principais investigadores desse efeito.

A figura 1 apresenta os pólos de um eletromagneto, que produzem uma indução magnética variante no tempo ($B(t)$). Quando uma bobina é alocada no entreferro deste eletromagneto, ou seja, na região entre os pólos apresentados, é induzida uma força eletromotriz (f.e.m.) em seus terminais, resultante do fluxo concatenado enlaçado por essa bobina.

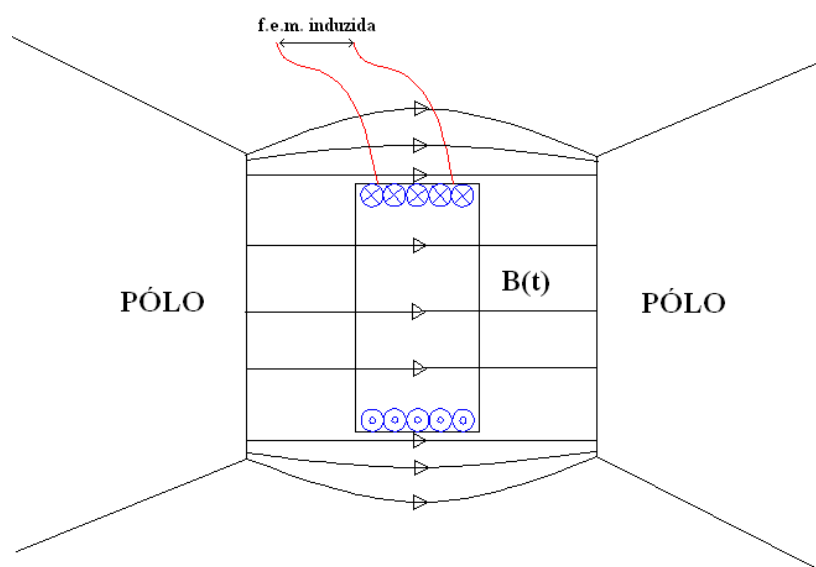


Figura 1: Bobina alocada no entreferro de um eletromagneto.

A lei de Faraday-Lenz enuncia que a f.e.m. induzida num circuito elétrico é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético concatenado e a direção desta f.e.m. induzida tende a se opor à variação deste fluxo, o que explica o uso do sinal negativo [1]. A equação que define essa lei é:

$$e = -\frac{d\lambda}{dt}. \quad (1)$$

Considerando que todo fluxo magnético é enlaçado por todas as espiras da bobina pode-se dizer que:

$$\lambda = N\varphi,$$

onde φ é o fluxo magnético e N é o número de espiras da bobina ou solenóide submetida ao campo magnético.

A f.e.m. produzida nos terminais da bobina é uma grandeza que pode ser medida, visto que seu surgimento é uma consequência da variação de fluxo concatenado que atravessa a bobina. Em posse destes valores é possível obter matematicamente, por integração, os valores de indução magnética. O desenvolvimento para obtenção desta equação é vista adiante:

Sabe-se que:

$$\varphi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

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

Considerando que não há variação da área que compreende a seção da bobina e da amostra, de (2) obtêm-se:

$$\varphi = BS. \quad (3)$$

Utilizando-se das equações (1) e (3) vem:

$$e = -N \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow e = -N \frac{d(BS)}{dt} \Rightarrow e = -NS \frac{dB}{dt} \Rightarrow$$

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{e}{NS}. \quad (4)$$

Onde (4) é uma equação diferencial de primeira ordem. Seguindo os cálculos é obtido:

$$dB = -\frac{1}{NS} e dt. \quad (5)$$

Agora podem ser integradas as duas parcelas da igualdade (5). Como N e S não variam com o tempo, são constantes, e podem ser deslocadas para fora da integral, como segue:

$$\int_0^{B_m} dB = -\frac{1}{NS} \int_0^t edt.$$

Assim é finalmente obtido:

$$B_m = -\frac{1}{NS} \int_0^t edt \quad (6)$$

O resultado da equação 6 é a indução magnética média (B_m), obtida indiretamente a partir da medição da f.e.m. em uma bobina de N espiras submetidas a um campo variável. Pode-se utilizar qualquer método numérico para integração desta tensão na prática, visto a diversa gama de métodos computacionais que resolvem esse cálculo.

2.2) Intensidade de campo magnético (H)

O campo magnético pode ser obtido a partir da Lei de Ampère onde são levadas em conta as diversas características magnéticas e físicas de cada material em questão. Para simplificar, serão utilizados métodos práticos, dentro dos conceitos de circuitos magnéticos.

Circuitos magnéticos apresentam um caminho para o fluxo magnético produzido por uma bobina, a qual é atravessada por uma corrente elétrica. Esta bobina deve estar enrolada no núcleo de material ferromagnético, funcionando como fonte de força magnetomotriz (f.m.m.). Outra forma de se obter uma f.m.m. é utilizar-se de um ímã permanente e fixá-lo no circuito magnético de forma a substituir a região envolvida pela bobina. Um circuito magnético pode ser construído com materiais ferromagnéticos de diversos formatos, tamanhos, com diferentes seções transversais e com diferentes propriedades magnéticas. Os materiais utilizados na construção de tais circuitos não são lineares porque a permeabilidade magnética deles depende da indução magnética. Isto deve ser levado em consideração quando equipamentos eletromagnéticos forem projetados [1].

Pode ser visto na figura 2 um circuito magnético, onde é representado um eletromagneto. O eletromagneto utilizado nesse trabalho será apresentado com detalhes no próximo capítulo.

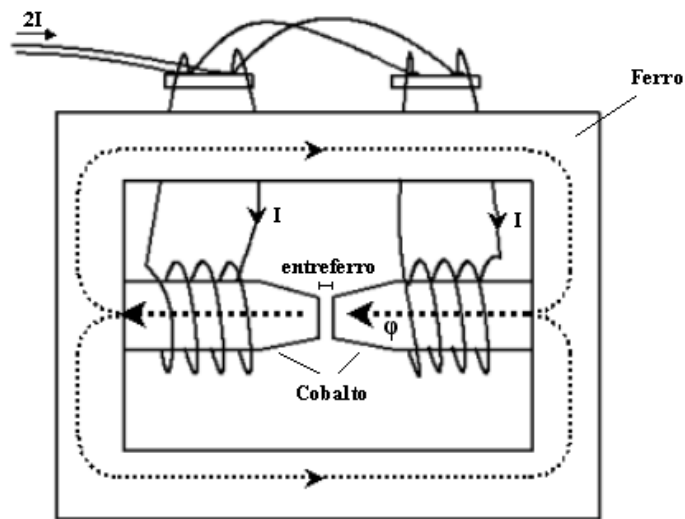


Figura 2: Circuito magnético representativo de um Eletromagneto

É visto na figura 2 que o fluxo magnético (ϕ) produzido pela corrente que atravessa as bobinas respeita a regra da mão direita. Além disso, é visto que as bobinas são alimentadas com ligação em paralelo, atravessando uma corrente I em cada uma. Para se controlar o fluxo no entreferro, o valor de I pode ser ajustado.

Considerando que o circuito magnético representado na figura 2 está operando fora da região de saturação é possível representá-lo como uma fonte de f.m.m. conectada a várias relutâncias magnéticas, analogamente aos circuitos elétricos. Portanto, para o circuito magnético da figura 2, tem-se a representação apresentada na figura 3.

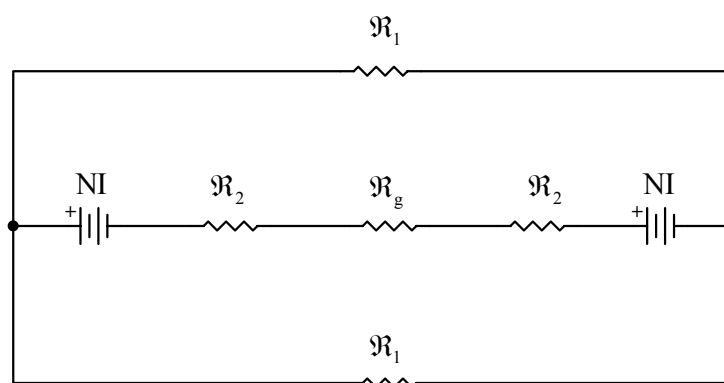


Figura 3: Circuito elétrico análogo considerando as relutâncias.

Na figura 3 \mathfrak{R}_1 é a relutância do ramal externo do circuito magnético, \mathfrak{R}_2 é a relutância da placa polar, \mathfrak{R}_g é a relutância do entreferro e NI é a f.m.m. produzida por cada bobina, tal que a soma de ambas resulte em $2NI$.

Utilizando o circuito da figura 3, segundo a lei das malhas de Kirchoff é possível obter as seguintes equações:

$$\begin{aligned} NI - \varphi\mathfrak{R}_2 - \varphi\mathfrak{R}_g - \varphi\mathfrak{R}_2 + NI - \frac{\varphi}{2}\mathfrak{R}_1 &= 0 \\ 2NI - 2\varphi\mathfrak{R}_2 - 2\varphi\mathfrak{R}_g - 2\varphi\mathfrak{R}_2 + 2NI - \varphi\mathfrak{R}_1 &= 0 \\ 4NI - 4\varphi\mathfrak{R}_2 - 2\varphi\mathfrak{R}_g - \varphi\mathfrak{R}_1 &= 0 \\ 4NI &= 4\varphi\mathfrak{R}_2 + 2\varphi\mathfrak{R}_g + \varphi\mathfrak{R}_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Considerando que as áreas de seção transversal não variam nas diversas partes que compõem o circuito e desprezando o fluxo disperso então a partir da equação 3 é possível obter:

$$\varphi = 2B_1S_1 = B_gS_g = B_2S_2 \quad (9)$$

Sabe-se que a relutância pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu S}.$$

A partir dela, conhecendo as propriedades do material e considerando que o circuito opera sem saturação, obtém-se as relutâncias das diversas partes do circuito como segue:

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{\ell_1}{\mu_1 S_1}, \quad (10)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{\ell_2}{\mu_2 S_2}, \quad (11)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_g S_g}. \quad (12)$$

Substituindo convenientemente (9), (10), (11) e (12) em (7) e ainda considerando que o material que compõe o núcleo é o mesmo ($\mu_1 = \mu_2$) é possível obter:

$$B_g = \frac{4\mu_0\mu_1 NI - \mu_0 B_1 \ell_1 - 4\mu_0 B_2 \ell_2}{2g\mu_1}. \quad (13)$$

A equação 13 demonstra que B_g (indução magnética no entreferro) pode ser obtida a partir de uma de uma equação envolvendo 5 variáveis (I, μ_1, B_1, B_2 e g). No entreferro, H_g possui relação diretamente proporcional a B_g , esta relação é vista como segue:

$$B_g = \mu_0 H_g, \quad (14)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

A partir de (13) e (14) é finalmente é obtido:

$$H_g = \frac{4\mu_1 NI - B_1 \ell_1 - 4B_2 \ell_2}{2g\mu_1}. \quad (15)$$

O resultado da equação 15 é importante, pois demonstra que H_g pode ser obtido indiretamente a partir da divisão simples de B_g por μ_0 . Este procedimento será utilizado nos capítulos 4 e 5 na determinação do campo magnético durante o experimento. Por simplicidade a partir de agora H_g e B_g serão chamados respectivamente de H e B .

2.3) Curvas B_m vs. H típicas dos materiais estudados:

Esta seção apresenta algumas curvas B_m vs. H estudadas. Estas serão obtidas a partir de um modelo matemático e são geradas com o uso de um *script* em Matlab [2], onde foram feitas algumas adaptações necessárias no código original, conforme apresentados no anexo A. Estes resultados teóricos irão estabelecer uma idéia do que será apresentado no trabalho.

2.3.1) Curvas B_m vs. H no ar.

As curvas B_m vs. H no ar possuem relação linear entre B_m e H e portanto não apresentam histerese magnética, conforme visto na equação 14. A inclinação dessa curva é próxima da permeabilidade magnética no vácuo (μ_0), por essa razão a permeabilidade magnética do ar será considerada igual a do vácuo. Na prática da engenharia elétrica este gráfico não possui nenhuma serventia que justifique sua obtenção, contudo foi útil para análise dos primeiros resultados desse trabalho, tanto para o SGPIB como para o SPAD.

Pode ser vista na figura 4 uma curva B_m vs. H teórica no ar. Esta curva foi gerada através do programa de simulação [2], para exemplificar uma curva que seria obtida por meios experimentais. Portanto, essa simulação pretende fazer uma réplica de uma curva B_m vs. H a partir de uma corrente com amplitude $\pm 70A$ aplicada no eletromagneto, tal que os pólos fossem ajustados para se obter um entreferro de 1pol (2,54cm).

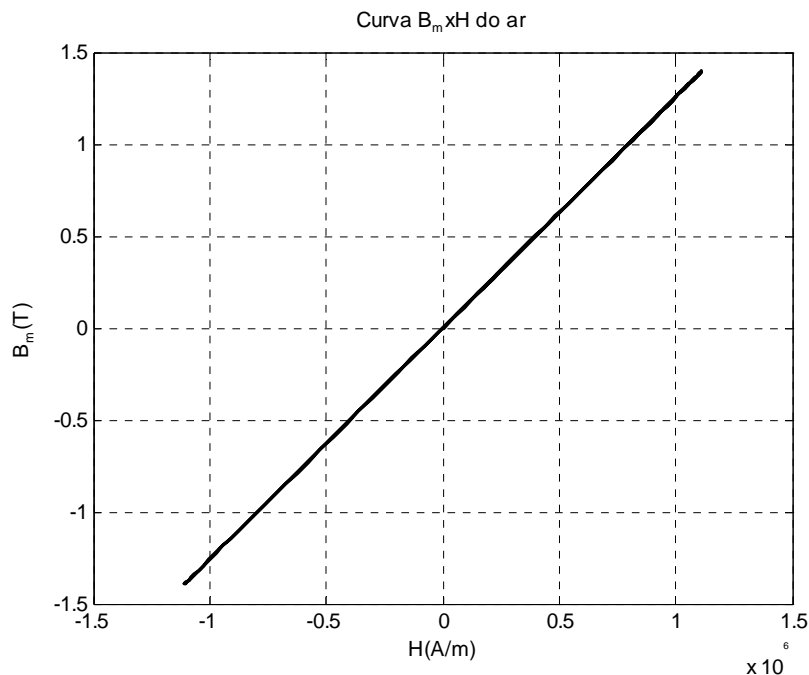


Figura 4: Curva B_m vs. H teórica no ar para a aplicação de corrente variante $\pm 70A$ e entreferro de 1 pol

O levantamento desta curva será útil para realizar as comparações comentadas no penúltimo parágrafo, onde μ_0 será obtido experimentalmente.

Outras informações que também serão bastante úteis para análise são os gráficos de B_m e H em função do tempo. No ar esses gráficos deverão ser idênticos quanto ao formato, com a diferença que a amplitude de B_m é μ_0 vezes menor que H . Para essa simulação, H aplicado foi considerado próximo de uma função senoidal como ilustrada na figura 5, obtido a partir da função $\sin(x)$ do Matlab. Não se tomou nenhuma providência de programação em relação as possíveis saturações que ocorreriam caso este sinal fosse obtido na prática com o uso de um dos sistemas. As curvas de H aplicado e B_m , obtidos a partir da simulação, são apresentados nas figuras 5 e 6.

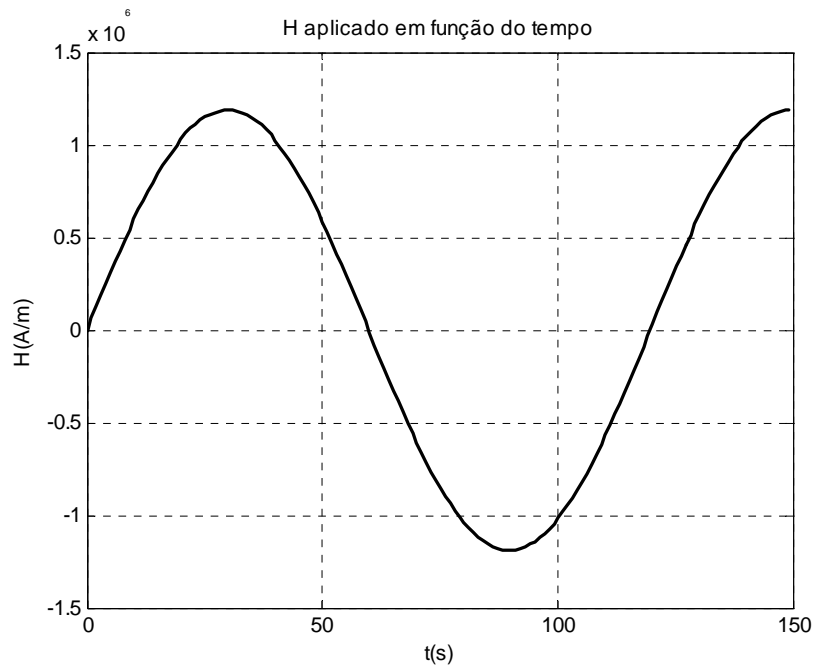


Figura 5: Campo magnético em função do tempo

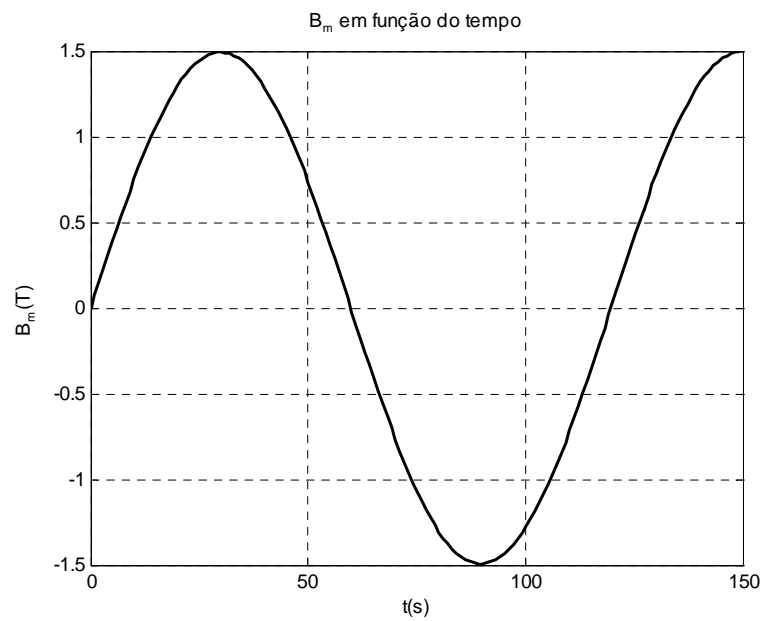


Figura 6: Indução magnética em função do tempo

Pode ser observado que os gráficos das figuras 5 e 6 foram simulados tal que o eixo das abscissas fosse um vetor de tempo de 150 segundos totalizando um período (120s) mais a quarta parte deste. Esta simulação foi feita desta forma, pois o tempo de obtenção de H e B_m no ar

experimentalmente tiveram duração real de 150 segundos na maioria das vezes. Será elucidado, posteriormente, o comportamento no tempo que H e B_m deverão assumir e qual a influência que o tempo exerce no SGPIB e no SPAD.

2.3.2) Curvas de histerese de materiais ferromagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos, mesmo em baixa presença de campo, possuem a habilidade de reter energia magnética em seu interior, podendo ser usados em fontes de f.m.m.. Suas aplicações são fundamentais na construção de motores, geradores, relés, transformadores, eletromagnetos, etc. Existem poucos elementos da tabela periódica que podem ser considerados ferromagnéticos, o ferro, o níquel, o cobalto e alguns elementos da família dos lantanídeos possuem essas propriedades. Com o avanço da tecnologia, ligas contendo esses elementos foram desenvolvidas, além disso, técnicas construtivas e estudo estrutural das moléculas de materiais ferromagnéticos permitem que máquinas sejam continuamente otimizadas em diversas aplicações [1].

Na figura 7 pode-se observar uma curva de histerese de um material ferromagnético típica onde foram postos em destaque os pontos principais de interesse.

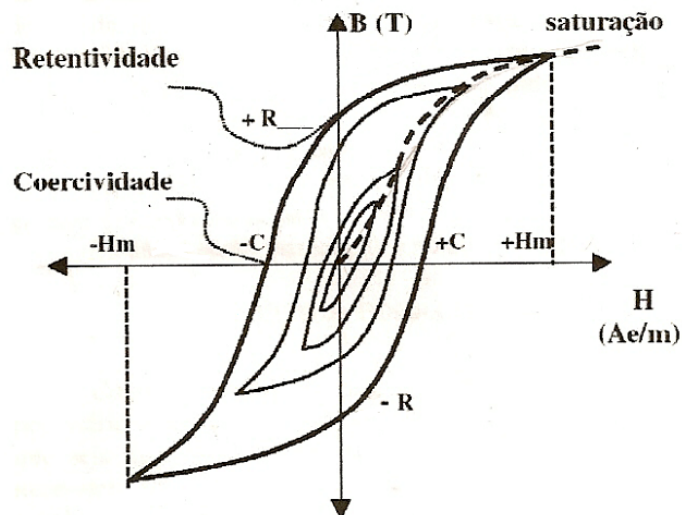


Figura 7: Curva de histerese típica de material ferromagnético, incluindo os pontos principais.

Segundo D. Jiles [1], os pontos em destaque na figura 7 podem ser definidos como:

Retentividade: É a mais conhecida propriedade magnética dos materiais, pois é comum utilizar-se de materiais ferromagnéticos imantados para utilizar suas propriedades em diversas aplicações. Uma vez que o material seja exposto a um campo magnético, ele pode ter a capacidade de reter magnetização sempre que o campo magnético é removido, em outras

palavras, retentividade é o ponto de indução magnética remanente no material quando o campo aplicado voltar a ser nulo.

É com essa propriedade que podem ser distinguidos materiais ferromagnéticos em relação aos paramagnéticos, pois este último não pode manter a magnetização quando o campo é removido.

Coercividade: É a aplicação do campo magnético necessário para que um ímã seja desmagnetizado até a nulidade. Este ponto é extremamente dependente da condição da amostra, é afetado por fatores, tais como calor e deformidade. Um material que possui alta coercitividade é mais difícil de ser desmagnetizado e são chamados ferromagnetos duros e os de baixa coercitividade são chamados ferromagnetos moles.

Saturação Magnética: É a condição pela qual todo o material ferromagnético está totalmente magnetizado para determinada entrada de campo magnético, nessa situação, todos os dipolos magnéticos estão alinhados na mesma direção do campo aplicado, portanto o material está totalmente saturado.

Alguns valores típicos de saturação de materiais são apresentados na tabela 1:

Material	Magnetização de saturação ($\times 10^6 A m^{-1}$)
Ferro	1,17
Cobalto	1,42
Níquel	0,48
78 permalloy (78% Ni e 22% Fe)	0,86
Supermalloy (80% Ni, 15% Fe e 5% Mo)	0,63
Metglas 2605 ($Fe_{80}B_{20}$)	1,27
Metglas 2615 ($Fe_{80}B_{16}C_3B_1$)	1,36
Permendur (50% Co e 50% Fe)	1,91

Tabela 1: Valor da magnetização de saturação de materiais ferromagnéticos [1].

Permeabilidade magnética relativa: É a mais importante propriedade magnética destes materiais. Nos materiais ferromagnéticos esta permeabilidade é bastante elevada podendo ser até milhares de vezes maiores que a do vácuo, todavia estes valores não são constantes quando esses materiais são submetidos a um determinado campo. É comum atribuir os valores máximos de

permeabilidade relativa dos materiais ferromagnéticos pela parte mais inclinada da curva de histerese, que é definida pelo ponto de coercividade.

Podem ser observados na tabela 2 alguns parâmetros importantes de alguns materiais ferromagnéticos, onde μ_{2T} é a permeabilidade magnética do material para uma indução magnética de 2T, μ_{max} é a máxima permeabilidade magnética, B_s é a indução magnética de saturação, W_H é a perda de energia que corresponde à área do laço de histerese e C é o campo magnético aplicado que resulta o ponto de coercividade.

Material	μ_{2T}	μ_{max}	B_s (T)	W_H (J m ⁻³)	C (A/m)
Ferro purificado	5000	180000	2,15	30	4
Ferro	200	5000	2,15	500	80
Ferro carbonila	55	132	2,15	-	-
Aço lamin. a frio	180	2000	2,1	-	144
Ferro 4% Silício	500	7000	1,97	350	40
45 Permalloy	2500	25000	1,6	120	24
Hiperrik	4500	70000	1,6	22	4
Monimax	2000	35000	1,5	-	8
Sinimax	3000	35000	1,1	-	
78 Pemalloy	8000	100000	1,07	20	4
Mumetal	20000	100000	0,65	-	4
Supermalloy	100000	800000	0,8	-	0,16
Permendur	800	5000	2,45	1200	160
2V Permendur	800	4500	2,4	600	160
Hiperco	650	10000	2,42	-	80
Ferroxcube	1000	1500	2,5	-	8

Tabela 2: Principais parâmetros de materiais ferromagnéticos [1].

Temperatura de Curie: Todos materiais ferromagnéticos quando suficientemente aquecidos em elevadas temperaturas tornam-se paramagnéticos. A temperatura de transição, que realiza esta mudança de comportamento, é chamada de temperatura de Curie. Nesta temperatura a permeabilidade do material cai repentinamente e ambas coercividade e remanência tornam-se nulas.

Material	Temperatura de Curie (°C)
Ferro	770
Níquel	358
Cobalto	1130
Gadolíneo	20
Terfenol	380-430
Nd ₂ Fe ₁₄ B	312
ALnico	850
SmCo ₅	720
Sm ₂ Co ₁₇	810
Ferrites duras	400-700
Bário Ferrites	450

Tabela 3: Valores de temperaturas de Curie para materiais ferromagnéticos [1].

Para caracterizar os diversos valores de permeabilidade magnética em cada ponto para dada aplicação de campo magnético, faz-se necessário traçar a curva B_m vs. H do material a ser estudado.

Para servir de exemplo será mostrada uma curva teórica de histerese do ferrite para uma entrada senoidal de intensidade de campo, conforme feito por L. A. L. De Almeida *et al* [2]. O material estudado foi o ferrite MnZn de referência 3c15 fabricado pela empresa Ferroxcube[3]. O código completo feito em Matlab que simula a curva de histerese dessa amostra é apresentado no anexo A.

Pode ser observado na figura 8, que à medida que H é aumentada, os domínios magnéticos começam a se alinhar como campo até que seja atingida a saturação. Quando é invertida a polaridade do campo aplicado, B_m não acompanha mais sua trajetória, ficando atrasada. É esse o fenômeno que se dá o nome de histerese magnética. As curvas do campo magnético em função

do tempo para este ferrite, podem ser vistas na figura 9. O tempo mostrado (150s) não possui qualquer vínculo com o tempo decorrido durante a simulação da curva, contudo quando estas curvas são obtidas experimentalmente, o tempo de obtenção das amostras é real.

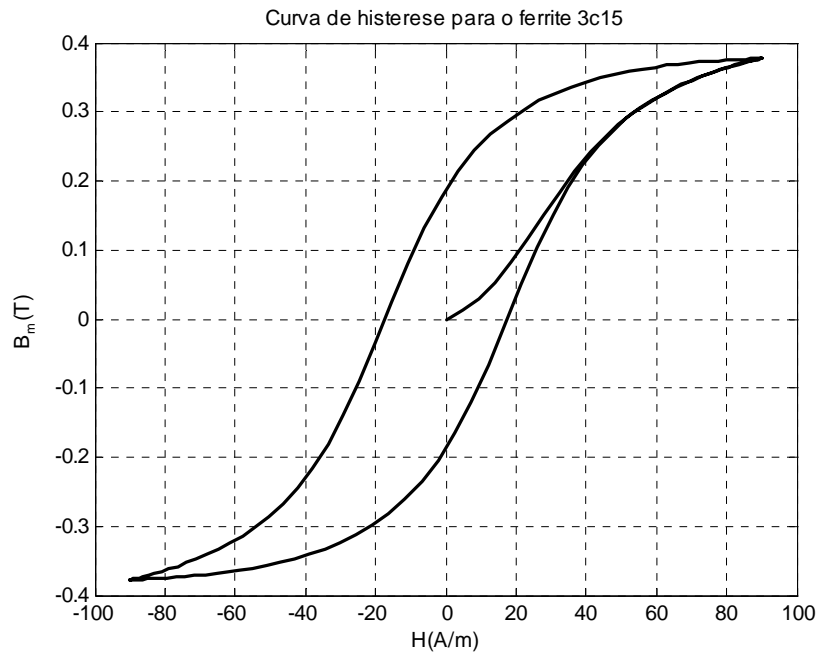


Figura 8: Curva de histerese do ferrite 3c15.

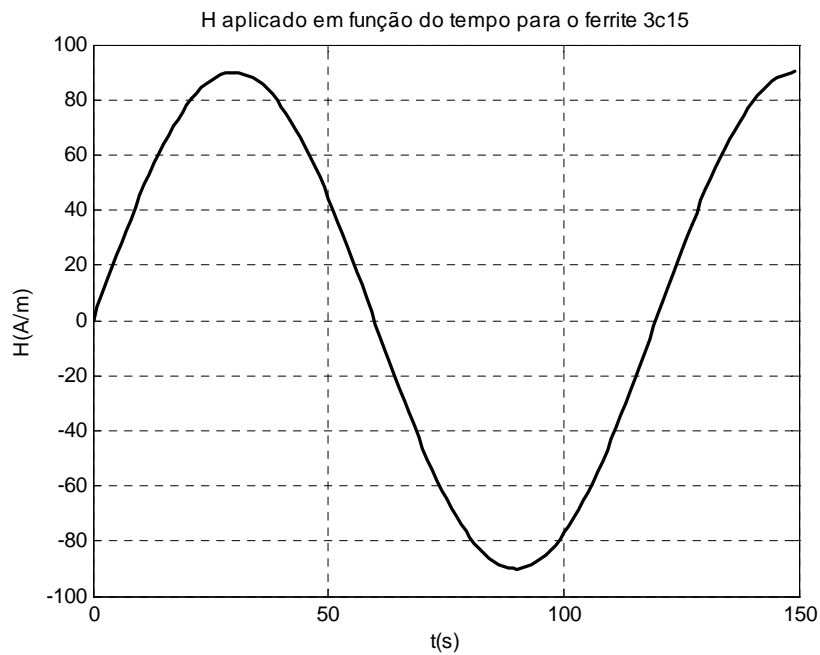


Figura 9: Campo magnético em função do tempo para o ferrite 3c15.

Pode ser observado que os pontos que tocam os eixos das abscissas do gráfico de B_m vs. t (figura 10), estão atrasados em relação aos pontos que tocam as abscissas do gráfico H vs. t (figura 9), traduzindo de forma mais clara o que foi dito anteriormente. As figuras 9 e 10 também permitem observar que para obter-se um laço completo da curva de histerese é necessária a simulação de no mínimo um período acrescido de mais um quarto de período. Este procedimento foi utilizado na obtenção das curvas obtidas experimentalmente, com a diferença que o campo é obtido a partir do eletromagneto e não possui formato senoidal.

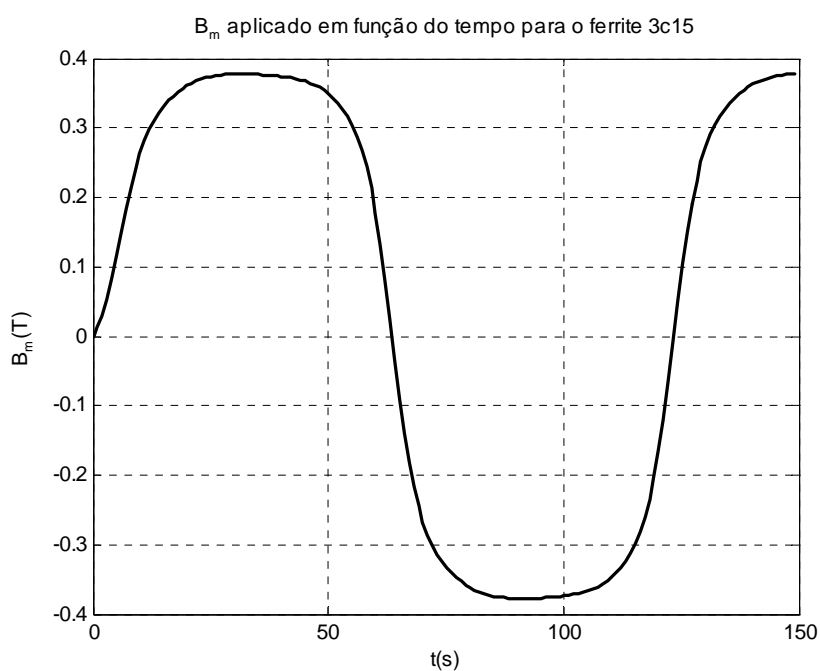


Figura 10: Indução magnética em função do tempo para o ferrite3c15.

Capítulo 3- Apresentação e configuração dos equipamentos

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados neste trabalho, onde é pretendido estabelecer uma idéia geral para que os sistemas sejam entendidos. As demais informações de cada equipamento encontram-se em seus respectivos manuais. Alguns dispositivos foram construídos para que fossem atendidas as necessidades do SGPIB ou do SPAD, estes serão devidamente apresentados nos capítulos 4 e 5.

A maioria dos equipamentos envolvidos são bastante caros e sujeitos a serem danificados com a má operação, portanto há necessidade de posicioná-los adequadamente para que pudessem ser facilmente operados e permitir desligá-los em caso de emergência. Para que possam ser visualizados os arranjos dos equipamentos em cada sistema, serão construídos nos capítulos 4 e 5, esquemas que mostram a comunicação entre os equipamentos em cada caso. Os itens subsequentes serão divididos conforme a utilidade dos equipamentos em cada sistema.

3.1) Equipamentos comuns aos dois sistemas.

3.1.1) Eletromagneto (modelo EM4-HV LakeShore) [4].

Eletromagnetos são equipamentos constituídos basicamente de um circuito magnético padronizado para uso em diversas aplicações experimentais. O eletromagneto utilizado é mostrado na figura 10.

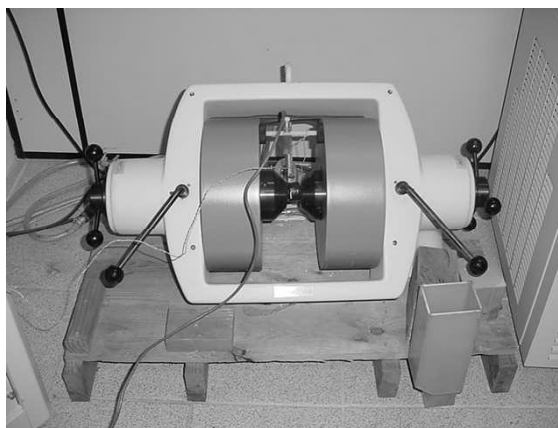


Figura 10: Eletromagneto utilizado nos sistemas implementados.

Este equipamento pode ser aplicado em medidas de susceptibilidade, estudos sobre efeito Hall, estudos de histerese magnética, demonstração do spin de ressonância magnética e estudos biológicos. Seu princípio de funcionamento é baseado no circuito magnético mostrado no item

2.3. Geralmente o material empregado na produção desses pólos é o permendur por ser uma liga de baixa coercividade, por essa razão há poucas perdas por histerese e correntes parasitas. São construídos com a finalidade de produzir campo magnético, gerados de acordo com a entrada de corrente em suas bobinas e de acordo com a variação do entreferro entre seus pólos ajustáveis. Os pólos do eletromagneto são duas peças cilíndricas chanfradas na extremidade, podendo ter o espaçamento (entreferro) ajustado manualmente. Para haver fixação existem duas alavancas que evitam um encontro forçado dos pólos por atração magnética, o qual poderia danificá-los. Cada uma das peças polares é envolvida por uma bobina, responsável pela produção de f.m.m., resultante de uma corrente elétrica que flui pela mesma. Esta f.m.m. produz um fluxo magnético que passa pelo circuito do eletromagneto gerando uma indução eletromagnética na bobina que situa-se na região de entreferro.

Para que seja atravessado pela corrente mencionada, o eletromagneto está conectado diretamente a uma fonte de corrente, que será apresentada na seção 3.1.2. Esta corrente gera dissipação por efeito joule, com isso, para manter uma temperatura adequada no eletromagneto, existe um sistema de arrefecimento para as bobinas (*chiller*) que será apresentado na seção 3.1.3.

Segue abaixo algumas especificações técnicas do eletromagneto modelo 622:

- ✓ gap variável em até 10,2cm (4 pol),
- ✓ temperatura de operação máxima de 60°C,
- ✓ 5082 espiras por bobina,
- ✓ 0,96 Ω por bobina em temperatura de operação,
- ✓ 5,1cm (2 pol) de face polar,
- ✓ corrente de operação ($\pm 70A$),
- ✓ tensão de operação ($\pm 35V$),
- ✓ potência aparente (2,4 kVA),
- ✓ massa (201.9 kg).

Na figura 11 podem ser vistos exemplos de curvas de indução magnética em função da corrente aplicada, onde vários valores distintos de entreferro são considerados. Repara-se nesta figura que o núcleo vai atingindo a saturação conforme o aumento da corrente, isto deve-se à não linearidade explicada pelo fato de haver interdependência entre a permabilidade do material

(μ_1) e a indução magnética em cada ramo do circuito magnético (B_1 e B_2), verificados na equação 13.

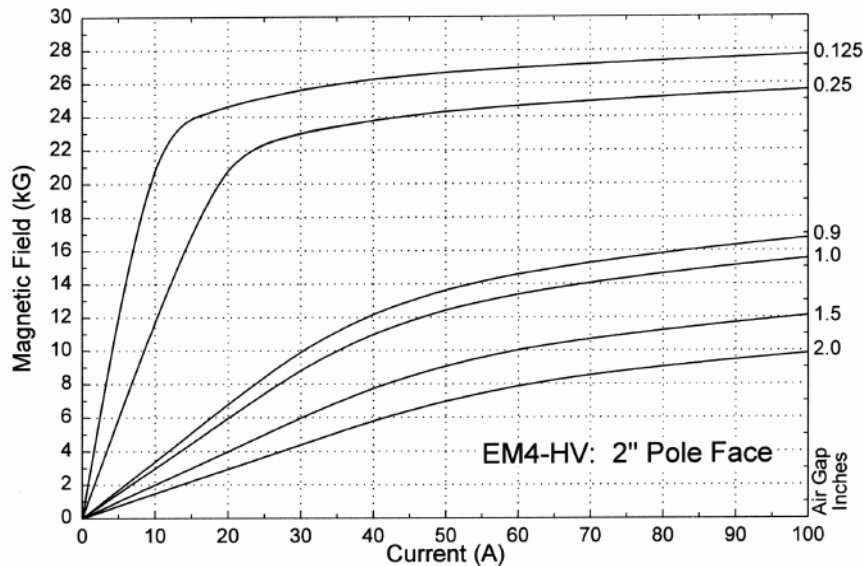


Figura 11: Curva HxI do eletromagneto utilizado, para diversos entreferros em polegadas [4].

3.1.2) Fonte de corrente (modelo 662 da plataforma LakeShore) [5].

A fonte de corrente utilizada nos sistemas implementados (figura 12) é analógica e tem capacidade de fornecer uma corrente elétrica estável, que pode variar de entre $\pm 70A$. É importante frisar que a carga que pode ser acoplada a fonte deve ter impedância mínima de $0,35\Omega$, pois abaixo desse valor a fonte pode sofrer avarias. Como esta fonte também dissipa grande quantidade de calor por efeito joule em seu circuito torna-se necessário utilizar um sistema de arrefecimento com água. Para as conexões hidráulicas são usados dois engates tubulares de 10mm de diâmetro, numa vazão de 6 litros por minuto, onde o da direita é a entrada e o da esquerda é a saída. A água que atravessa o circuito tubular deve estar em uma temperatura mínima de $+11^{\circ}C$ e máxima de $+25^{\circ}C$, de forma a não haver condensação interna que danifique o equipamento.

Seu consumo de potência é menor que 4,5kVA e pode ser alimentado da seguinte forma:

- ✓ trifásico aterrado 400V entre +6% e -10% , 50 ou 60Hz,
- ✓ trifásico aterrado 380V $\pm 10\%$, 50 ou 60Hz,
- ✓ trifásico aterrado 220V $\pm 10\%$, 50 ou 60Hz,
- ✓ trifásico aterrado 208V $\pm 10\%$, 50 ou 60Hz.

Nesse trabalho a tensão de alimentação da fonte adotada foi de 220V.

A fonte de corrente possui um painel frontal onde estão presentes suas funções principais. Pode ser controlada localmente (manuseada pelo painel) ou remotamente (controlada por um sinal externo), bastando apenas manobrar a chave seletora com esta função. Quando em funcionamento local os potenciômetros de ajuste de corrente (0-100% e 0-1%) estão habilitados, o ajuste de corrente pode ser visto no *display* do amperímetro do painel. Existe outro *display* do voltímetro ao lado que indica como a tensão varia em relação à carga de alimentação.

Outras funções disponíveis do painel frontal podem ser citadas:

- ✓ lâmpada indicadora de conexão,
- ✓ chave de *stand by*,
- ✓ botão de *reset*,
- ✓ voltímetro de 3,5 dígitos,
- ✓ amperímetro de 3,5 dígitos,
- ✓ botões de liga e desliga com indicadores luminosos,
- ✓ pontenciômetro limitador de tensão,
- ✓ seletor de polaridade da corrente,
- ✓ saída monitora de tensão proporcional a $\pm 10V$, para leitura de tensão de saída,
- ✓ saída monitora de corrente proporcional a $\pm 10A$, para leitura de corrente de saída,
- ✓ 13 leds indicadores de defeitos, avisos e faltas.

A fonte de corrente pode ser vista na figura 12.



Figura 12: Fonte de corrente utilizada nos sistemas implementados.

Quando a fonte está selecionada para operação remota, deve ser utilizada a entrada analógica localizada atrás da mesma. Utilizando essa entrada, a corrente da fonte é controlada por um sinal de tensão, podendo ser variada no intervalo entre -10 e 10V. A fonte de corrente responde proporcionalmente à entrada de tensão no limite nominal entre -70 e 70A. Este intervalo deve ser respeitado de forma a evitar danos à fonte. A operação remota é utilizada nos sistemas desenvolvidos neste trabalho.

Existem sensores de temperatura que acionam a proteção e evitam danos à fonte, quando por algum motivo não há arrefecimento. Outras proteções são acionadas quando ocorrem defeitos específicos. Qualquer contingência coloca a fonte em estado de *stand by* e um ou mais dos 13 leds presentes no painel indicam a razão do desligamento. Para voltar ao funcionamento normal o botão de *reset* deve ser pressionado.

A taxa de variação de corrente elétrica gerada na fonte deve ser limitada a 10A/s. Para tal o sinal de controle na entrada analógica não pode ter variação superior a 1,43V/s. Se for ultrapassada esta taxa, o funcionamento adequado da fonte de corrente não é garantido.

3.1.3) Sistema para arrefecimento (*Chiller*)[6].

Um sistema para arrefecimento tem a finalidade de eliminar o excesso de calor num meio onde se deseja manter uma determinada faixa de temperatura. Existe uma diversidade de tipos de *chillers*. Aqui é utilizado o tipo de arrefecimento por absorção cíclica. Para esse tipo de sistema, na maioria das vezes, é utilizada água como fluido trocador de calor. Todavia para evitar corrosão dos equipamentos, podem ser adicionados glicol e inibidores de corrosão. Outros fluidos, tais como oleos especiais refinados, também podem ser usados com essa finalidade. Não podem ser usados fluidos como água destilada e deionizada, pois pode ocorrer corrosão nos materiais que constituem os equipamentos envolvidos [7]. O *chiller* utilizado pode ser visto na figura 13.

Unidade	Alcance de temperatura	Estabilidade
M-75	+5°C até +35°C §	± 0.15°C §
***	***	***
Volume do reservatório	Vazão	Peso
1,9 ℓ	10,9 m ³ / min	91 Kg

§ estas especificações podem ser mudadas dependendo da aplicação feita; o alcance pode ser ajustado de -15°C até +90°C.

Tabela 4: Especificações técnicas da unidade M-75 Thermo NESLAB [6].

É usado nesse trabalho um *chiller* da empresa Thermo NESLAB da série Merlin, modelo M75 [6]. Algumas especificações desta série podem ser observadas na tabela 4.



Figura 13: Resfriador de líquidos (*Chiller*).

Os requerimentos elétricos para a unidade M-75 com padrão de baixa temperatura e frequência 60Hz são:

- ✓ bomba PD-2,
- ✓ tensão de 208–230V,
- ✓ corrente de 10.1A,
- ✓ plugue U tipo 6-15P.

Existem no painel principal as seguintes funções:

- ✓ um botão de liga-desliga,
- ✓ indicador de refrigeração em processo,
- ✓ um display indicador de temperatura da água que atravessa os tubos do circuito,
- ✓ botões setas de ajuste,
- ✓ botão de atualização,
- ✓ símbolos de termômetros que indicam, temperatura de fixação, mínima temperatura que aciona o alarme e máxima temperatura que aciona o alarme,
- ✓ símbolo de operação remota (opcional),
- ✓ botão liga-desliga alarme,
- ✓ um manômetro que monitora a pressão do líquido.

É mostrada na figura 14 a eficiência de remoção de calor em função da temperatura para a unidade M-75 e para os demais membros da série Merlin.

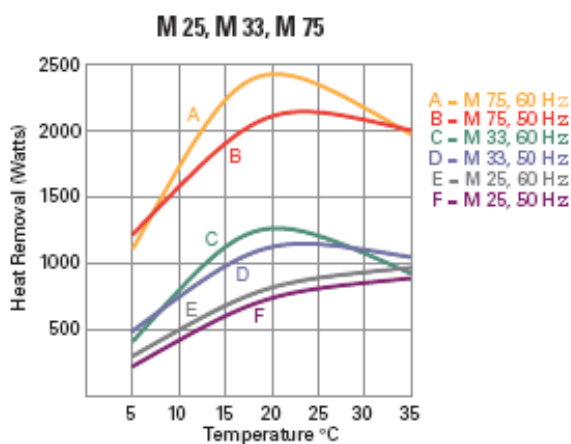


Figura 14: Eficiência de remoção de calor em função da temperatura para *chillers* da série Merlin.[6]

Sempre que for preciso o usuário pode alterar a temperatura da água circulante, bastando, para isso, pressionar o botão de atualização até que o primeiro símbolo que indica temperatura de fixação fique aceso. Logo após um dos botões com setas de ajuste devem ser pressionados ou para cima ou para baixo, quando atingir o valor desejado pressionar o botão de atualização novamente [6]. As demais funções podem ser alteradas de forma semelhante.

Um sinal sonoro é acionado quando a água circulante ultrapassa temperatura mínima ou máxima fixada, o sinal sonoro não será interrompido até haja uma diminuição da corrente na fonte de corrente e a temperatura volte ao seu limite inferior ou superior ou se pressione o botão que desliga o alarme.

3.2) Equipamentos utilizados no SGPIB.

3.2.1) Placa GPIB [8].

A placa GPIB (*General Purpose Interface Bus*) foi desenvolvida para viabilizar comunicação do microcomputador com equipamentos compatíveis ou possibilitar comunicação entre dois equipamentos compatíveis. Foi originalmente desenvolvida pela *Hewlett-Packard* (HP) dando o nome de HP-IB, mais tarde foi padronizada pela *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) como IEEE-488 para conectar e controlar instrumentos programáveis. Com isso foi possível estabelecer um padrão para comunicação entre instrumentos de diferentes fontes. Esta

interface ganhou popularidade rapidamente devida sua versatilidade e, mais tarde, a IEEE deu a ela outra nomenclatura, chamando-a simplesmente de interface GPIB [9].

Qualquer equipamento pode ser acoplado via GPIB, bastando simplesmente ter uma interface compatível. Sua função é simplesmente transferir dados, portanto não estão relacionados diretamente a qualquer função do instrumento por si próprio ou sobre o formato de seus dados. Explicando de outra forma, a função da placa é mediar informações entre os dispositivos compatíveis sem criar qualquer vínculo um com o outro. Cabe ao controlador enviar comandos para todos os equipamentos interligados na rede convertendo emissores ativos em receptores ativos e vice-versa.

Nesse trabalho um dos sistemas será controlado pela placa GPIB (SGPIB), onde são interligados: um microcomputador (controlador), um voltímetro e um gaussímetro. O funcionamento do sistema será apresentado no capítulo 4. A placa GPIB utilizada nesse trabalho foi de modelo PCI-GPIB IEEE 488.2Card 183617K-01 (*National Instruments*), que pode ser vista na figura 15.

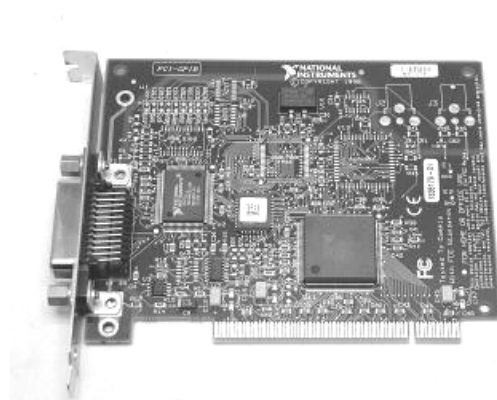


Figura 15: Placa GPIB utilizada em um dos sistemas implementados.

3.2.2) Multímetro HP 34401A [10].

O HP 34401A é um multímetro de $6\frac{1}{2}$ dígitos que permite fazer medidas de tensão, corrente, resistência, continuidade, decibéis e frequência com boa precisão e velocidade de medição. Nesse trabalho foram realizadas apenas medidas de tensão, portanto serão apenas apresentadas as funções de medidas de tensão nesse multímetro. As demais funções de medidas podem ser estudadas em seu manual [10]. Este multímetro pode ser visto na figura 16.

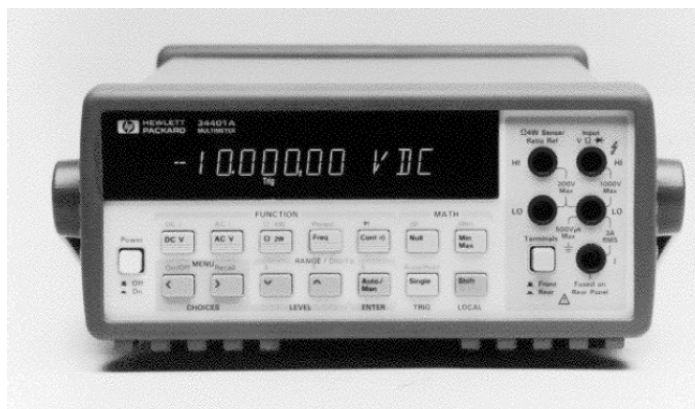


Figura 16: Multímetro HP 34401A utilizado no SGPIB [10].

A tabela 5 apresenta algumas especificações desse instrumento, onde aqueles destacados em negrito são os valores padrões do equipamento no momento que este é ligado.

Especificações de precisão $\pm(\%$ de leitura + $\%$ de alcance) ^[1]

Função	Alcance ^[3]	Frequência etc.	24 horas ^[2] 23°C ± 1°C	90 Dias 23°C ± 5°C	1 Ano 23°C ± 5°C	Coefficiente de Temperatura 0°C – 18°C 28°C – 55°C
Tensão DC	100,0000 mV		0,0030 +0,0030	0,0040 +0,0035	0,0050 +0,0035	0,0005 +0,0005
	1,000000 V		0,0020 +0,0006	0,0030 +0,0007	0,0040 +0,0007	0,0005 +0,0001
	10,00000 V		0,0015 +0,0004	0,0020 +0,0005	0,0035 +0,0005	0,0005 +0,0001
	100,0000 V		0,0020 +0,0006	0,0035 +0,0006	0,0045 +0,0006	0,0005 +0,0001
	1000,000 V		0,0020 +0,0006	0,0035 +0,0010	0,0045 +0,0010	0,0005 +0,0001
Tensão AC ^[4] True rms	100,0000 mV	3 Hz - 5 Hz	1,00 +0,03	1,00 +0,04	1,00 +0,04	0,100 +0,004
		5 Hz - 10 Hz	0,35 +0,03	0,35 +0,04	0,35 +0,04	0,035 +0,004
		10 Hz - 20 kHz	0,04 +0,03	0,05 +0,04	0,06 +0,04	0,005 +0,004
		20 kHz - 50 kHz	0,10 +0,05	0,11 +0,05	0,12 +0,04	0,011 +0,005
		50 kHz - 100 kHz ^[5]	0,55 +0,08	0,60 +0,08	0,60 +0,08	0,060 +0,008
		100 kHz - 300 kHz ^[6]	4,00 +0,50	4,00 +0,50	4,00 +0,50	0,20 +0,02
	1,000000 V para 750,000 V	3 Hz - 5 Hz	1,00 +0,02	1,00 +0,03	1,00 +0,03	0,100 +0,003
		5 Hz - 10 Hz	0,35 +0,02	0,35 +0,03	0,35 +0,03	0,035 +0,003
		10 Hz - 20 kHz	0,04 +0,02	0,05 +0,03	0,06 +0,03	0,005 +0,003
		20 kHz - 50 kHz ^[5]	0,10 +0,04	0,11 +0,05	0,12 +0,05	0,011 +0,005
		50 kHz - 100 kHz ^[5]	0,55 +0,08	0,60 +0,08	0,60 +0,08	0,060 +0,008
		100 kHz - 300 kHz ^[6]	4,00 +0,50	4,00 +0,50	4,00 +0,50	0,20 +0,02

[1] As especificações são para 1hr de aquecimento e 6 1/2 dígitos

[2] Relativo aos padrões de calibração.

[3] 20% acima do alcance para todos alcances exceto para 1000Vdc e 750Vac.

[4] Para entrada de onda senoidal >5% do alcance. Para entradas entre 1% e 5% do alcance e < 50kHz, adicionar 0,1% ao erro de alcance.

[5] O alcance de 750V é limitado para 100 kHz or 8×10^7 V-Hz.

[6] Tipicamente 30% do erro de leitura em 1MHz.

Tabela 5: Especificações do Multímetro HP 34401A. [10]

As especificações de precisão contidas na tabela 5 incluem fatores de correção que levam em conta os limites de operação do multímetro que são expressas em percentual de leitura mais

percentual de alcance (erro do multímetro), e devem ser adicionados aos valores medidos. Para determinadas condições de operação onde a temperatura ambiente encontra-se fora dos limites de temperatura e de acordo com os tempos de operação especificados, se faz necessário adicionar ao erro o coeficiente de temperatura relacionado à cada alcance no caso de medidas DC ou relacionado a cada frequência no caso de medidas AC.

Se por exemplo o alcance está fixado em 10V o multímetro pode medir um máximo inferior de 9,99999V, isto é, existem 6 dígitos de resolução. O multímetro pode também ultrapassar o alcance de 10V, podendo fazer medidas até no máximo 12,00000V, que contém 7 dígitos de resolução, isto corresponde a uma medida com $6\frac{1}{2}$ de resolução, onde o símbolo $\frac{1}{2}$ corresponde a 20% acima da capacidade de alcance no de 10V. Para ganhar tempo, as resoluções podem ser alteradas abaixo de $6\frac{1}{2}$ dígitos quando o usuário julgar necessário.

No painel frontal existem duas fileiras de botões que selecionam várias funções e operações. A maioria dos botões só serão habilitados quando forem pressionados em conjunto com o botão *shift*. Todos valores de tensão podem ser verificados no *display*. Vários ajustes para função voltímetro podem ser feitas, tais como, filtros, resolução, tempo de integração, autozero, alcance entre outros. Algumas desses ajustes podem ser inclusive feitos remotamente.

Este multímetro foi construído para poder funcionar com interface HP-IB (mesmo que GPIB ou IEEE-488) ou RS-232. Apenas uma interface pode estar habilitada a cada momento. Quando a interface escolhida é o HP-IB, três linguagens de programação podem ser escolhidas, SCPI, HP 3478A, ou Fluke 8840A, quando for escolhido RS-232, apenas a linguagem SCPI pode ser utilizada. Para funcionar remotamente basta escolher um único endereço no intervalo entre 0 e 31, para que seja reconhecido pela porta GPIB. O número de endereçamento padrão é 22. Nesse trabalho a interface escolhida foi a HP-IB, com linguagem SCPI e endereçamento padrão. Esta linguagem pode ser programada utilizando o Matlab que reconhece o multímetro como um emissor ativo, portanto todos seus comandos podem ser ativados. Será explicado na seção 4.3 do capítulo 4 como os equipamentos foram instalados e controlados via GPIB.

3.2.2) Gaussímetro (modelo 450 da LakeShore)[11].

Gaussímetros são equipamentos utilizados em medição de indução magnética. O modelo utilizado neste trabalho pode fazer medidas até 5 algarismos significativos, com baixo ruído em gauss ou tesla. O instrumento foi desenvolvido para fazer compensações de temperatura e campo

para melhorar sua performance. Opera em modo DC, RMS ou valor de Pico, tendo melhor precisão quando utilizado no modo DC. Com essas características este equipamento torna-se útil para mapeamento ou leitura de campo. Esse gaussímetro tem a capacidade de fazer até 18 leituras por segundo quando em *fast mode*, contudo para essa modalidade são desabilitadas as seguintes funções *Relative*, *Max Hold*, *Alarms* e *Autorange*. Quando em funcionamento no modo padrão cada amostra pode ser armazenada a cada 0.2 segundos, ou seja, a taxa de atualização é de 5 leituras por segundo, todavia não há restrição de comandos.

O painel frontal é munido de um *display* alfanumérico programável onde podem ser digitadas as funções desejadas manualmente pelo usuário. Citando exemplos, podem ser feitas calibrações quando o sensor está posicionado numa região, onde há campo magnético presente. Com a tecla *zero probe*, a tecla *Max hold* vai sendo atualizada até que retorne o máximo campo atingido e a tecla *Max reset* apaga este valor para que seja atualizado novamente pelo *Max hold*. O painel frontal desse equipamento é visto na figura 17.



Figura 17: Gaussímetro modelo 450 (painel frontal) [11].

Na parte de trás do equipamento existem saídas paralelas (IEEE-488) e saída serial (RS-232C) que servem para comando e intercâmbio de dados, sendo a máxima taxa de leitura feita com saídas do tipo IEEE-488 quando em *fast mode*, a saída RS-232C alcança até 15 leituras por segundo. Com a utilização de uma dessas saídas suas funções podem ser programadas através de operação remota pelo microcomputador.

Aqui foi utilizada a interface de comando IEEE-488, cujo endereçamento foi adequado para estabelecer comunicação entre os equipamentos. O gaussímetro funcionava como emissor (*talker*), portanto seus dados eram recebidos pelo controlador principal, isto é, o microcomputador. Sua comunicação foi mediada pelo Matlab, contudo também podem ser feitas linhas de comando com a linguagem *quickBASIC V4.0*. É verificado inclusive que no painel traseiro existem duas saídas analógicas (*Analog output*), munidas de conectores BNC. Essas são subdivididas em corrigidas (*corrected*) e monitor (*monitor*).

A saída corrigida gera um valor de tensão DC proporcional na mesma taxa de atualização que aparece no *display*. O valor no *display* é corrigido devido a não-linearidade do sensor Hall, *offset* e temperatura, porém uma desvantagem seria que estas medidas não são obtidas em tempo real, isto é, devido ao circuito corretor interno do gaussímetro é provocado um atraso na saída. Nessa saída podem ser gerados valores de campos proporcionais ao intervalo de tensão $\pm 3V$, os valores de campo podem ser alterados pelo usuário para intervalos dentro dos alcances estabelecidos pelo sensor Hall HSE.

A saída monitora opera em tempo real e seu intervalo proporcional é o mesmo que no modo anterior, contudo seu valor não é tão acurado como no modo corrigido. Seu erro aumenta conforme vai diminuindo o alcance da leitura das amostras e resultam erros de *offset* no instrumento de prova (sensor Hall). Esta saída também pode ser utilizada como controle de corrente com saídas que podem variar com intervalos de $\pm 3V$ ou $\pm 10V$. Este modo foi utilizado no sistema no princípio do SGPIB sendo fixado o valor de $\pm 10V$ internamente por um *jumper*.

A figura 17 apresenta o painel traseiro do gaussímetro onde são vistas as saídas que foram apresentadas nos três últimos parágrafos.

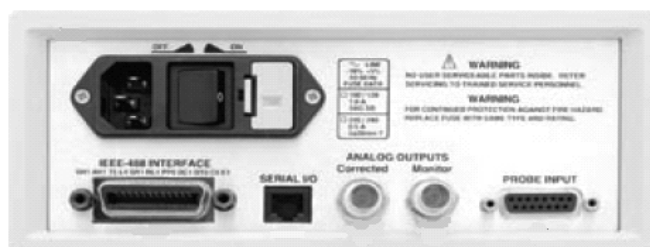


Figura 17: Gaussímetro modelo 450 (painel traseiro) [11].

Os valores medidos dependem diretamente do tipo de ponteira Hall utilizada. Aqui é usado o modelo HSE (*High Sensitivity Probe*). Os alcances e resoluções do gaussímetro podem ser vistos na tabela 6.

A ponteira Hall HSE utilizada nos sistemas é apresentada na figura 18.



Figura 18: Ponteira Hall HSE [11].

Gauss			Tesla		
Alcance	Resolução CA ou CC c/ filtro desligado	Resolução CC c/ filtro ligado	Alcance	Resolução CA ou CC c/ filtro desligado	Resolução CC c/ filtro ligado
±30 kG	±0.001 kG	±0.0001 kG	±3 T	±0.0001 T	±0.00001 T
±3 kG	±0.0001 kG	±0.00001 kG	±300 mT	±0.01 mT	±0.001 mT
±300 G	±0.01 G	±0.001 G	±30 mT	±0.001 mT	±0.0001 T
±30 G	±0.001 G	±0.0001 G	±3 mT	±0.0001 mT	±0.00001 T

Tabela 6: Alcances e resoluções do gaussímetro 450 [11].

3.3) Equipamentos utilizados no SPAD.

3.3.1) Placa PCI-1711 de aquisição de dados [12].

Este equipamento é controlado em tempo real pelo computador e tem dupla finalidade, gerar tensões de vários formatos através de suas saídas analógicas e receber dados de tensão por meio de suas entradas analógicas. É também munida de entradas digitais que não serão usadas neste trabalho. São apresentadas abaixo algumas especificações técnicas desse equipamento.

Entrada analógica:

- ✓ 16 canais Single-Ended,
- ✓ resolução de 12 bits,
- ✓ máxima taxa de amostras de 0,1 MS/s,
- ✓ tempo de conversão de 10 μ s,
- ✓ amplitude de entrada de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2,5V$, $\pm 1,25V$ e $\pm 0,625V$, para máxima resolução,
- ✓ máxima sobretensão de $\pm 15V$,
- ✓ impedância de entrada de $2M\Omega/5pF$.

Saída analógica:

- ✓ 2 canais,
- ✓ resolução de 12 bits,
- ✓ saída de referência interna de 0–5V e 0–10V,

- ✓ saída de referência externa de $0-xV$ e $0-xV$, onde x é um número real pertencente ao intervalo $-10 \leq x \leq 10$,
- ✓ impedância de saída de $0,81 \Omega$.

Esta placa pode ser controlada pelo programa *Advantech DLL Driver* incluído no CD-ROM fornecido pelo fabricante. Este programa funciona em conjunto com uma das linguagens Visual C++, Visual Basic, Delphi ou C++ Builder, à escolha do programador. O SIMULINK também pode ser utilizado no controle da placa, e como apresenta diversas vantagens (como implementação em diagramas de blocos), foi utilizado nesse projeto. É interessante citar que cada bloco de controle do SIMULINK é na verdade uma rotina de programação na linguagem C. Mais à frente serão vistos os diagramas de blocos utilizados neste trabalho. A figura 19 mostra a placa de aquisição de dados e seus demais componentes.

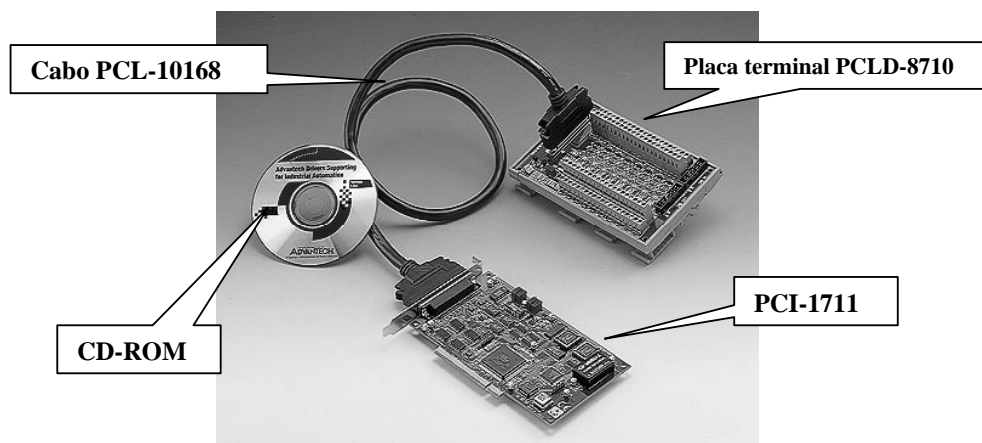


Figura 19: Placa de aquisição de dados e seus demais componentes [13].

O cabo PCL-10168 é um cabo reforçado especialmente construído para placas PCI da série 1710, seus conectores são bastante resistentes a ruídos, além disso, possuem fios de sinais internos com par trançado que reduzem mais ainda os ruídos provenientes de outras fontes.

A placa terminal PCLD-8710 possui uma borniera com 68 conectores com parafusos de fixação próprios para fios que conduzem os sinais a serem lidos. Uma vez que a placa seja instalada em um barramento PCI de um microcomputador, basta apenas fazer a instalação do software. Os procedimentos básicos de instalação desta placa podem ser entendidos com mais detalhes em R. N. Calvo [14].

3.3.2) Fonte de tensão [15]

Para poder alimentar os dispositivos de instrumentação no trabalho foi utilizada uma fonte digital composta de três fontes independentes no mesmo gabinete: sendo uma fonte fixa de 5V com capacidade de até 3A e duas fontes ajustáveis independentes que variam de 0 a 30V e com capacidade de 6A cada uma. As duas fontes ajustáveis podem trabalhar independentemente, podendo ser associados em série ou em paralelo. A fonte nesse trabalho é conectada em série para que seja possível ter uma alimentação simétrica de 12V e -12V, além disso, a alimentação de 5V também é utilizada.

A fonte de alimentação pode ser vista na figura 20.



Figura 20: Fonte de tensão.

As especificações são garantidas pelo fabricante por um período de 1 ano após a calibração, sendo válidas na faixa de temperatura compreendida entre 18°C à 28°C e umidade relativa do ar de 70%, sem condensação.

Podem ser vistas abaixo as especificações dessa fonte:

- ✓ alimentação de 127/220V (50/60Hz),
- ✓ dimensões e peso de 345X260X145 mm, 19Kg,
- ✓ modo de operação de no máximo 8h de uso contínuo,
- ✓ temperatura de operação 0° até 40°,
- ✓ proteção total contra curto circuito de saída e inversão de polaridade,
- ✓ regulação de tensão, regulação de linha $\leq 0,02\% +2\text{mV}$ (corrente $\leq 3\text{A}$) e regulação de carga $\leq 0,05\% +5\text{mV}$ (corrente $\leq 3\text{A}$),

- ✓ tempo de recuperação $\leq 100 \mu s$ (variação de 50% da carga, $> 0,5A$),
- ✓ *ripple* e ruído $\leq 1mV$ rms (5Hz a 1MHz, $\leq 3A$),
- ✓ coeficiente de temperatura $< 300ppm/^{\circ}C$.

3.4) Descrição do princípio de funcionamento do sistema de medida

Conforme apresentado no primeiro capítulo deste documento, tem-se como objetivo construir um sistema automático para o levantamento das curvas de magnetização de materiais ferromagnéticos. Esta seção tem como finalidade apresentar o funcionamento dos sistemas de medida que foram implementados. Portanto os tópicos abaixo tentam relacionar quais os passos adotados na montagem estrutural dos sistemas:

- ✓ Gerar um sinal de tensão que varie no intervalo de -10 a 10 volts, que controlará a fonte de corrente através da entrada analógica;
- ✓ A fonte de corrente irá gerar uma corrente proporcional ao sinal da entrada analógica variando entre -70 a 70 amperes;
- ✓ Com este sinal de corrente atravessando as bobinas do eletromagneto será gerada uma força magnetomotriz produzindo um fluxo no circuito magnético. O fluxo que atravessa o circuito produzirá entre os pólos, uma indução magnética proporcional a corrente elétrica, podendo até mesmo ser atingida a região de saturação do material do pólo;
- ✓ Entre estes pólos (entreferro) será colocado um sensor Hall, responsável pela medição de indução magnética homogênea (B) presente nessa região;
- ✓ Os dados de B são digitalizados e são transferidos para um microcomputador, em vetores do tipo *array*. Este resultado, dividido pela permeabilidade magnética no vácuo, fornece a intensidade de campo magnético (H) utilizada na curva de magnetização;
- ✓ Entre os pólos do eletromagneto também é colocada uma bobina construída com fio de cobre esmaltado, que envolve o material a ser testado;
- ✓ Devido ao fluxo magnético variante no tempo que passa pelos pólos do eletromagneto, a bobina que está no entreferro apresentará uma f.e.m. induzida entre seus terminais;
- ✓ Os dados desta tensão são aquisitados e digitalizados e são transferidos para um microcomputador, em vetores do tipo *array*;

- ✓ Os dados de tensão digitalizados serão integrados numericamente, para que a partir da equação 6 seja obtida a indução magnética média (B_m) no interior da amostra;
- ✓ Estes dados serão reproduzidos em diversas formas gráficas que servirão para interpretação das características magnéticas do material em estudo.

Deve ser enfatizado que o campo magnético será obtido pelo sinal digitalizado de indução magnética lido por um sensor Hall, com a aplicação da equação 14. Já o sinal de indução magnética é obtido pela integração do sinal da tensão induzida na bobina, aplicando a equação 6. Esta informação é importante para o entendimento de como os dados foram obtidos neste trabalho.

Capítulo 4 – Sistema de medidas utilizando interface GPIB (SGPIB)

O SGPIB foi o primeiro sistema de medidas implementado neste trabalho. Neste capítulo serão mostrados os equipamentos utilizados, os procedimentos de montagem, o seu funcionamento e os meios utilizados para sua implementação. Serão também discutidos os resultados obtidos e porque houve necessidade de utilizar uma nova implementação para o sistema de medida.

4.1) Equipamentos utilizados e procedimentos de montagem

Seguem abaixo todos equipamentos todos utilizados no SGPIB:

- ✓ placa de comunicação GPIB,
- ✓ gaussímetro modelo 450 com ponteria Hall modelo HSE,
- ✓ multímetro HP 34401A,
- ✓ chiller M75,
- ✓ fonte de corrente modelo 662,
- ✓ eletromagneto modelo EM4-HV,
- ✓ bobina com 100 ou 1000 espiras,
- ✓ microcomputador,
- ✓ gerador de funções HP modelo CFG253.

A figura 21 apresenta os equipamentos listados acima. Nesse sistema o gaussímetro e o multímetro têm a vantagem de comunicarem-se via GPIB e ambos podem ser controlados por uso de um microcomputador equipado com uma placa com esta porta. Estes equipamentos foram conectados um ao outro por um cabo IEEE-488, que permitiu estabelecer comunicação com o microcomputador. Outros equipamentos essenciais para o funcionamento do sistema eram a fonte de corrente e o eletromagneto. O circuito do eletromagneto foi conectado em paralelo com a fonte de corrente, de forma a ter no máximo 35V em seus terminais.

Para controle da fonte de corrente foi utilizada a saída analógica do gaussímetro modelo 450, interligados por um conector BNC. O gaussímetro também serviu para realizar medidas de indução magnética com auxílio do sensor Hall HSE, devidamente alocado entre os pólos do eletromagneto.



Figura 21: Equipamentos envolvidos no sistema SGPIB.

Foi utilizado como sensor de tensão induzida uma bobina com 100 espiras (figura 22) de fio de cobre esmaltado, cujos terminais foram soldados a fios de par trançado, para redução de ruídos.

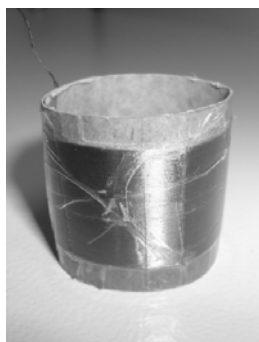


Figura 22: Bobina de 100 espiras.

Foi verificado que o número de espiras desta bobina mostrou-se insuficiente para medir o sinal de tensão induzida que apresentava amplitude na mesma magnitude do ruído. Portanto foi construída nova bobina com 1000 espiras, que apresentava tensão induzida 10 vezes maiores. Esta nova bobina é vista na figura 23.



Figura 23: Bobina de 1000 espiras.

Para efeito de teste, um gerador de funções foi utilizado para controlar a fonte de corrente. Desta forma o SGPIB teve dois tipos de configurações diferentes, cada um deles será explicado nos itens subsequentes.

4.2) Configuração inicial do SGPIB

É mostrado na figura 24 como os equipamentos estavam interligados inicialmente. Pode-se observar nesta figura que os equipamentos operam conforme a ordem lógica apresentada da seção 3.4. Nesta configuração foram feitos vários testes que permitiram verificar em primeiro lugar como funcionava o sistema. Para chegar-se mais rapidamente ao objetivo principal, evitou-se fazer testes com qualquer material no interior da bobina, possibilitando uma análise indireta dos resultados pelas curvas de magnetização obtidas no ar.

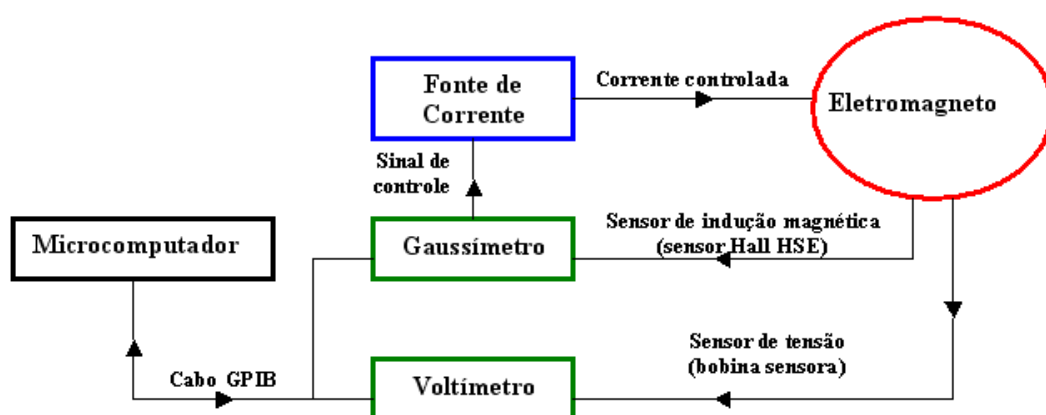


Figura 24: Configuração inicial do SGPIB.

4.3) Funcionamento do SGPIB

Os equipamentos compatíveis via GPIB podem utilizar a linguagem de programação *basic* ou *visual basic*, contudo nessa parte do trabalho foi possível comunicar os equipamentos via Matlab devido possuir um pacote com recursos de comunicação via GPIB. Para poder comunicar uma placa GPIB através dos pacotes de comandos do Matlab basta simplesmente utilizar o comando `obj=gpib('vendor',boardindex,primaryaddress)`, onde *vendor* significa acrescentar o código de um dos principais fabricantes de placas GPIB, *boardindex* significa acrescentar o índice da placa e *primaryaddress*, significa acrescentar o endereço primário desejado. Uma vez esse comando de comunicação estabelecido deve-se fazer um comando de abertura utilizando a linha de comando `fopen(obj)`.

A comunicação do gaussímetro e do multímetro foi feita conforme explicado acima utilizando as linhas de comando `gauss = gpib('ni',0,01)` e `mult = gpib('ni',0,20)`, onde 'ni' significa que o fabricante é a *National Instruments*, logo após são vistos os comandos `fopen (gauss)` e `fopen (mult)` que são os comandos de abertura dos instrumentos. O gaussímetro e o multímetro foram convenientemente identificados em endereços diferentes. Um laço *while* servia como *looping* para coleta das medidas e realização de alguns procedimentos numéricos. Todos os dados medidos pelos instrumentos eram digitalizados e armazenados numericamente em vetores de tipo *array*. A partir dos pontos contidos nesses vetores, os gráficos traçados permitiram visualizar e analisar os resultados.

O trecho principal do programa que digitaliza as medidas feitas pode ser visto em anexo B, indicado com uma seta. Este trecho já tinha sido parcialmente implementado quando foi assumido o trabalho, portanto a partir dele foram desenvolvidos métodos para aperfeiçoar os resultados, alterando ou acrescentando novos comandos compatíveis aos instrumentos de medição.

Para obter-se um laço completo das curvas B_m vs. H deve ser feito ao menos a leitura de 1 período e mais a quarta parte de período de cada sinal conforme visto no item 2.3.1., contudo um dos primeiros objetivos era observar o comportamento do sinal de indução magnética na primeira metade do período.

No princípio, a configuração descrita no item 4.2 foi respeitada, assim a corrente foi controlada pela saída analógica do gaussímetro, onde podia ser gerada uma rampa de tensão ascendente que

variasse entre 0V e 10V. Concomitantemente, a rampa de corrente era produzida pela fonte de corrente, e variava entre 0A e 70A.

4.4) Resultados do SGPIB.

4.4.1) Problemas de ondulação periódica no sinal de indução magnética.

Ao executar o trecho do programa, seguindo os quatro primeiros passos do algoritmo em 3.4., o sinal de indução magnética sofria uma intermitência periódica de origem desconhecida. Uma primeira tentativa de solução foi utilizar os comandos de controle do gaussímetro, referentes aos ajustes de sua configuração. Porém a ondulação persistia em períodos diferentes, conforme eram feitos novos ajustes. Foi descoberta que a origem desse problema era a incompatibilidade temporal do trecho de *looping* do programa (laço *while*). A cada passo do armazenamento de pontos, o contador de tempo (*dt*) era incrementado de forma incorreta, provocando as ondulações mencionadas. O procedimento que solucionou esse problema foi o ajuste do tempo de leitura de amostragem do programa respeitando a configuração padrão do gaussímetro, que era de 5 leituras por segundo. Isso quer dizer que cada leitura podia ser feita a cada 0,2 segundos. Com essa informação bastava-se fixar o valor de *dt* (incremento de tempo de leitura de cada amostra) do trecho principal do programa para valores que fossem proporcionais a 0,2s. O grau de liberdade para número de pontos ficou por encargo de *dx* (incremento de fração percentual de corrente) que podia ser ajustado conforme a quantidade de pontos desejados, contudo deveria ser respeitado à máxima taxa de variação da fonte de corrente $\frac{dx}{dt} (\%/s) < 14,28 (\%/s)$, ou seja, $0,1428 \times 70$, correspondente a $\frac{dx}{dt} < 10A/s$.

É sabido que qualquer laço de *looping* em um programa é executado imediatamente, e demandará mais ou menos tempo dependendo da velocidade de processamento do microcomputador e do número de iterações. Devido a essa condição, houve a necessidade de encontrar um comando que quantificasse temporalmente o *looping*. Para isso foi utilizado o comando *tic toc* cujo funcionamento imita um cronômetro de relógio em segundos. Este comando é iniciado com a linha de comando *tic*, e quando *toc*, como condicional do *while*, é habilitado, inicia-se o cronômetro em segundos. No programa, *toc* também é utilizado na condicional *if*.

Para ilustrar os resultados mencionados acima as figuras 25 e 26 apresentam várias rampas de B em função do tempo, para uma corrente de 0 a 35A. Nas figuras 25 e 26 é fixado o valor de dx em 0,5, e são utilizados diversos valores para dt . É importante salientar que cada rampa foi obtida separadamente e foram colocadas juntas, em um mesmo gráfico, apenas para fins comparativos.

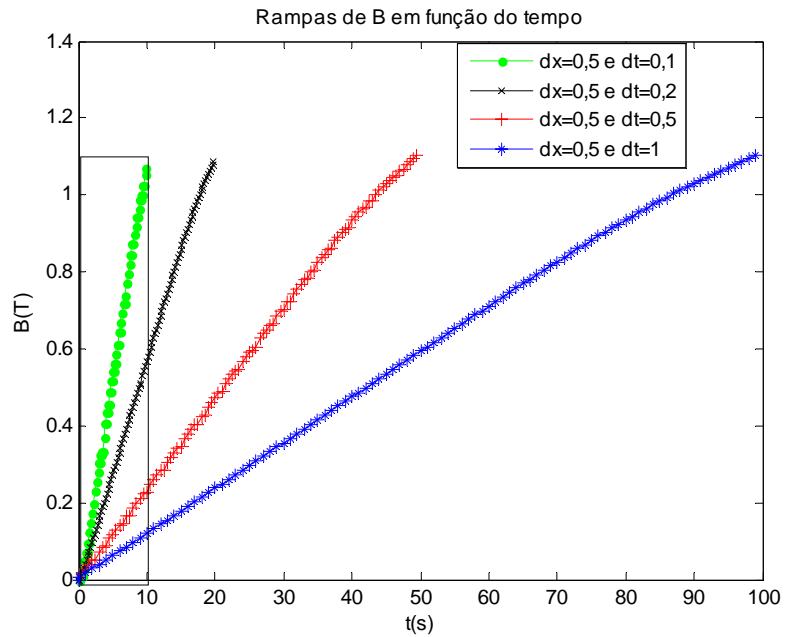


Figura 25: Rampa de B completa para diversos tempos de amostra.

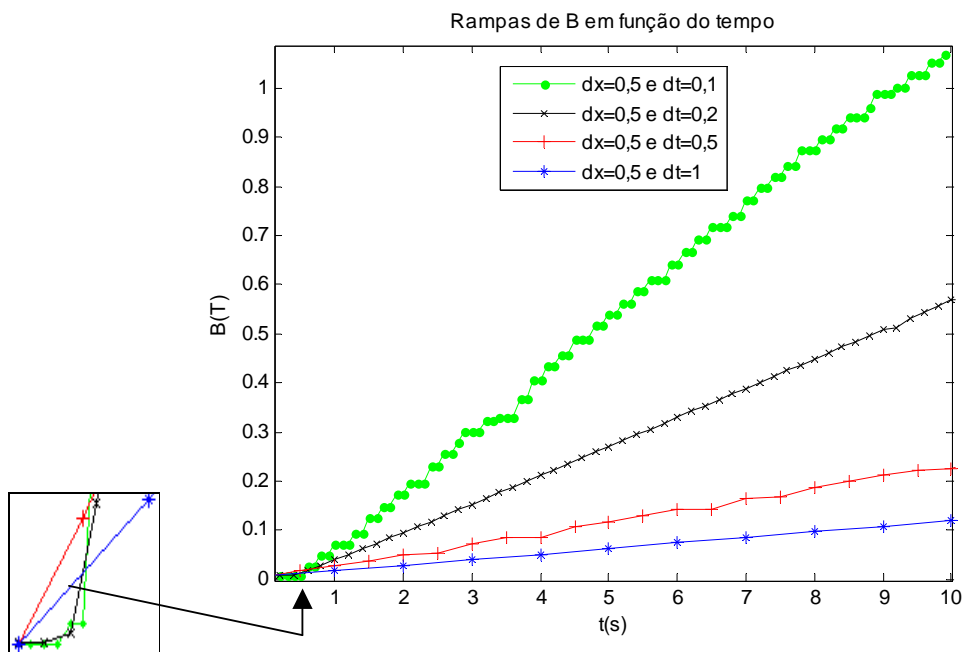


Figura 26: Ampliação da região em destaque da figura 25.

Várias considerações podem ser explanadas em relação às figuras 25 e 26:

- ✓ Na figura 25 todos os gráficos traçados possuem o mesmo número de pontos, diferenciando-se apenas na inclinação de B, pois o tempo de aquisição depende da razão dt/dx , como pode ser visto no trecho do programa no anexo B;
- ✓ Na figura 26, ampliação da região destacada por um retângulo da figura 25 mostra que conforme o aumento de dt , os pontos ficam mais esparsos;
- ✓ Também pode ser visto na figura 26 o erro mencionado para valores não múltiplos a 0,2 ($dt=0,1$ e $dt=0,5$);
- ✓ Pode ser visto em destaque na figura 26 que existe uma tendência das rampas mais inclinadas (mais rápidas) não partirem retilíneas desde a origem. Isto se explica pelo fato de haver um atraso da leitura de indução magnética do gaussímetro em relação à rampa de controle aplicada por esse próprio equipamento.

As figuras 27 e 28 apresentam, rampas de B, com diversos valores de dx , para valores fixados de dt .

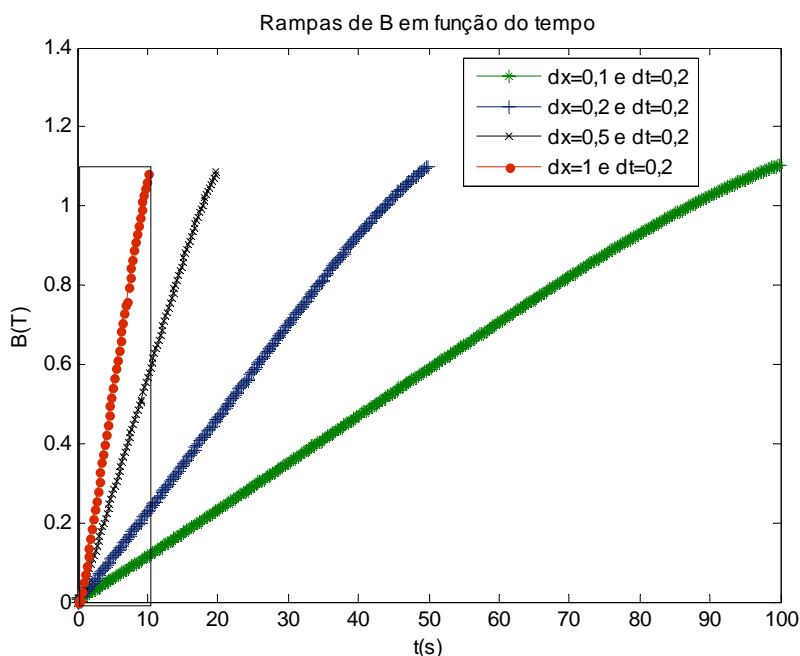


Figura 27: Rampa de B completa para diversos incrementos percentuais de corrente.

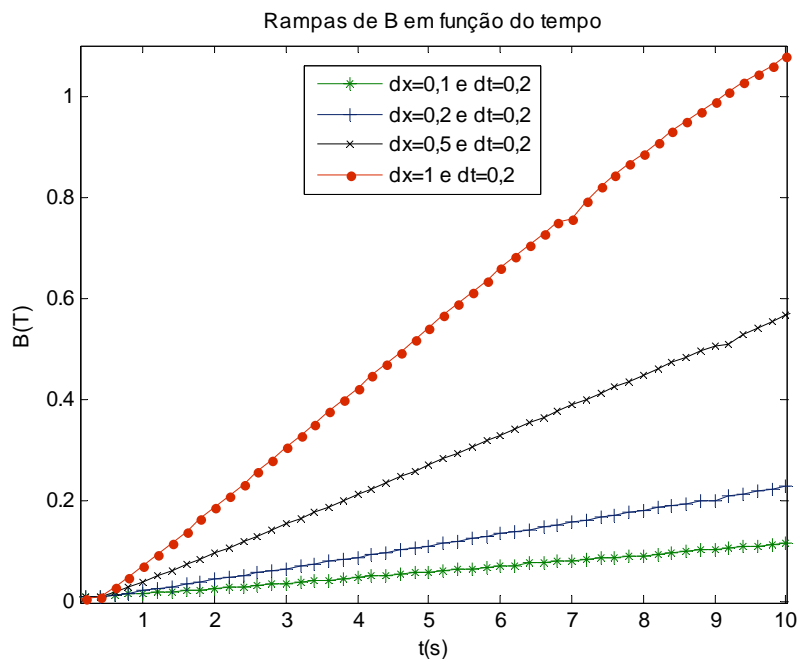


Figura 28: Ampliação da região em destaque da figura 27

Abaixo estão algumas considerações sobre estes resultados:

- ✓ Na figura 27 todos os gráficos traçados possuem número de pontos diferentes, pois agora são fixados os mesmos números de pontos para cada intervalo de tempo. O tempo de aquisição continua dependente da razão dt/dx ;
- ✓ Na figura 28, ampliação da região destacada por um retângulo na figura 27, é confirmado o que foi logo acima. Pode-se reparar que conforme é aumentado dx , qualquer intervalo de tempo possui o mesmo número de amostras;
- ✓ Como dt foi fixado em 0,2s é visto que não há qualquer erro de aquisição nos resultados, mesmo que sejam colocados outros valores de dx ;
- ✓ A princípio suspeitou-se que esta não linearidade devia-se ao campo de remanência contido nos pólos do eletromagneto na ordem de dezenas de mT, porém como já foi dito, ocorria na verdade, um atraso de leitura do gaussímetro em relação ao controle da fonte de corrente, havendo um deslocamento da rampa de indução magnética para a direita. Como este problema foi concluído posteriormente, este resultado era tido como satisfatório e foi ignorado naquele momento.

Até agora só foi explanado o método de obtenção dos pontos de indução magnética (B), necessária para produção dos dados de intensidade de campo (H). A seguir será apresentado como foi obtido o valor da indução magnética média (B_m) a partir da tensão induzida na bobina.

4.4.2) O ruído no sinal de tensão da bobina

Paralelamente aos resultados apresentados na seção anterior também era obtida a tensão induzida na bobina localizada no entreferro do eletromagneto. Apesar da rampa de indução magnética ter quase o formato de uma reta, não era gerada nos terminais da bobina sensora uma tensão constante, como seria esperado. No lugar disso apareciam sinais com muito ruído, concomitante a uma intermitência periódica. Quando integrados eram incapazes de produzir uma resposta coerente. As tensões induzidas na bobina sensora são apresentadas na figura 29 e foram obtidas no mesmo ensaio daquelas que foram mostradas na figura 27.

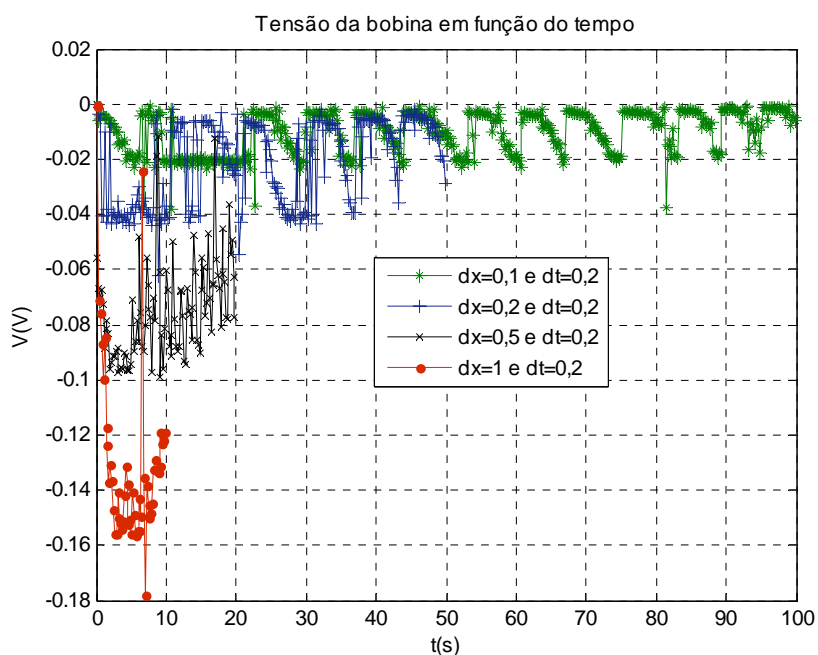


Figura 29: Tensão induzida na bobina obtida para cada incremento percentual de corrente

O comando AOCON é um código interno do gaussímetro que coordena a saída de controle de tensão em sua saída analógica, permitindo controlar a fonte de corrente em passos percentuais[11].

O incremento dx é um passo fixo que resulta uma rampa de corrente através de pequenos degraus, portanto em cada passo era gerada variação brusca de corrente nesse pequeno intervalo.

Foi utilizado um osciloscópio digital para verificar se isso realmente ocorria, no entanto essa variação brusca parecia imperceptível visualmente quando a rampa total gerada era observada. A variação de fluxo está diretamente ligada à variação corrente, e como a obtenção de tensão induzida segue a lei de Faraday, a derivação desse valor teoricamente produziria impulsos unitários, o que explica as medidas incoerentes de tensão feitas pelo voltímetro.

Mesmo com auxílio de recursos de comando, tanto do gaussímetro, quanto do multímetro não foi possível encontrar algum comando que resolvesse esse problema.

4.4.3) O ruído da rede Elétrica

Foi medida em um osciloscópio digital a tensão em uma tomada da rede elétrica, e foi percebido que havia um ruído de 1V de amplitude, suspeitou-se que esse poderia ser um dos motivos do ruído aleatório da tensão além daquele mencionado na seção 4.4.2. A tensão esperada nos terminais da bobina é da ordem de centenas de mili-volts o que significa dizer que o ruído da rede, era em torno, 15 vezes maior. Constatou-se que a rede elétrica que alimenta o laboratório não possuía aterramento adequado para a experiência. Então, foi feita a instalação do sistema de aterramento do laboratório, para que se permitisse a continuidade deste trabalho.

4.5) Nova configuração do SGPIB.

Devido aos problemas para se controlar a fonte de corrente a partir de uma rampa de tensão originada pelo gaussímetro, dados os motivos relatados na seção 4.4.2, buscou-se um outro equipamento que pudesse substituí-lo. Usando um gerador de funções HP modelo CFG253, foi produzida uma tensão triangular de baixa frequência, sendo esta agora a responsável pelo controle da fonte de corrente. Um ponto negativo é que esse gerador de funções não possui interface GPIB. A figura 30 ilustra como os equipamentos estavam agora interligados.

Houve o cuidado de ajustar-se uma rampa idêntica àquela produzida pelo gaussímetro quando funcionando até uma taxa máxima de 10A/s, limitada pela fonte de corrente. Porém, fazer o controle manual deste sinal com a precisão requerida não era uma tarefa muito fácil e confiável. Por essa razão não foi possível ajustar a corrente de forma que variasse em intervalo e amplitude simétricos.

Apesar desses entraves, esse novo sistema foi bastante útil para observação de novos resultados.

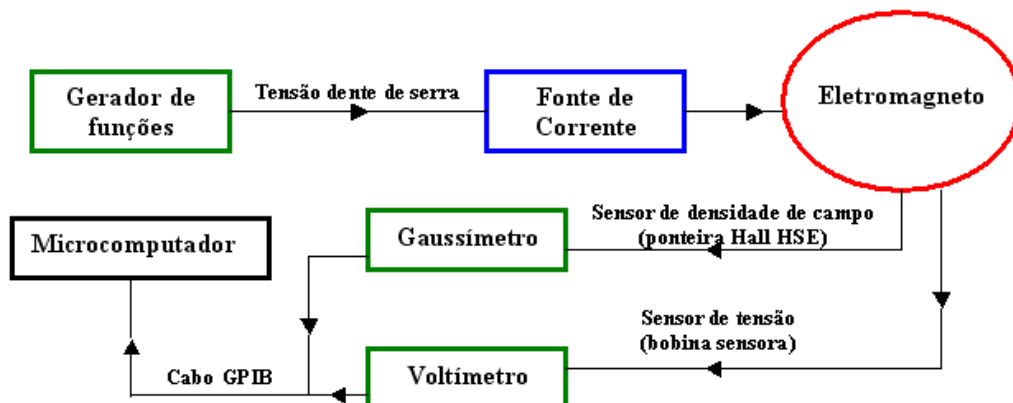


Figura 30: Nova configuração do SGPIB

Os primeiros resultados medidos continuavam a produzir sinais com ruídos, porém com menores flutuações em relação àquelas vistas na figura 29. Como a saída do gerador de funções produz tensões analógicas, com baixo nível de harmônicos e ruídos, a única suspeita restante era que esse problema poderia provir do ruído na rede elétrica apresentada na seção 4.4.3.

4.6) Alterações no programa e desenvolvimento da interface gráfica.

Ao longo desse trabalho várias alterações foram feitas no código principal do programa. Nesta seção o programa será explicado por completo, mostrando como os códigos foram readaptados conforme as necessidades.

4.6.1) Construção da rotina de integração no código principal

Um procedimento necessário a ser feito era a integração do sinal de tensão da bobina sensora. Após a aquisição desse sinal, optou-se em encontrar B_m através da integração trapezoidal. Definindo o vetor *vgaussI* como o vetor resultante da integração do vetor *vmult* dividido pelas constantes *N* e *S*, foi então obtido (por integração numérica), o valor da indução magnética média (*vgaussI*), necessária para formação do eixo de ordenada da curva B_m vs. H . É posto em destaque logo abaixo a parte do programa que faz esse procedimento, que foi adicionada ao programa do anexo B no *looping* do trecho principal indicado pela seta.

$$v_{\text{gauss}}1(j) = v_{\text{gauss}}1(k) + ((v_{\text{mult}}(j) + v_{\text{mult}}(k)) * dt) / (2 * S * N). \quad (14)$$

Partindo da curva em que $dx = 0,1$ e $dt = 0,2$ pode ser mostrado um resultado de integração na figura 31, utilizando o controle da fonte de corrente a partir do gerador de sinais, para a medida de magnetização do ar.

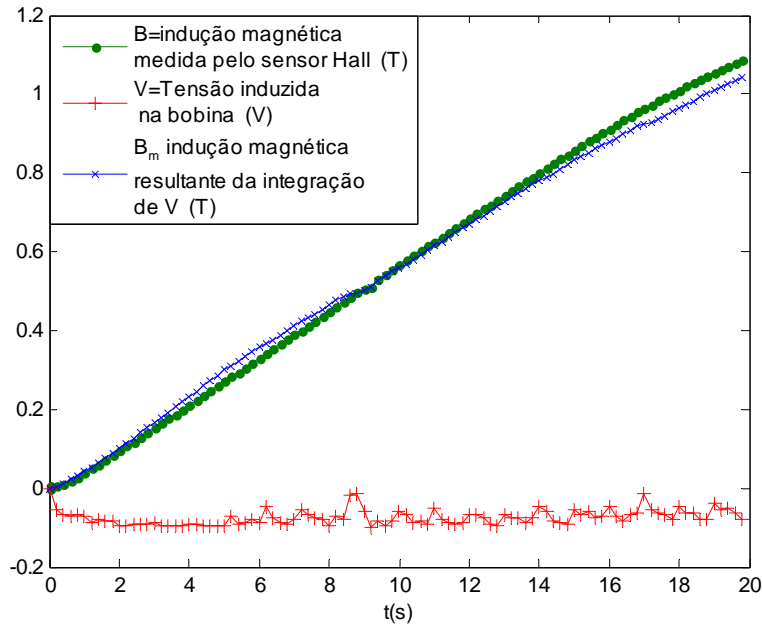


Figura 31: Resultado da integração da tensão induzida na bobina para o ar.

Pode-se observar com esses resultados que apesar do ruído na tensão induzida a indução magnética média (B_m) resultante do procedimento de integração se aproxima do valor medido pelo sensor de efeito Hall HSE. Observa-se que o ruído da tensão é filtrado devido à propriedade do integrador.

Mesmo com os resultados de B_m se aproximando aos de B , estes não são coincidentes, o que não condiz com o que era esperado para o ar. O sinal integrado deveria ser proporcionalmente o mesmo ou bem próximo do sinal lido pelo sensor Hall HSE. O procedimento de integração apesar de tudo foi bem sucedido, restava apenas ser resolvido o problema de ruído na tensão da rede, para constatar se seria o responsável pelo ruído no sinal de tensão induzida.

4.6.2) Interface gráfica GUI (*Graphical User Interface*)

Trata-se de um pacote de ferramentas com interface gráfica fornecida pelo Matlab, cuja principal finalidade é produzir programas orientado a objetos para facilitar a interação do usuário. Um programa com interface gráfica evita que o usuário seja obrigado a alterar uma linha de comando toda vez que desejar que uma nova função seja executada no programa. O GUI é um pacote de fácil programação e contém uma série de tutoriais e arquivos de ajuda para o programador. O pacote de ajuda utilizado foi o GUIDE (*Guide User Interface*), um guia para programação. Serão mostrados adiante de forma sucinta os primeiros passos a serem tomados para a criação de um programa em GUI.

Depois da abertura do Matlab deve-se executar o comando *guide* no *workspace* do Matlab, pressionar no menu *Use Blank GUI* e em seguida o botão OK. Esta janela é vista na figura 32. Com esse procedimento serão construídos dois arquivos, um de extensão *nome_arquivo.fig* que se refere a janela de construção do GUI e outro com extensão *nome_arquivo.m* que se refere ao arquivo onde serão incluídos os códigos necessários.

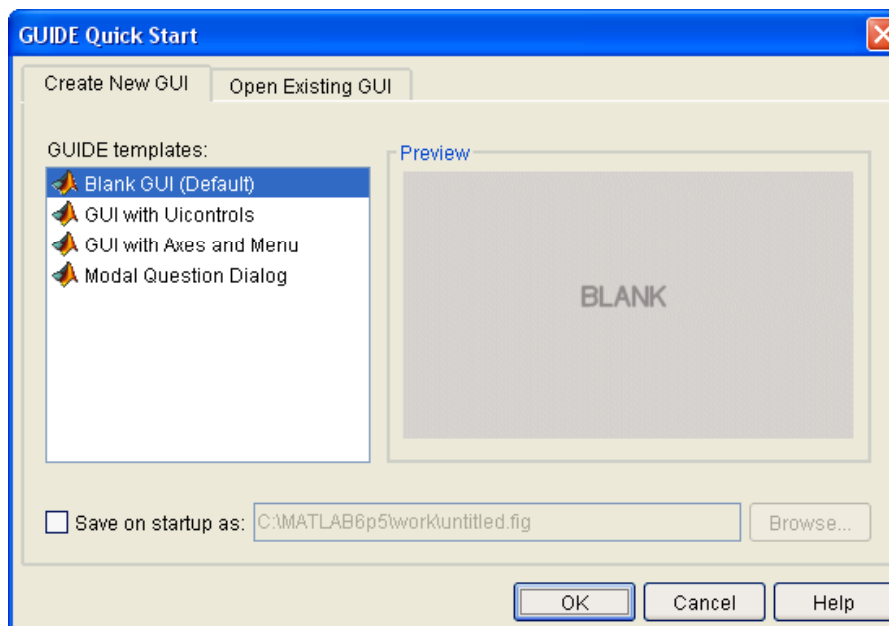



Figura 32: Janela gerada pelo comando *guide* no *workspace* do Matlab

Quando a janela de construção em branco for aberta é aconselhável primeiramente salvar este arquivo, tal que o nome escolhido pelo programador passa a ser o nome do programa.

O programa de extensão *nome_arquivo.m* será exibido quando for acionado o ícone com símbolo . A janela de construção pode ser vista na figura 33.

No início do arquivo *nome_arquivo.m* existem funções de abertura e saída pré-definidas pelo programa, onde serão acrescentadas as linhas de comando pelo programador. Quando as ferramentas orientadas a objetos são arrastadas e alocadas no espaço quadriculado da janela de construção, no arquivo *nome_arquivo.m* é gerada automaticamente uma função referente a este objeto (*function objeto_CreateFcn*). Se este objeto é comunicável com outros objetos, será também gerada uma função que servirá de intercâmbio entre as funções comunicáveis (*function objeto_Callback*).

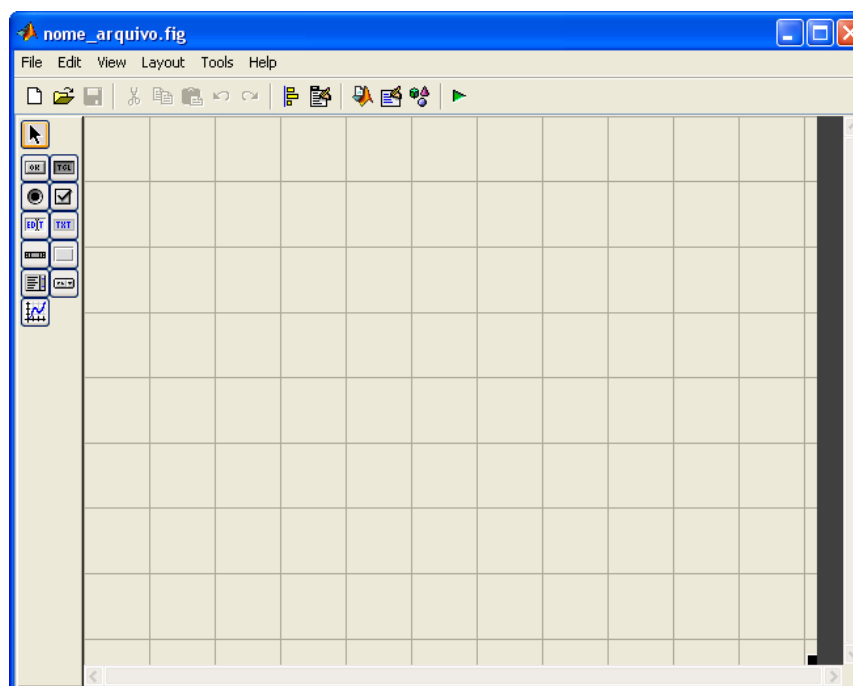


Figura 33: Janela de construção do programa

Se porventura o programa construído for muito extenso e o programador quiser dar prosseguimento ao trabalho em outra oportunidade os dados configurados podem ser salvos. Para abri-los novamente basta acessar *guide* e na janela acessar *open existing GUI* na barra de menu da figura 32, ou ainda diretamente pelo Matlab, na pasta *work*, onde este arquivo é gravado.

Com as ferramentas alocadas conforme as necessidades de *layout* do programador, basta agora acrescentar no programa os códigos de comando entre as funções de *nome_arquivo.m*.

O programa construído nesse trabalho é visto na figura 34, cuja primeira versão ainda chamava-se “Teste”. A interface desenvolvida foi útil para fazer aquisição de dados, permitir interação amigável e informativa para o usuário, fácil manipulação das ferramentas gráficas disponíveis e foi projetado dentro dos requisitos de segurança para evitar danos aos equipamentos em uso.

É importante dizer que o código deste programa ainda requeria atualizações, e com o amadurecimento do projeto foi constatado que alguns procedimentos do programa deveriam ser modificados, contudo as funções que já estavam definidas atendiam as necessidades naquele momento e funcionavam adequadamente.

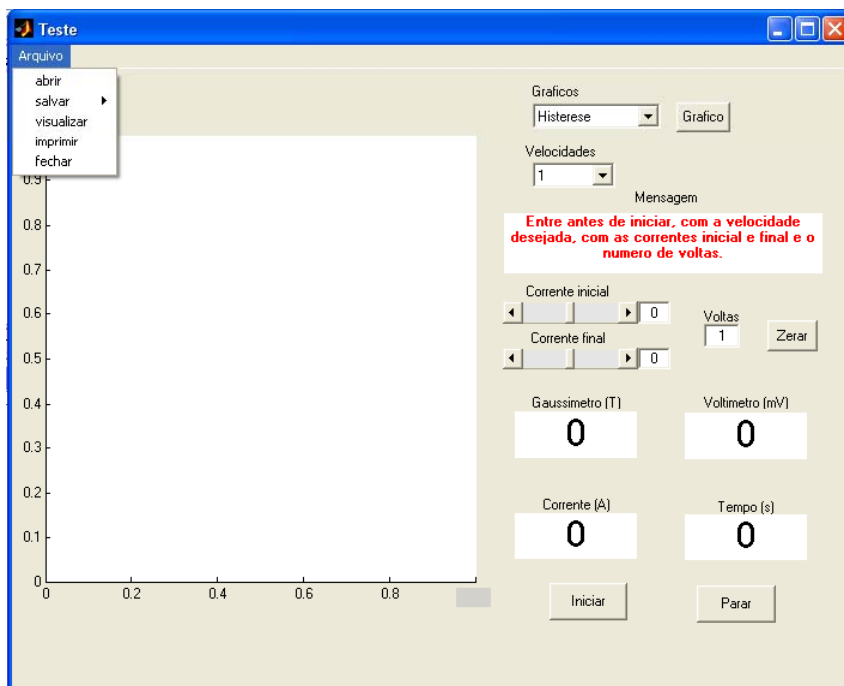


Figura 34: primeira versão do programa SGPIB de nome provisório “Teste”.

4.7) Resultados após o aterramento da rede elétrica do laboratório.

Com o aterramento da rede concluído, foram feitos diversos testes para constatar se esse era realmente o problema. Estes testes foram feitos já com a nova configuração do item 4.5, visto que para antiga configuração os ruídos persistiam. Como era difícil iniciar a contagem de pontos acionando o programa manualmente a partir do zero inicial de controle, os gráficos foram ajustados somando-se um *offset* que força o gráfico começar da origem. Este procedimento foi tomado para que os resultados possam ser melhor interpretados.

Podem ser vistas nas seções seguintes diversas figuras que demonstram os resultados obtidos com esse programa. Os resultados em função do tempo de experimentação serão ilustrados na mesma figura, portanto há necessidade de substituir as curvas $H_{vs.t}$ pelas curvas $B_{vs.t}$. Esta providência foi tomada porque não é possível a visualizar $H_{vs.t}$ na mesma escala de $B_m vs.t$. Todavia para figuras onde serão mostrados os gráficos $B_m vs.H$, não há objeções para que o eixo das abscissas seja o próprio H .

4.7.1) Resultados para o ar com intervalo de corrente -35–35A para mínima frequência do gerador de funções.

Com a finalidade de se obter curvas para a mínima taxa de controle de corrente possível, o gerador de funções foi ajustado para mínima frequência permitida, que foi de 8,7mHz. A figura 35 mostra este resultado.

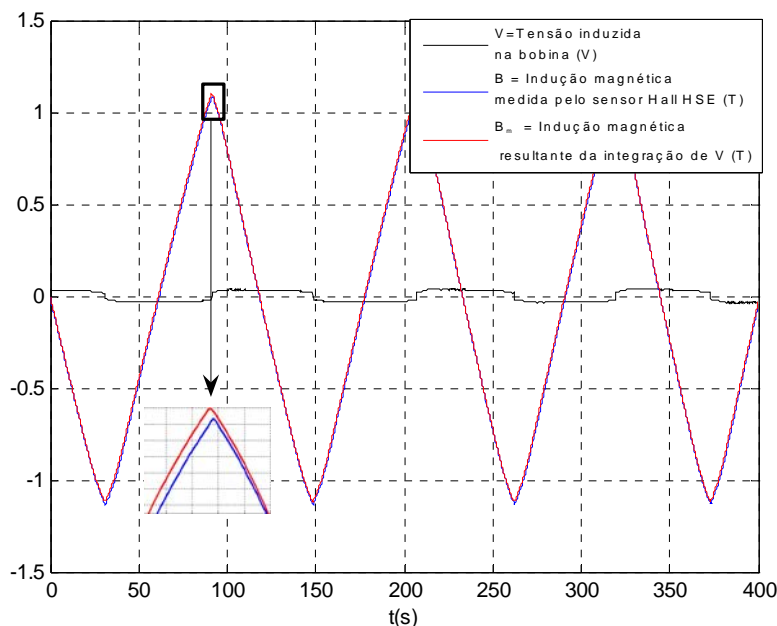


Figura 35: Resultados do ar para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.

Pode-se observar que agora o formato da tensão ficou exatamente como desejado. Isto provou que os responsáveis pelo problema do ruído aleatório de tensão era a tensão de controle produzida pelo gaussímetro e o ruído existente na rede elétrica, contribuindo cada qual com uma parcela individual; a primeira de origem no comando do gaussímetro e a segunda de origem da rede de aterramento. Portanto uma vez sanados estes dois problemas a tensão mostrou-se coerente, pois esta apresentou-se em forma de onda quadrada.

Observa-se que o pico de indução magnética medida pelo sensor Hall HSE é em torno de 1,1T e que coincide exatamente com o gráfico padronizado pelo fabricante do eletromagneto, visto que o entreferro das peças polares está ajustado em torno de 0,9pol.

Outra observação que pode ser vista em destaque na figura 35, em que foi feita uma ampliação do pico máximo dos dois sinais de indução magnética. É visto que B_m está adiantada em relação a B, porém para o ar, estes gráficos deveriam coincidir.

Abaixo é visto na figura 36 a curva B_m vs. H referente a esses pontos. É reparado nesta figura que o atraso de H em relação a B_m quase não é percebido.

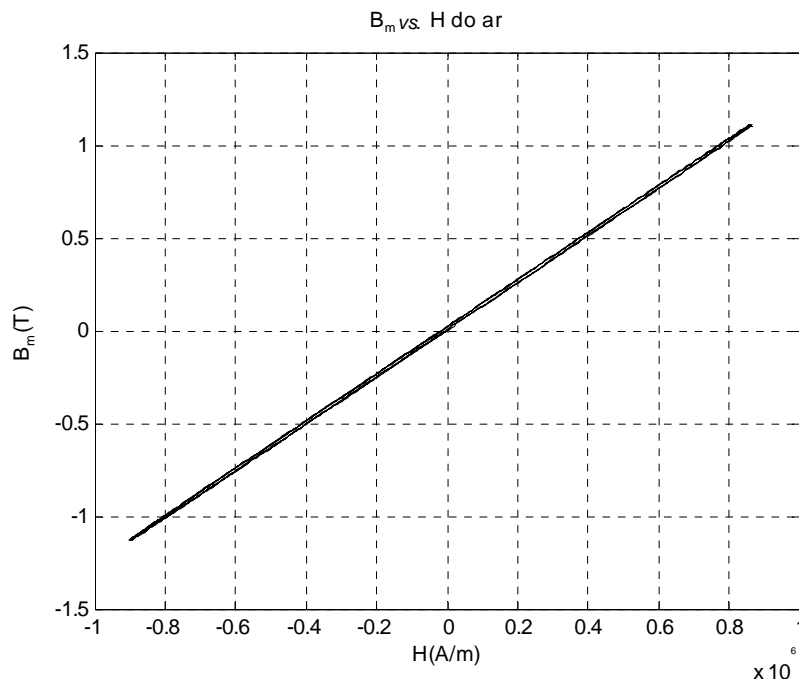


Figura 36: Curva B_m vs. H do ar para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.

4.7.2) Resultados para o ar com intervalo de corrente -35–35A para frequência de 16mHz no gerador de funções.

Nesta seção os testes serão realizados a partir do ajuste do gerador de funções tal que a taxa de variação máxima da corrente produzida pela fonte (10A/s) não seja ultrapassada. Para isso, tentou-se duplicar a frequência mínima da seção anterior, visto que a taxa de variação de corrente para aquela frequência estava apenas em torno de 1,22A/s, sendo assim, seria alcançado apenas no máximo 2,44A/s.

Na figura 37 podem ser observados os resultados para frequência de 16mHz, ou seja, com uma taxa de corrente em torno de 2,24 A/s. Comparando com os resultados da seção anterior, observa-se que houve um acréscimo na defasagem dos sinais de B e de B_m . Já a figura 38 apresenta a curva de magnetização B_m vs. H para o ensaio referido.

Algumas observações e conclusões podem ser tiradas a respeito dos resultados apresentados nas seções 4.7.1 e 4.7.2:

- ✓ Os resultados adquiridos para a mínima frequência do gerador de funções mostraram-se melhores, pois a defasagem entre B e B_m tendeu a ficar menor. Esta defasagem da leitura

de campo do gaussímetro em relação à leitura de tensão do multímetro explica-se pela razão destes equipamentos serem independentes fisicamente, portanto, o controle respondia em tempos distintos.

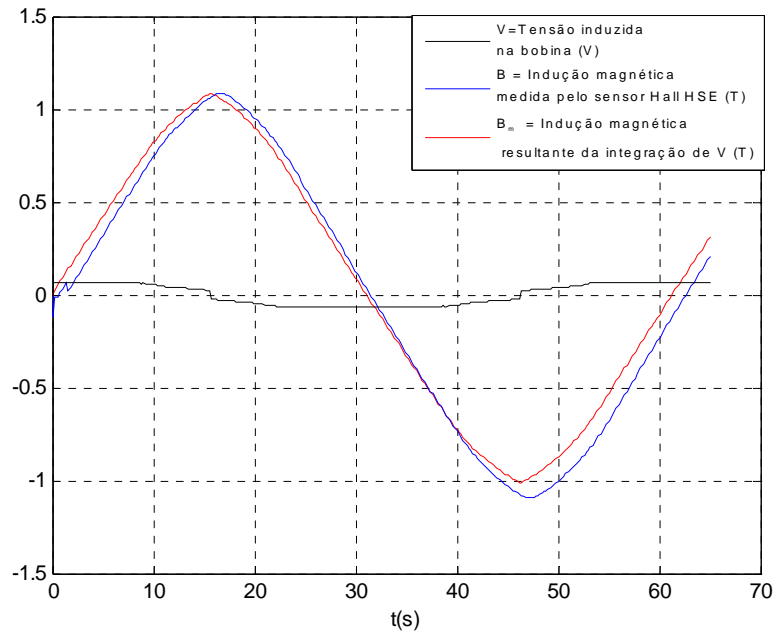


Figura 37: Resultados do ar para a frequência de 16mHz no gerador de funções.

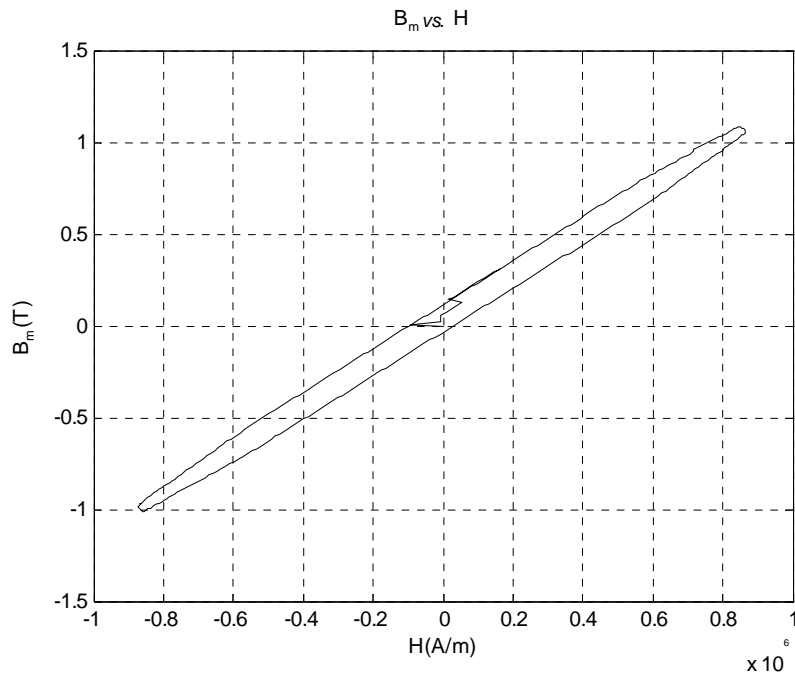


Figura 38: Curva B_m vs. H do ar para a frequência de 16 mHz no gerador de funções.

- ✓ Como o controle de corrente não pode ser feito corretamente via *software*, devido o gerador de funções não possuir interface GPIB, as medidas foram ajustadas manualmente, e por isso dificultaram a obtenção de resultados;
- ✓ A defasagem entre os sinais de campo só ocorre quando há histerese magnética, portanto o sinal de indução magnética resultante da integração da tensão da bobina sofre um atraso como visto na seção 2.3.2. Quando as medidas acima foram feitas não havia presença de material ferromagnético acoplado à bobina sensora de tensão induzida, ou seja, as medidas eram feitas no ar. Dessa forma o atraso presente nesses resultados não era permitido, mesmo porque, o sinal em atraso era o sinal de campo medido pelo sensor Hall HSE;
- ✓ Outros testes com intervalo de correntes mais elevadas foram feitos. Os resultados mostraram-se bastante similares, contudo foi percebido que na medida que se aumenta a corrente o atraso torna-se mais acentuado.

4.7.3) Resultados para o ferrite com intervalo de corrente -2,5–2,5A para mínima frequência do gerador de funções.

Apesar dos problemas observados no sistema de medida, foi feito um ensaio de uma amostra de ferrite, cujo resultado pode ser visto na figura 39. A figura 40 mostra a curva de histerese do ferrite para esse sistema.

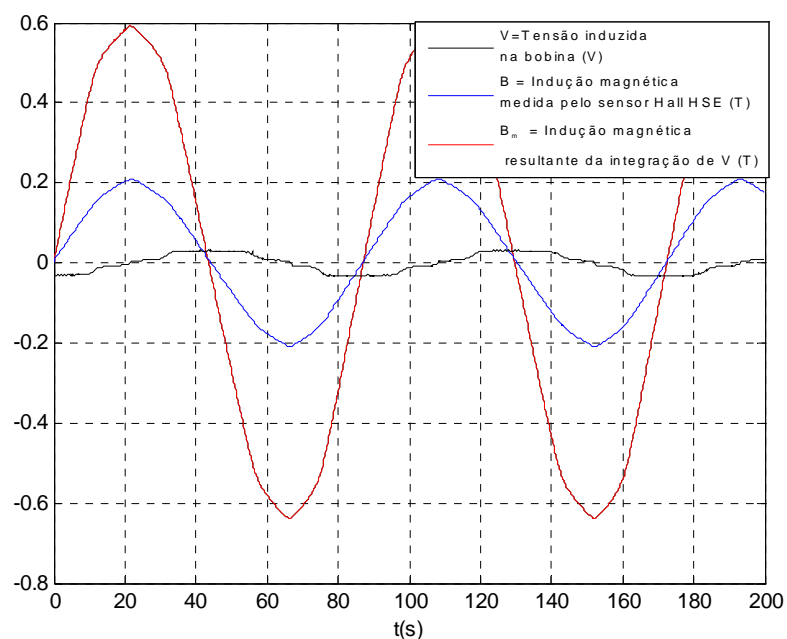


Figura 39: Resultados do ferrite para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.

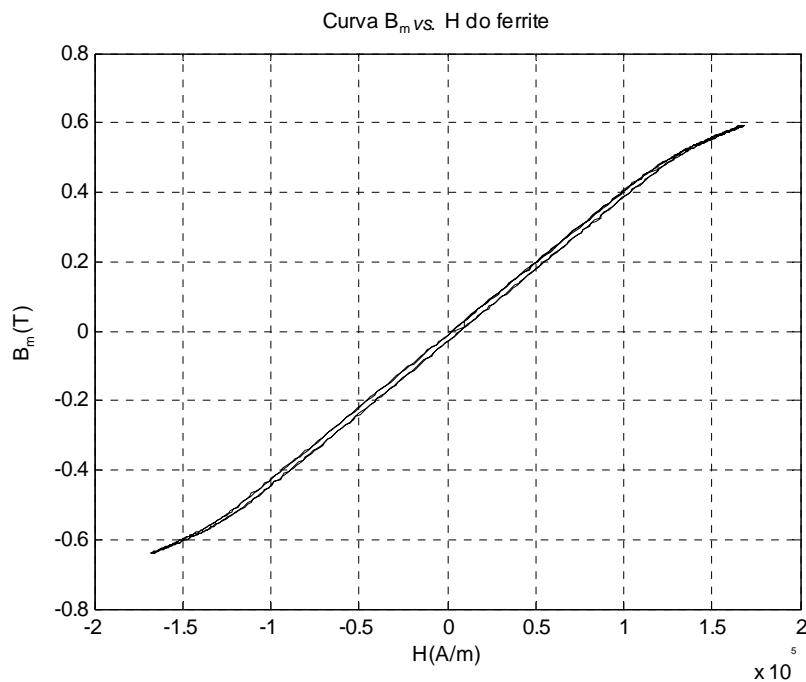


Figura 40: Curva B_m vs. H do ferrite para a frequência de 8,7mHz no gerador de funções.

Algumas observações podem ser feitas a respeito dos resultados desta seção:

- ✓ A figura 39 mostra claramente que a amplitude de B_m é bem maior que a de B . Isto era esperado, visto que a permeabilidade magnética do ferrite é muito maior que a do ar;
- ✓ O sinal de B_m da amostra de ferrite sofreu saturação em 0,6T. Embora devam ser feitos alguns ajustes, este resultado mostra-se bastante coerente com os dados deste material obtidos na literatura;
- ✓ Pode ser visto na figura 11 que a saturação do eletromagneto para o entreferro de 0,9pol só começa a ser visível a partir do ponto (26A, 0,85T). Portanto, quando o eletromagneto é submetido as correntes abaixo do valor desse ponto, a resposta de B é muito semelhante à entrada de corrente, que no caso desse experimento, possui a forma de onda triangular. Contudo, conforme visto na figura 39, este sinal parece começar a saturar em torno de 0,1T, quando era esperado um sinal de B de forma de onda triangular que tivesse um valor máximo de apenas 0,08T, conforme pode ser interpretado na figura 11. Isso ocorreu porque o fluxo de dispersão provinda da amostra era somado ao sinal de B lido pelo sensor Hall HSE, alterando a medida de B e, por conseqüência, o de H ;
- ✓ A partir do problema do tópico anterior, tornou-se necessário que se fizesse duas medidas de cada vez, uma de campo pelo sensor Hall HSE (B), e outro de tensão pela bobina (V), de forma que a dispersão de fluxo não influencie na medida de B . Contudo, como nesse

sistema o disparo de partida do programa é feito manualmente, este procedimento torna-se inviável, uma vez que é muito difícil acertar duas vezes um ponto sincronizado com a primeira medida.

4.8) Limitações do SGPIB

4.8.1) Atraso na leitura de campo magnético.

A defasagem entre os sinais ajustados se deve ao voltímetro enviar ao computador sinais analógicos mais rapidamente que o gaussímetro. Este problema não pode ser resolvido, por tratar-se de um limitante desses equipamentos, quando estes funcionam em conjunto. Por essa razão não foi possível sincronizar o multímetro e o gaussímetro igualando suas partidas no momento inicial da leitura das amostras, além de não se conseguir um comando numérico adequado que pudesse corrigir esse problema.

4.8.2) Necessidade de controle manual.

Talvez o fator mais grave que inviabiliza o uso do SGPIB na nova configuração mencionada do item 4.5 é o fato de não poder ser controlado via *software*. O controle manual não permitia obter medidas dos primeiros pontos do laço de histerese de materiais ferromagnéticos que geram a curva de magnetização inicial, pois como dito, não era possível acertar o ponto de disparo do programa de forma sincronizada. Outro agravante é que ponto inicial, no momento de disparo do programa, pode não ter sido iniciado no ponto nulo. As medidas dos pontos iniciais de magnetização a partir do ponto nulo tornam-se ainda mais importantes quando forem traçados curvas B_m vs. H de materiais supercondutores do tipo 2, onde a observação do efeito de repulsão de campo (efeito Meissner) nesses materiais faz-se imprescindível.

Uma vez que não era possível fazer as medidas separadamente, o problema de dispersão impedia que a leitura de tensão e campo pudessem ser feitos juntos, quando eram feitas medidas de materiais ferromagnéticos. Nota-se que quando não havia nenhuma amostra na bobina sensora de tensão (ar), não havia qualquer problema em fazer as medidas ao mesmo tempo, pois neste caso não existia o fator dispersão.

Pode ser sugerido em trabalhos futuros a utilização de uma placa geradora de sinais analógicos que pudesse ser controlada via GPIB. Há possibilidade desta placa solucionar os problemas mencionados nesta seção.

Capítulo 5 - Sistema de medidas utilizando uma placa de aquisição de dados(SPAD):

Este sistema foi construído com o intuito de corrigir as limitações mencionadas no capítulo 4. Para isso adotou-se um novo método de armazenamento através da placa de aquisição de dados PCI-1711 da Advantech. Além disso, foram construídos equipamentos para contribuir nas necessidades de ajuste.

5.1) Características gerais do segundo sistema

Segue na figura 41 uma fotografia do SPAD implementado nesse trabalho.

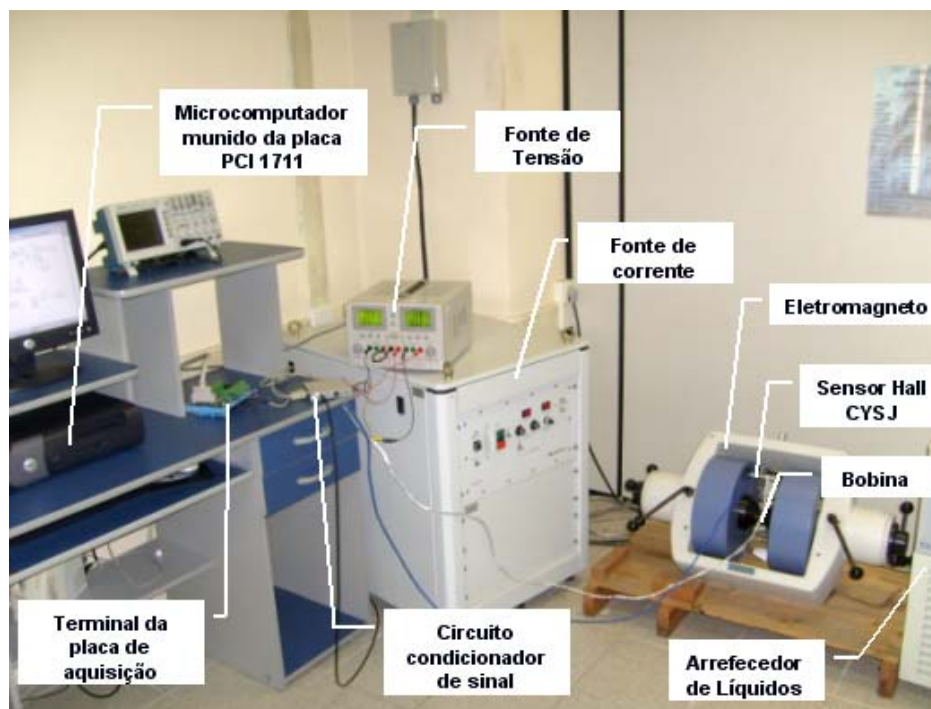


Figura 41: Equipamentos envolvidos no SPAD.

5.1.1) Equipamentos utilizados no SPAD.

Foram utilizados os seguintes equipamentos no SPAD:

- ✓ placa de aquisição de dados Advantech PCI 1711,
- ✓ fonte de corrente modelo 662,
- ✓ eletromagneto modelo EM4-HV,

- ✓ chiller M75,
- ✓ bobina com 1000 espiras,
- ✓ bobina com núcleo de ferrite com 4000 espiras,
- ✓ microcomputador,
- ✓ fonte de tensão,
- ✓ circuito condicionador de sinais,
- ✓ sensor Hall CYSJ.

5.1.2) Principais diferenças do SPAD em relação ao SGPIB.

A placa de comunicação GPIB, antes utilizada no SGPIB, foi substituída pela placa de aquisição de dados da Advantech PCI -1711, pela razão desta apresentar recursos de aquisição de dados e possuir saídas analógicas que geram diversos tipos de formas de onda. As funções são geradas no mesmo tempo que as medidas são armazenadas, pois isto é feito pelo mesmo equipamento. Além destas vantagens, também se inclui o fato desta placa ter uma relação custo-benefício mais atrativo.

A ponteira Hall utilizada foi feita a partir de um componente sensor de campo magnético da série CYSJ feito de mono-cristal de Arseneto de Gálio (GaAs); material semicondutor do grupo III-V utilizando tecnologia íon-implantada. Possui área útil de 2,25mm², que permite sua utilização em várias aplicações. Este componente é apropriado para obter-se uma tensão proporcional à indução magnética medida (B). O sinal medido por esse novo sensor Hall (B) será dividido pela permeabilidade magnética no vácuo (μ_0) para obtenção da intensidade de campo (H). Para sua aplicação deve haver uma fonte de corrente estável entre 1mA e 10mA que possa alimentá-lo. A temperatura de operação pode variar entre -55°C e 125°C segundo os dados do fabricante [16]. A entrada de corrente de alimentação deve ser feita em seus pinos 1 e 3 e a saída de tensão proporcional à indução está nos pinos 2 e 4.

Este componente foi devidamente adaptado conforme as necessidades do trabalho. Para isso, foi utilizado um cabo de sinais de fio trançado e foi construída uma placa de circuito impresso em forma de haste para que o sensor fosse fixado perpendicularmente a entrada de campo no entreferro do eletromagneto. Este dispositivo pode ser visto na figura 42, onde o componente sensor foi ampliado.

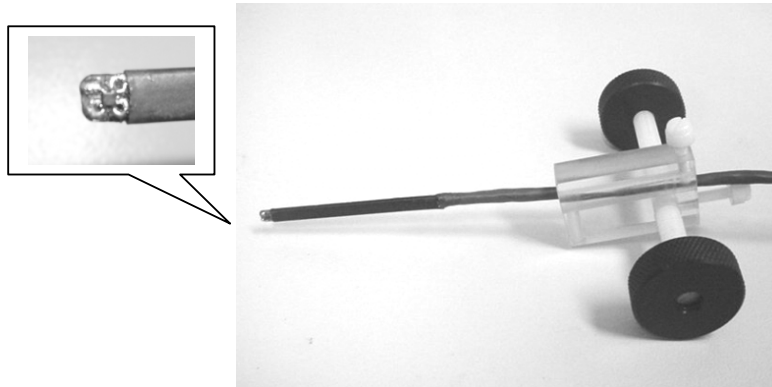


Figura 42: Sensor Hall CYSJ construído.

Outro dispositivo construído foi um circuito condicionador de sinais. Este dispositivo possui 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, e finalmente gerar corrente para alimentação do sensor Hall CYSJ mencionado no parágrafo anterior. Este dispositivo pode ser visto na figura 43.

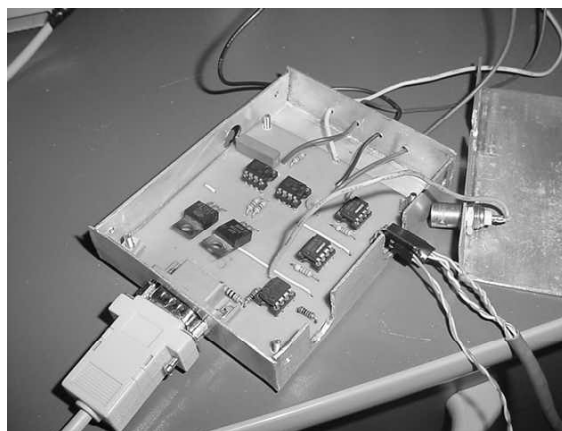


Figura 43: Circuito condicionador de sinais.

A placa de aquisição, com o auxílio do circuito condicionador de sinais, passa a gerar o sinal de controle de corrente substituindo a saída analógica do gaussímetro, controlado via GPIB, e o controle manual pelo gerador de sinais. Isto proporcionou grande vantagem, pois o sinal da saída analógica da placa é controlável, com baixo ruído e bastante estável.

As entradas analógicas da placa de aquisição, também com auxílio do ajuste do circuito condicionador, substituíram o gaussímetro e o multímetro na aquisição de dados. A vantagem disso é que agora a leitura da ponteira Hall CYSJ e a tensão vinda da bobina sensora de tensão

induzida não sofrem mais defasagem para os casos de amostras onde esta não existe, pois os todos dados são aquisitados simultaneamente.

O SIMULINK serviu como ferramenta de controle utilizada na digitalização dos dados analógicos recebidos pela placa de aquisição PCI 1711, conseqüentemente tomou o lugar do programa gráfico implementado anteriormente no SGPIB.

Sua compatibilidade com a placa de aquisição PCI 1711 permitiu de forma clara e simples construir blocos de controle que digitalizam os dados recebidos ou enviados. Em conjunto a este controle foi construído um script em Matlab denominado *histerese.m*, necessário para fixar os valores do arquivo *Teste.mdl*, que é o arquivo que contém o diagrama de blocos de controle implementados no SIMULINK.

5.1.3) Configuração do SPAD.

Na figura 44 é mostrada a configuração do SPAD para obtenção dos resultados. Antes dessa configuração foram feitos diversos testes que permitiram chegar à conclusão qual seria a melhor forma de armazenar os dados. Será mostrada apenas a configuração permanente desse sistema onde as direções das setas mostram como ocorre o fluxo de informações seguindo o mesmo modelo intuitivo descrito pelo algoritmo.

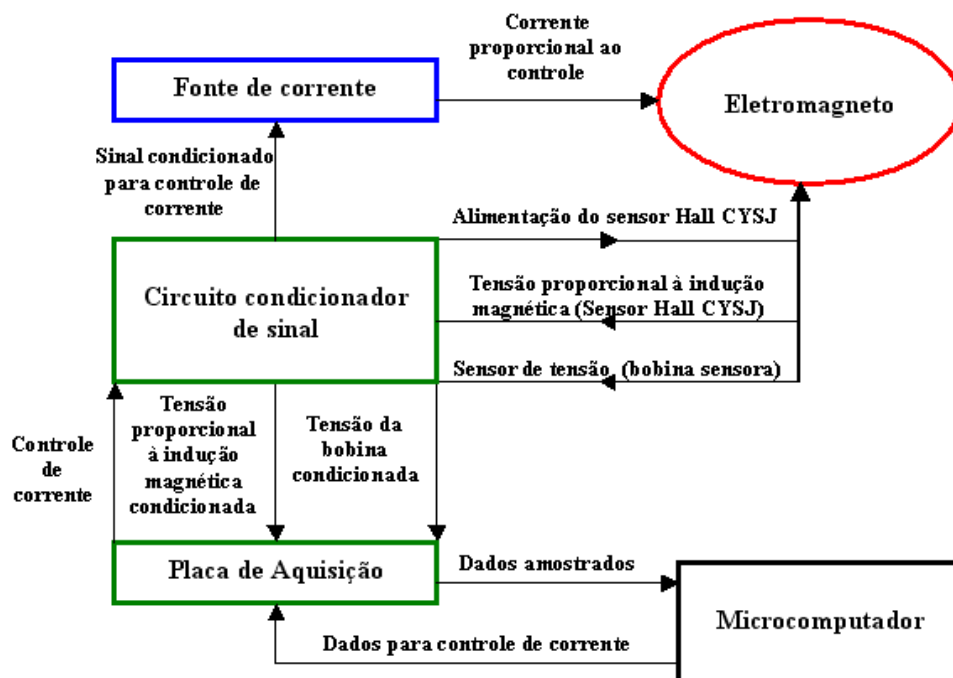


Figura 44: Configuração do SPAD

A princípio, a saída analógica (*monitor*) do gaussímetro, com auxílio do sensor Hall HSE, foi configurada para enviar os dados medidos à placa de aquisição PCI 1711. Entretanto, foi necessário substituí-lo pelo sensor Hall CYSJ, por motivos de incompatibilidade entre a taxa de aquisição da nova placa e a frequência em que o conversor D-A do gaussímetro gerava no sinal de saída. Todas as demais configurações possíveis não tiveram caráter permanente, somente serviram para tentativas de solucionar os problemas que foram surgindo ao longo do trabalho.

5.2) Funcionamento do SPAD.

Uma vez que a placa de aquisição esteja instalada no microcomputador e que seja reconhecida como novo *hardware*, ela pode ser configurada conforme as necessidades. Os blocos utilizados para controle do SPAD e aquisição de dados estão arranjados conforme mostra a figura 45 e foram programados no SIMULINK/Matlab. As saídas e entradas analógicas são encontradas na pasta *Real-time windows target* estes blocos são configurados de acordo com o tipo da placa instalada (nesse caso a placa disponível é a PCI 1711 da *Advantech*).

Cada bloco de controle foi configurado conforme a função desempenhada. Aqueles que possuem constantes fixas como entrada, os valores numéricos já foram fixados. Aqueles que possuem variáveis como entrada, contam com o *script histerese.m* cujos valores são configurados pelo usuário. Este *script* pode ser visto no anexo C.

O conjunto de blocos da figura 45A representa a geração de um sinal triangular para o controle da fonte de corrente. No bloco “sinal de controle com variação 0/10V” pode ser ajustado o período e a amplitude da função triangular. Também na figura 45A são feitos os ajustes necessários pelos blocos “*percentagem*” e “*ajuste de offset*”. Após estes blocos de ganho, o sinal tem uma bifurcação para dois caminhos, o que vai para saída analógica e àquele que vai resultar a réplica do controle da fonte de corrente (V_0). Esta réplica é enviada para o *workspace* do Matlab. O funcionamento desse bloco será explicado na seção 5.2.2. A partir deste será iniciado o ciclo do algoritmo descrito na seção 4.1.2.

Na figura 45B é feita a aquisição do sinal de indução magnética (B) e de intensidade de campo (H), onde foi compensado o ganho produzido pelo INA e o ajuste de calibração feito na ponteira Hall CYSJ. O procedimento para calibração será mostrado em 5.2.1.

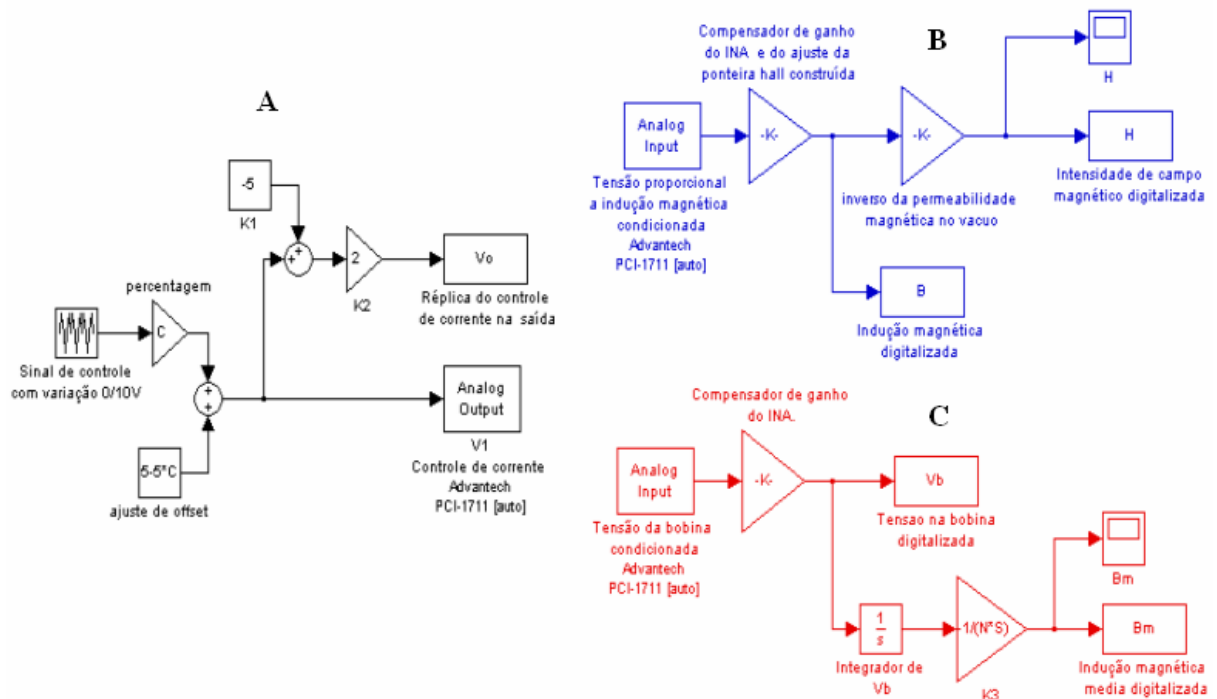


Figura 45: Diagrama de blocos do SIMULINK: A-Geração do sinal para controle da fonte de corrente; B-Aquisição do sinal do sensor Hall CYSJ; C- Aquisição da tensão induzida na bobina sensora.

O bloco *scope* monitora o desenvolvimento do resultado da digitalização de intensidade de campo (H) após ter sido dividido pela permeabilidade magnética no vácuo. Este sinal é também transferido para o *workspace* do Matlab.

Na figura 45C é feita a digitalização do sinal de tensão vindo da bobina de tensão, onde é compensado o ganho produzido pelo amplificador operacional INA. Esta tensão é transferida para o *workspace*. Após ter sido realizado a integração desta tensão e multiplicada pelas constantes necessárias, o sinal de indução magnética média (B_m) resultante é monitorado pelo *scope* e também transferido para o *workspace*. De posse de todos estes dados digitalizados armazenados em vetores do tipo *array* é possível traçar os gráficos que serão estudados.

Resumindo, para que o programa funcione basta simplesmente carregar o Matlab, abrir o arquivo que contém o diagrama de blocos do SIMULINK, carregar o programa *histerese.m*, adicionar os parâmetros pedidos na tela do *workspace*. Logo após, voltar ao diagrama de blocos, pressionar o botão *building*, esperar a compilação, e enfim, após pressionar o botão de reprodução, esperar o fim da digitalização dos dados. Estes dados ficarão gravados no *workspace* do Matlab onde poderão ser traçadas suas formas gráficas. Quando são obtidos os resultados com as amostras de material ferromagnético, este procedimento deve ser feito duas vezes, um deles

para obter as medidas de H e outro para obter as medidas de V, que gera concomitantemente B_m . Se estes resultados fossem obtidos ao mesmo tempo (o que seria ideal) as leituras de campo de dispersão também seriam lidas pelo sensor Hall utilizado, por essa razão o valor de B estaria sendo distorcido no entreferro pela presença da amostra em teste.

5.2.1) Calibração da ponteira Hall CYSJ.

Para calibração da ponteira Hall CYSJ foi feito um procedimento simples. Utilizando-se do próprio programa construído no SIMULINK foi acrescentado um bloco temporário que permitia digitalizar o sinal resultante do gaussímetro acoplado ao sensor Hall HSE. Os dados foram digitalizados a partir das entradas analógicas da placa de aquisição onde foram obtidos simultaneamente os dados de indução magnética feitos pelo gaussímetro e pela nova ponteira Hall, tal que a leitura do gaussímetro servisse de parâmetro para calibração do novo sensor Hall CYSJ. Nessa prática foi utilizado um cabo que conectasse a saída analógica (*monitor*) do gaussímetro até a uma das entradas analógicas da placa de aquisição. Os pólos do eletromagneto foram ajustados para um entreferro de 0,25 pol, com o objetivo de alcançar menor dispersão do fluxo magnético, e os sensores foram colocados ao mesmo tempo no entreferro. Com esse procedimento o vetor obtido pelo gaussímetro foi comparado ao vetor obtido pelo sensor Hall CYSJ utilizando a ferramenta *cftool* do Matlab. Esta ferramenta permite parear os pontos dos vetores de diversas formas.

Utilizando o método dos mínimos quadrados foi possível obter o coeficiente angular que representa o fator multiplicativo para calibração.

5.2.2) Construção do circuito condicionador de sinais.

O circuito condicionador de sinais pode ser subdividido em três blocos de funções diferentes apresentados na figura 46. A princípio estes blocos foram construídos separadamente em uma *protoboard* e foi verificado seu funcionamento através de testes. Estes tiveram diversas configurações, que por fim, resultaram na implementação atual.

Aqui serão omitidos os circuitos preliminares, mostrando somente aquele que foi implementado em definitivo. O funcionamento de cada circuito da figura 46 será explicado separadamente.

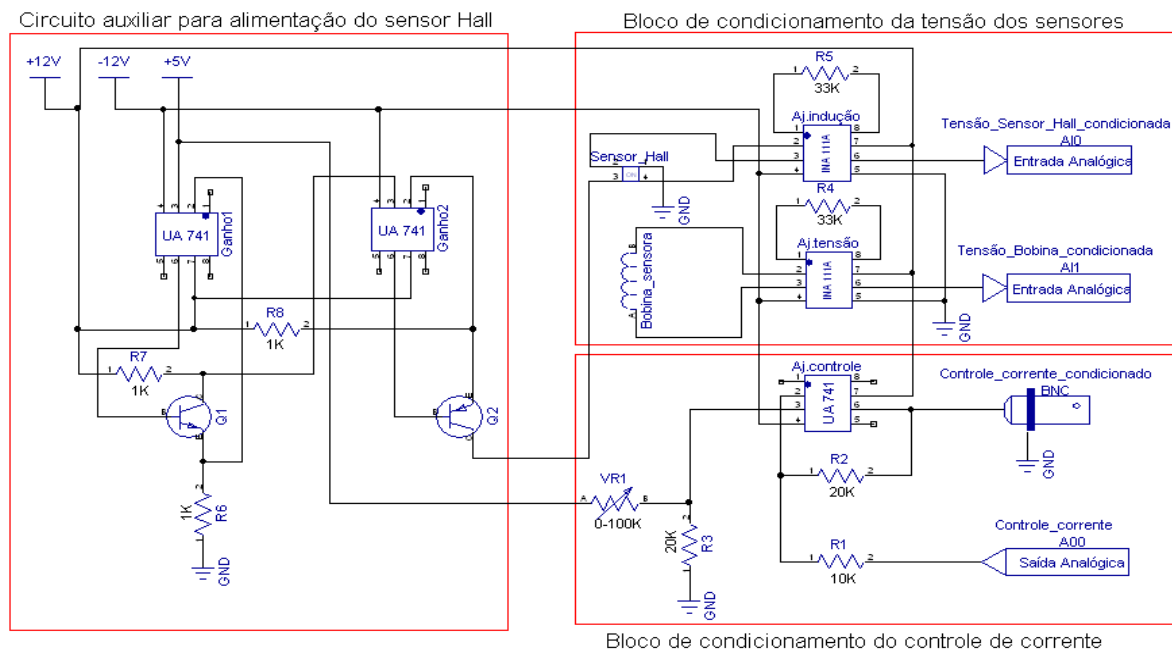


Figura 46: Esquemático eletrônico do circuito condicionador

5.2.2.1) Bloco de condicionamento do controle de corrente.

Como apresentado em 3.3.1 a placa de aquisição de dados gera em seu conversor D-A sinais entre 0–10V, e que não atendem de forma imediata às necessidades do trabalho. Como se deseja um sinal triangular no intervalo de -10–10V, o circuito do bloco em questão foi construído para o ajuste deste sinal. Portanto o circuito deveria ser dimensionado de forma a obter estas faixas requeridas. Para tanto alguns procedimentos matemáticos foram necessários para o cálculo dos resistores do circuito.

O circuito do amplificador operacional teve configuração inversora e ao mesmo tempo foi necessário colocar um divisor de tensão em sua entrada não inversora, para que fossem realizados ajustes de *offset*. Estes ajustes são feitos pelo resistor variável que é utilizado para calibrar o zero da fonte de corrente. A figura 47 ilustra este circuito.

É sabido que em um amplificador operacional ideal, a tensão de entrada inversora e de entrada não inversora podem ser considerados iguais e a corrente que atravessa estas entradas são nulas. Estes princípios foram utilizados nos cálculos. Assim com os parâmetros utilizados da figura 47 e simplificando as equações fazendo $R_2=R_3$ e $R_1=R_v$ é obtida a seguinte equação para tensão de saída (V_0) do AmpOp:

$$V_0 = - \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2). \quad (15)$$

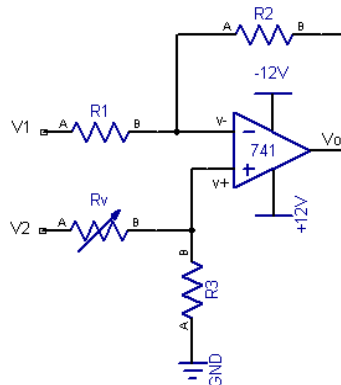


Figura 47: Circuito para condicionamento do sinal de controle de corrente.

Aplicando $R_2=20K\Omega$, $R_1=10K\Omega$, $V_2=5V$ e substituindo esses valores na equação 15, tem-se:

$$V_o = - \frac{20K}{10K} (V_1 - 5) = -2(V_1 - 5).$$

Explicitando V_1 vem:

$$V_1 = \frac{10 - V_o}{2}. \quad (16)$$

O valor da tensão V_1 deve ser previsto levando em conta os valores da faixa de corrente de saída desejada pelo usuário.

Para elucidar o que foi dito pode-se construir a tabela 7, onde V_1 é a tensão prevista utilizando a equação 16, onde V_o é a tensão de controle de corrente na saída do circuito, C é o controle em percentagem e I é a corrente desejada pelo usuário. Na tabela 7 foram postas faixas de V_o com valores inteiros, para que V_1 seja obtido com simplicidade pela equação 16.

Fazendo uma análise qualitativa de cima para baixo dos resultados da tabela 7 é verificado que para cada unidade do intervalo V_o que é diminuída, é também diminuída uma unidade para faixa de V_1 , porém agora é também somada a um valor proporcional a 0.5. Em outras palavras, V_1 é igual à soma de duas parcelas, uma proporcional ao intervalo, outra proporcional a 0,5. Considerando que as faixas de V_1 são os resultados que devem aparecer na saída analógica, deve haver uma maneira de achar uma relação em função de percentagem, vista na tabela 7, com auxílio de blocos do SIMULINK. Então a seguinte equação pode ser sugerida para obter os pontos mínimos de pico da função correspondente à tensão V_1 :

$$V1=10x+y,$$

onde x e y são os valores da tabela 8.

V1 (em volts)	Vo (em volts)	C (em %)	I (em ampères)
10/0	-10/10	-100/100	-70/70
9,5/0,5	-9/9	-90/90	-63/63
9/1	-8/8	-80/80	-56/56
8,5/1,5	-7/7	-70/70	-49/49
8/2	-6/6	-60/60	-42/42
7,5/2,5	-5/5	-50/50	-35/35
7/3	-4/4	-40/40	-28/28
6,5/3,5	-3/3	-30/30	-21/21
6/4	-2/2	-20/20	-14/14
5,5/4,5	-1/1	-10/10	-7/7
5/5	0	0	0

Tabela 7: Tabela analítica para ajuste e obtenção de V1

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
y	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0

Tabela 8: Tabela analítica relativo às variáveis de V1

Como x e y são interdependentes, ou seja, a parcela 10x depende da parcela y, há uma relação proporcional entre elas. Portanto utilizando os pontos da tabela 8 obtêm-se a seguinte relação:

$$y= 5 - 5x$$

Se x for a fração percentual, então $x = C$ tem-se:

$$V1=10C+ 5 - 5C . \tag{17}$$

A equação 17 não foi reduzida para tornar os blocos em SIMULINK mais intuitivos quando vistos pelo usuário. O diagrama que contém o controle da saída analógica está contido na figura 45A.

5.2.3.2) Bloco de condicionamento da tensão dos sensores.

Nessa parte foram utilizados amplificadores operacionais de instrumentação denominados INA111A. Esse dispositivo é próprio para aplicação neste trabalho, pois elimina ruídos diferenciais que possam estar presentes. Possui em seu interior o equivalente a 3 amplificadores operacionais integrados, entre outros componentes. Outras especificações são fornecidas pelo fabricante [17].

O ganho do circuito amplificador é obtido através de um resistor conectado externamente (R_G) e obedece a seguinte equação:

$$G = 1 + \frac{50k}{R_G}$$

O resistor R_G utilizado na implementação tem um valor de $33k\Omega$ dando um ganho aproximado de 2,515. Este teve de ser corrigido por um bloco de ganho no SIMULINK para se obter o valor real de tensão da bobina conforme a figura 45B. Da mesma forma, a leitura do sensor Hall CYSJ também foi amplificada e portanto também deve ser corrigido por outro bloco de ganho conforme visto na figura 45C.

5.2.3.3) Circuito auxiliar para alimentação do sensor Hall CYSJ.

Este circuito representa uma fonte de corrente elétrica estável que serviu para alimentar o componente sensor Hall CYSJ. Os ganhos de corrente e estabilidade, foram garantidos pelos Amplificadores operacionais e pelos transistores, TIP 122 (NPN) e TIP 126 (PNP). O esquema que representa esse circuito pode ser visto na figura 48.

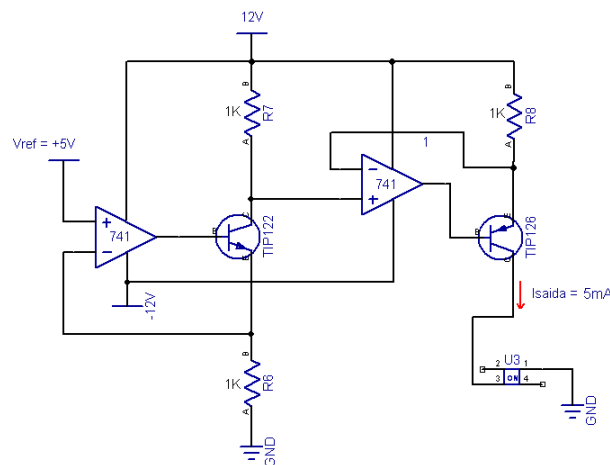


Figura 48: Circuito auxiliar para alimentação do sensor Hall CYSJ.

A corrente de saída ($I_{\text{saída}}$) é proporcional à tensão de referência (V_{ref}), atendendo a seguinte equação:

$$I_{\text{saída}} = \frac{V_{\text{ref}}}{R},$$

onde R é uma resistência de valor comum a todo circuito, ou seja, $R_6=R_7=R_8$.

Segundo as especificações do sensor de efeito Hall da seção 5.1.2, a corrente de alimentação máxima é de 10mA. Nesse trabalho foi utilizado um circuito com resistências de $1K\Omega$ e uma tensão de referência de 5V, obtendo-se uma corrente de 5mA.

5.4) Resultados do SPAD

Como no sistema anterior, tentou-se obter em primeiro lugar curvas que permitissem realizar os primeiros passos para análise. Novamente escolheu-se o ar como elemento de análise, para posteriormente fazer testes com outros materiais.

5.4.1) Resultados utilizando o gaussímetro e placa de aquisição.

Segue na figura 49 as curvas que mostram estes resultados utilizando o ar na bobina de tensão e 1pol de entreferro no Eletromagneto.

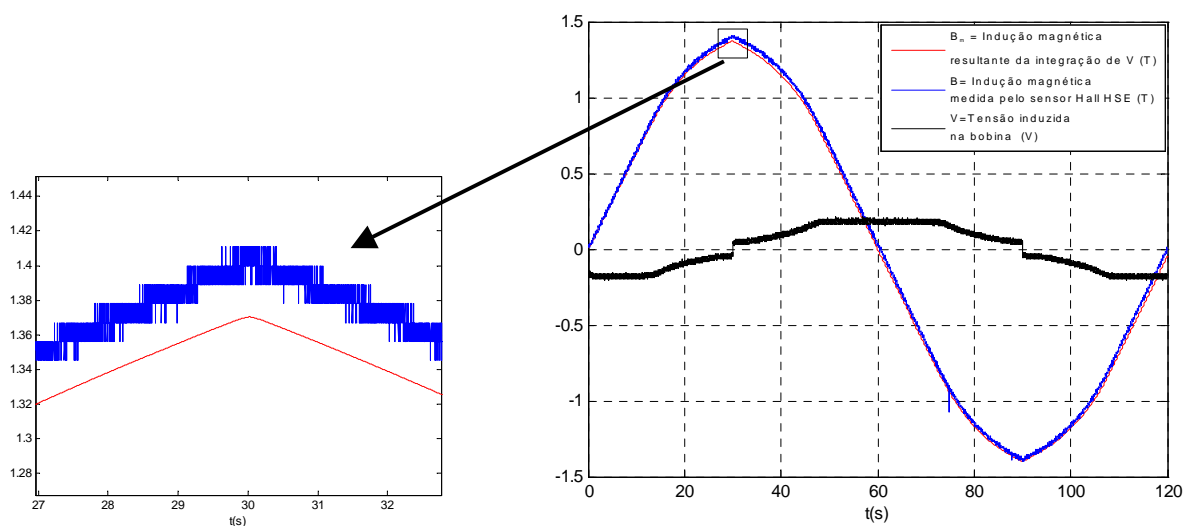


Figura 49: Curvas principais para $\pm 70A$; ar; 1 pol; com gaussímetro e placa de aquisição.

Pode ser observado na figura 49, uma região ampliada com um quadrado, onde é mostrado que vários pontos aglomeram-se em determinado período regular. Uma solução para refinamento

deste resultado seria utilizar-se de recursos computacionais, tais como filtros, contudo estes comandos poderiam alterar os resultados. A aglomeração de pontos ocorria porque o gaussímetro atrasava-se quando enviava dados para placa de aquisição, pois como já é sabido, ele pode somente realizar 5 leituras a cada segundo.

Para esse experimento a placa de aquisição estava ajustada para realizar 1000 amostras a cada segundo, portanto com uma velocidade de aquisição 200 vezes mais rápido que o gaussímetro. Com isso a leitura da placa acumulava, ao menos, 200 pontos a mais num determinado intervalo de tempo. Por essa razão foi utilizado o novo sensor Hall implementado para que fossem estudados novos resultados.

5.4.2) Resultados utilizando o novo sensor Hall para o ar.

Para fazer-se uma comparação com o resultado da seção anterior, é mostrado na figura 50 um resultado utilizando o novo sensor Hall CYSJ para o ar, com o mesmo intervalo de tempo e com todas especificações de antes. A única ressalva é que na época que foram obtidos esses resultados, ainda não tinha sido feita a calibração do sensor Hall CYSJ, discutidos em 5.2.1.

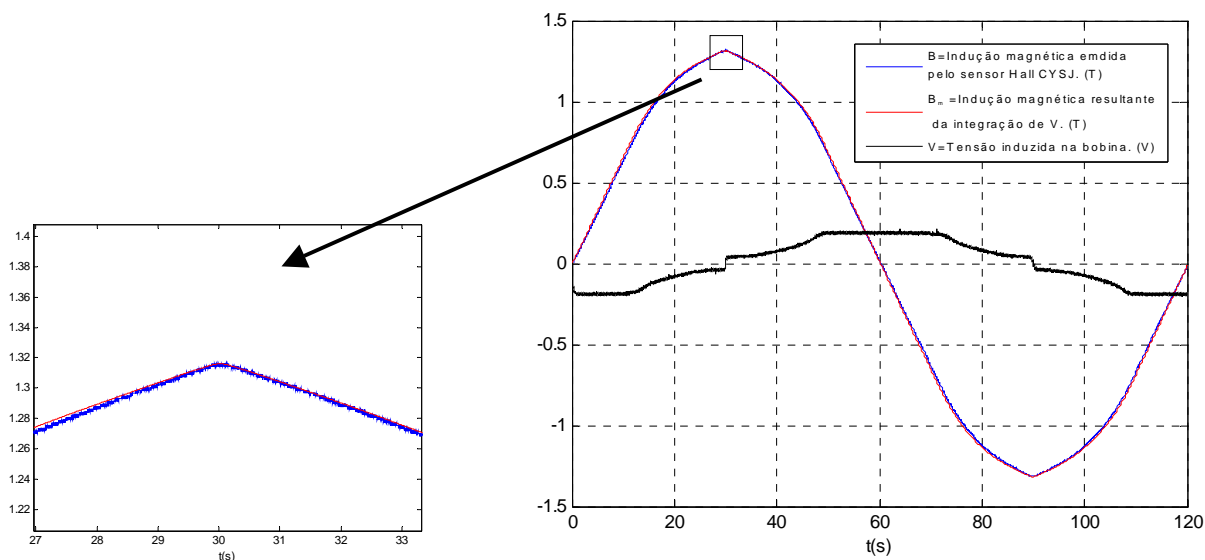


Figura 50: Curvas principais para $\pm 70A$; ar; 1pol com o novo sensor.

Vale ressaltar que esses resultados foram obtidos com todos equipamentos devidamente aterrados.

Como não há problemas de deformação em B no entreferro quando há ausência de material ferromagnético acoplado a bobina sensora, então as leituras de B e de V puderam ser feitas simultaneamente. Pode ser visto na figura 50 que os sinais de B e B_m são muito próximos. Também pode ser reparado o baixo nível de ruído da tensão induzida (V). Este último fator é muito importante para que o sinal de B_m , no momento de ter sido integrado, não seja distorcido.

Pode ser observada na figura 50, na região ampliada que os pontos estão bem menos aglomerados quando comparados ao sinal da seção anterior.

É visto na figura 51 a curva B_m vs. H, onde pode ser observado que o resultado é uma reta. Se for medida a inclinação dessa reta será obtido um valor muito próximo ao da permeabilidade magnética no vácuo. Esta reta é praticamente idêntica àquela obtida teoricamente na figura 4, salvo as amplitudes diferentes.

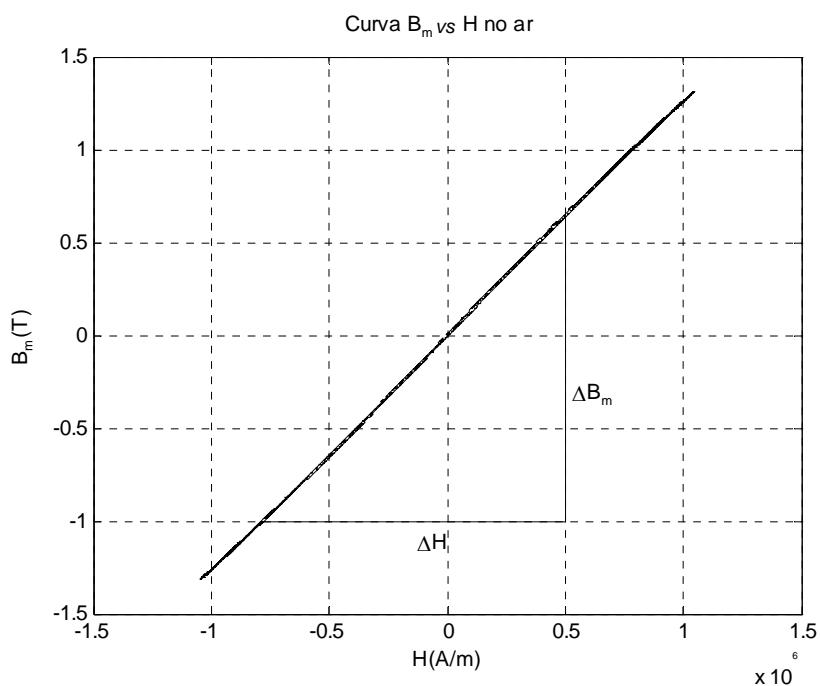


Figura 51: Curva B_m vs. H para $\pm 70A$; ar; 1 pol.

Usando os intervalos escolhidos como mostra a figura 51, o valor da permeabilidade magnética pode ser estimada em:

$$\frac{\Delta B_m}{\Delta H} = \frac{0,66 - (-1)}{[0,5 - (-0,78)] \times 10^6} = 1,2970 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

Comparando este resultado à permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 1,2570 \times 10^{-6} \text{ H/m}$), pode ser visto que os valores são bastante próximos, como esperado.

5.4.3) Problema de ruído a cada meio período.

Desde o início da implementação do SPAD, inclusive em configurações de testes, aparecia um ruído a cada meio ciclo dos sinais, tanto no sinal de indução magnética lido pelo sensor Hall CYSJ (B) quanto na tensão induzida obtida pela bobina (V). O grande problema a ser desvendado seria o porquê deste ruído desaparecer completamente para algumas aquisições e reaparecer para outras, sendo que na maioria das vezes ele se fazia presente. Antes que os resultados fossem refinados e ajustados de forma adequada, foram feitas diversas tentativas para sanar o problema, tanto em B quanto em V. Para isso, várias configurações diferentes para uso dos equipamentos e comandos de programação foram pesquisadas. Estas configurações podem ser ao menos citá-las para fins de registro:

- ✓ levantamento do terra das tomadas dos equipamentos,
- ✓ troca de todos componentes do circuito condicionador,
- ✓ construção de caixa de alumínio para servir de blindagem eletrostática para o circuito condicionador,
- ✓ retirada do estabilizador que alimentava alguns equipamentos, colocando todos diretamente na rede,
- ✓ verificação se o ruído vem da corrente da fonte de corrente, medidos por um alicate Hall,
- ✓ verificação se o ruído vem da corrente da rede, medidos por um alicate Hall,
- ✓ acrescentamento de blocos de filtros numéricos no SIMULINK,
- ✓ levantamento do terra de algumas partes do circuito e fazendo algumas combinações a esse respeito,
- ✓ mudança da fonte de alimentação para, bateria de $-12/12\text{V}$ e $-5/5\text{V}$, fonte de tensão variável totalmente analógica e gerador de funções.

Podem ser verificados nas figuras 52 e 53 os resultados com o ruído presente. Como pode ser visto o ruído é excessivo e ocorre exclusivamente em um dos picos: ou apenas no pico negativo ou apenas no pico positivo. Os motivos de buscar uma forma de eliminá-lo, ao menos parcialmente, são pelo simples fato dos sinais ficarem distorcidos quando se traçava o gráfico $B_m \text{ vs. } H$, que é objetivo principal. Conforme observada na figura 52, V e H possuem ruído muito

elevado e por conseqüência pode ser visto claramente na mesma figura que o sinal de B_m , que é resultado da integração de V , fica distorcido nessa região. Este problema reflete diretamente no resultado final, visto na figura 53. Nenhum método computacional para ajuste podia ser feito sem que se alterassem os resultados reais, portanto se prosseguiu as tentativas de eliminá-lo.

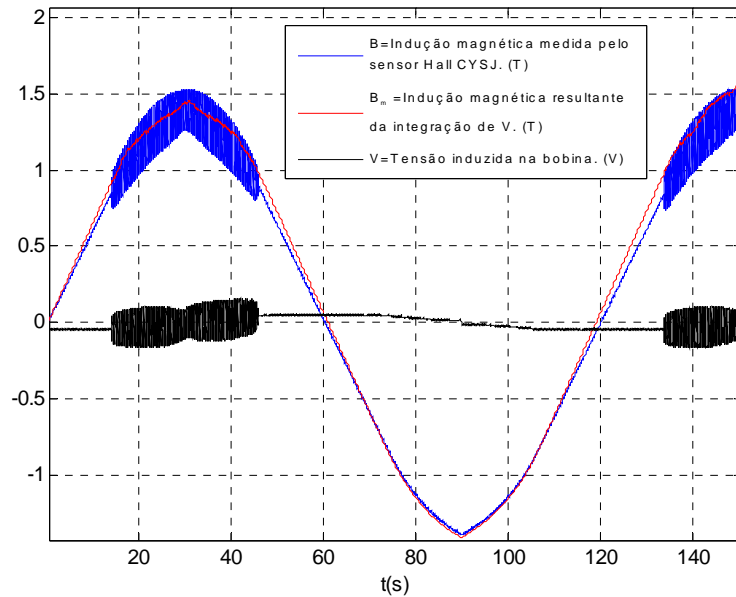


Figura 52: Curvas principais para $\pm 70A$; ar; 1 pol; com ruído.

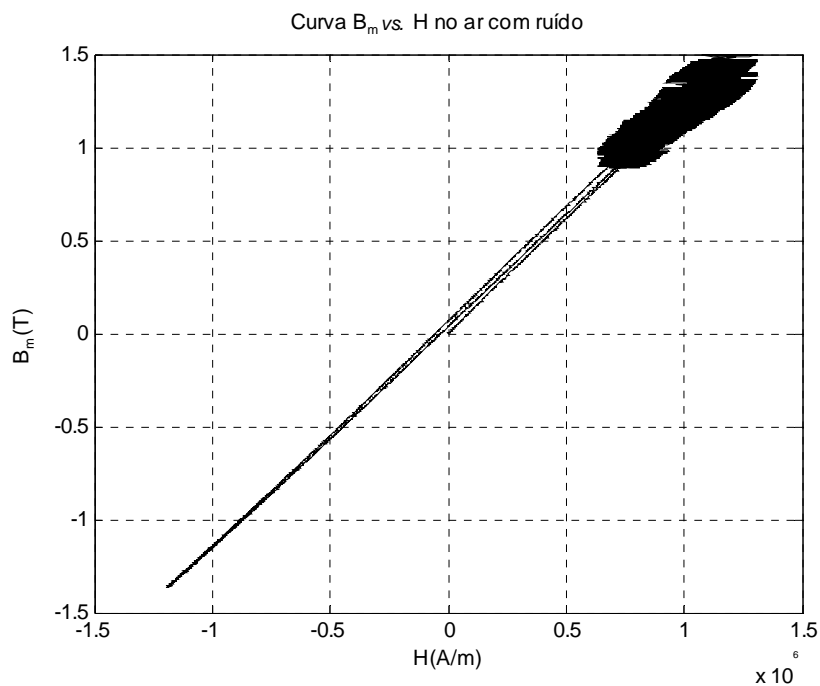


Figura 53: Curva B_m vs. H para $\pm 70A$; ar; com ruído.

5.4.4) Procedimento para atenuação do ruído.

Como visto na seção anterior, várias tentativas foram feitas para solucionar o problema de ruído, mas não foram eficazes. O procedimento que trouxe uma melhora razoável nos resultados foi conectar o polo negativo do sinal de tensão de controle de corrente diretamente ao aterramento da rede elétrica, isso fez com que o ruído ficasse bem mais fraco, contudo os resultados ainda ficavam comprometidos quando eram interpretados. Quando estes dados foram obtidos, a placa condicionadora era alimentada pela fonte de tensão e tinha ponto comum (negativo gerado na fonte em série), aliado ao terra da própria fonte de tensão.

Somente mais tarde foi constatado que o aterramento da fonte de tensão que alimentava o circuito condicionador deveria ser levantado. O circuito passou a ser alimentado pela fonte de tensão sem qualquer vínculo com o aterramento, apenas conectada ao ponto comum. Nessa configuração o ruído mostrava-se ainda menor e foi possível obter outros resultados.

5.4.5) Resultados para o ferrite.

Antes que se sejam apresentados os resultados dessa seção, serão citados em tópicos os procedimentos de construção de uma bobina sensora para obtenção dos resultados exclusivamente com o ferrite, pois se desejava checar os efeitos de máximo enlace de fluxo neste material. Como o diâmetro interno da bobina de 1000 espiras é um pouco maior que o diâmetro da amostra em questão este procedimento foi feito.

Procedimento de projeto da bobina:

- ✓ Calcular a área de seção transversal que as espiras da bobina irão acumular no carretel, levando em conta a escolha da bitola do fio esmaltado, a área ocupada pela amostra e a área ocupada pelo carretel, isso é ilustrado na figura 54. A área calculada no espaço onde serão colocadas as espiras devem ter fator multiplicativo 3, para compensar os espaços vazios entre as espiras e a espessura do verniz isolante;
- ✓ Construir o carretel com material rígido e resistente, sendo a parte central, a própria amostra, ou um tubo com mesmo diâmetro da amostra, de forma a mesma ser acomodada;
- ✓ Construir duas peças de madeira ou material plástico para que o carretel possa ser temporariamente fixado, para que a amostra fique posicionada paralelamente ao eixo da máquina bobinadeira;

- ✓ Fazer o enrolamento da bobina com a máquina bobinadeira e ter cuidado de deixar os dois terminais da bobina com bastante folga, para que seja soldada a um fio duplo trançado.

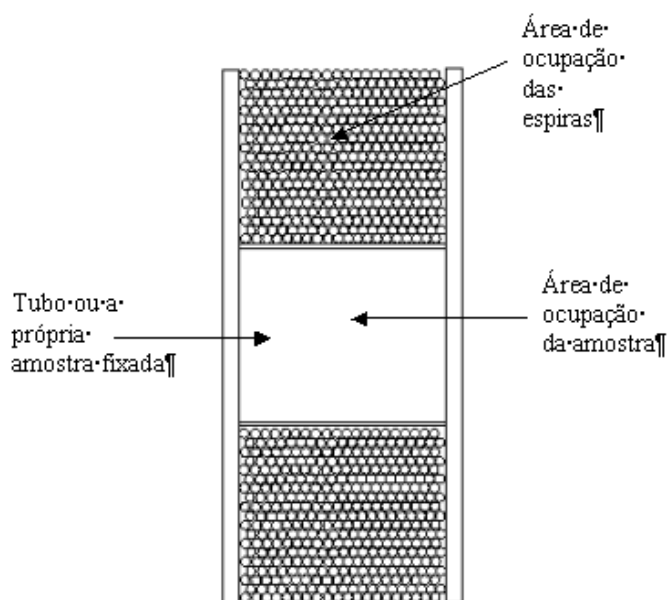


Figura 54: Figura ilustrativa para procedimento de construção da bobina.

Pode ser visto na figura 55 uma fotografia da amostra em forma de carretel, fixada em peças de madeira, e ao lado a máquina utilizada para enrolamento do fio esmaltado.

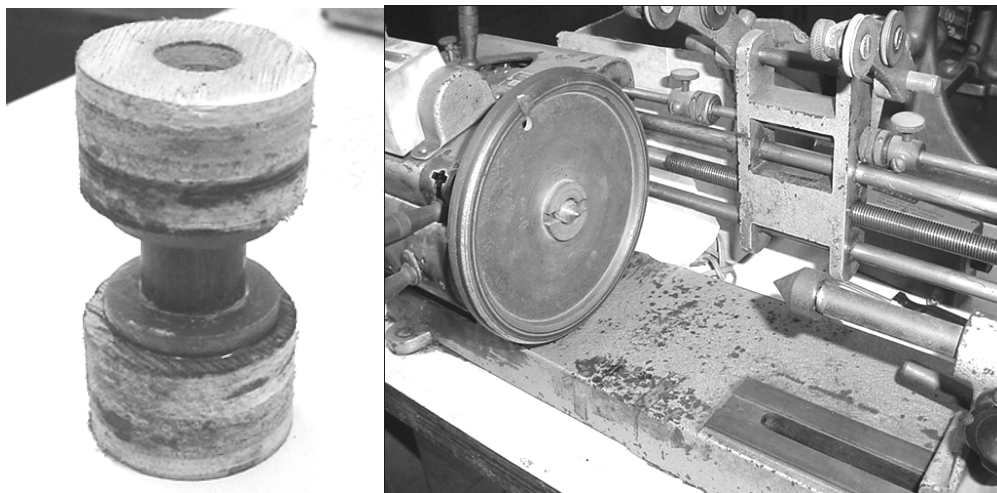


Figura 55: Fotografias da amostra em forma de carretel colada em um suporte de madeira (à esquerda) e da máquina bobinadeira (à direita).

As amostras de ferrite são conhecidas por geralmente saturarem em campos bastante baixos. Portanto a amostra construída foi envolvida com 4000 espiras para que a tensão induzida pudesse ser multiplicada por 4 em relação a bobina de 1000 espiras. Os resultados obtidos pareceram ser

consistentes quanto ao aspecto no tempo, porém B_m deveria compensado com o acréscimo de uma reta que corrigiu o *offset* gerado por V. Em projetos futuros o sinal também poderia ser compensado por uma função não linear ainda a ser pesquisada. Outra forma, seria evitar essas correções, que podem demandar tempo, buscando novas combinações com os equipamentos. Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 56 e 57.

Podem ser aplicados comandos bastante úteis para melhoria dos resultados, conquanto que não sejam alterados os vetores que geram os resultados. Como exemplo, para o resultado de B da figura 56, foi empregada a função *smooth* do Matlab. Esta função filtra as pequenas ondulações ou ruídos deixando o resultado mais inteligível.

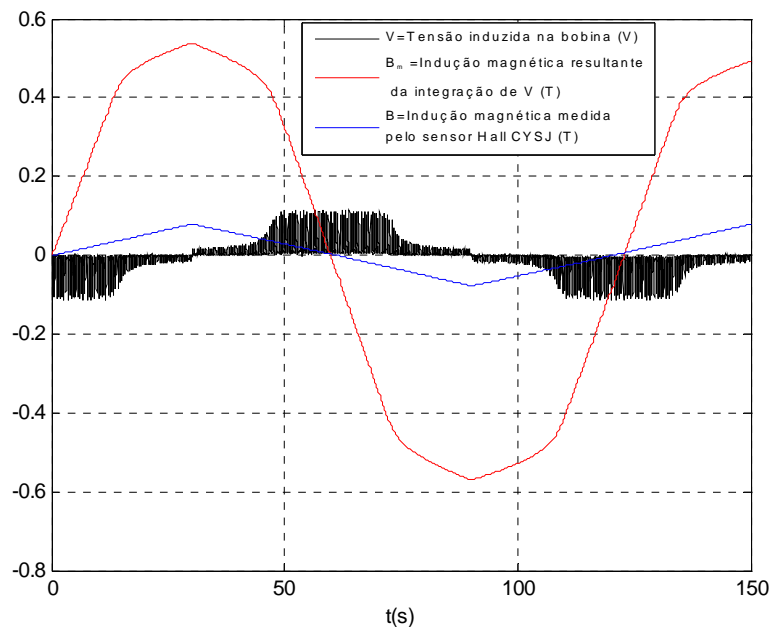


Figura 56: Curvas principais para $\pm 2,5A$; ferrite; 0,9pol.

Na figura 56 pode ser observado que B_m é bem maior que B, isto realmente ocorre para materiais ferromagnéticos. Além disso, o ponto de máximo para B em função da corrente estipulado pelo fabricante na figura 11 (2,5A, 0,08T) está bem próximo do valor encontrado nessa experiência (2,5A, 0,078T). Ainda nessa figura pode ser visto ruído excessivo em V, apesar disso, B_m obtido possui o aspecto esperado, graças à simetria do sinal de tensão induzida. Este ruído na tensão de V é proveniente do próprio sistema, pois a corrente aplicada é muito baixa e este é um fator também a ser averiguado em resultados futuros.

Outro fator a ser destacado é o atraso quase inexistente de B_m , conseqüente do fenômeno de histerese. Isto traduz que ainda devem ser feitos ajustes no sistema ou modificações que possam solucionar esse caso.

É visto na figura 57 a curva de histerese gerado por esses sinais.

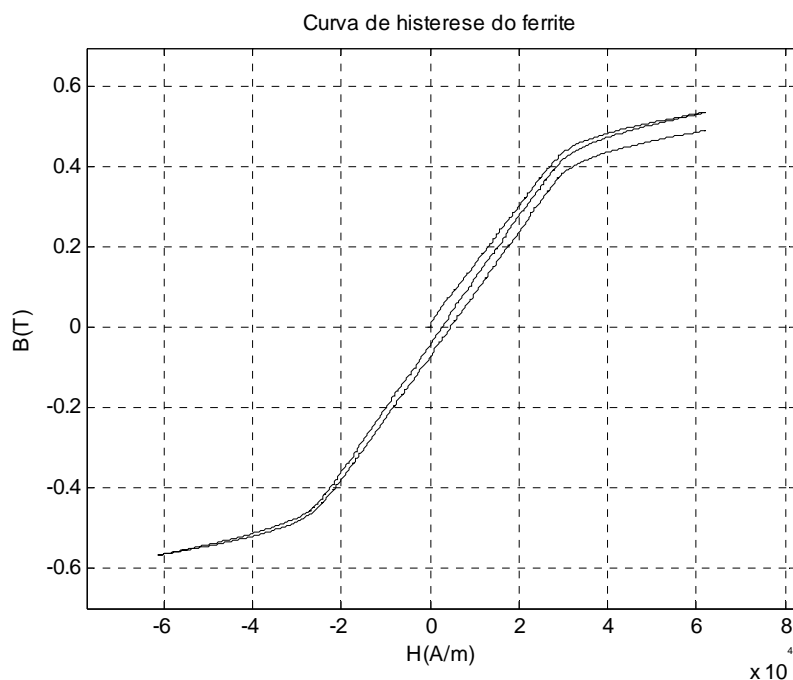


Figura 57: Curva B_m vs. H para $\pm 2,5A$; ferrite; 0,9pol.

Pode ser visto que o laço de histerese na figura 57 não coincide corretamente com o ponto que fechamento, isto ocorreu devido à presença de um *offset* na integração do sinal de V adicionada à função não linear mencionada nesta seção.

5.4.6) Resultados para o $Nd_2Fe_{14}B$.

O $Nd_2Fe_{14}B$, é uma liga que satura apenas em presença de campos bem mais elevados que o ferrite, saturando tipicamente em torno de 1,6 T [1]. São caracterizados por terem alta coercividade, e por essa razão são utilizados no mercado como ímãs permanentes.

Pode ser visto na figura 58 um atraso sensível logo no primeiro ciclo do sinal de B_m em relação a B, como esperado, contudo não suficiente para caracterizar esse material, devido a baixa coercividade apresentada no gráfico (em torno de $0,1 \times 10^6$ A/m), segundo D. Jiles [1] é visto que os valores de coercividade, estão tipicamente em torno de $0,8 \times 10^6$ A/m e $1,6 \times 10^6$ A/m. Outro

problema a ser avaliado é a baixa remanência mostrada na figura 59 (em torno de 0,25T), pois os valores típicos estão em torno de 1,3T.

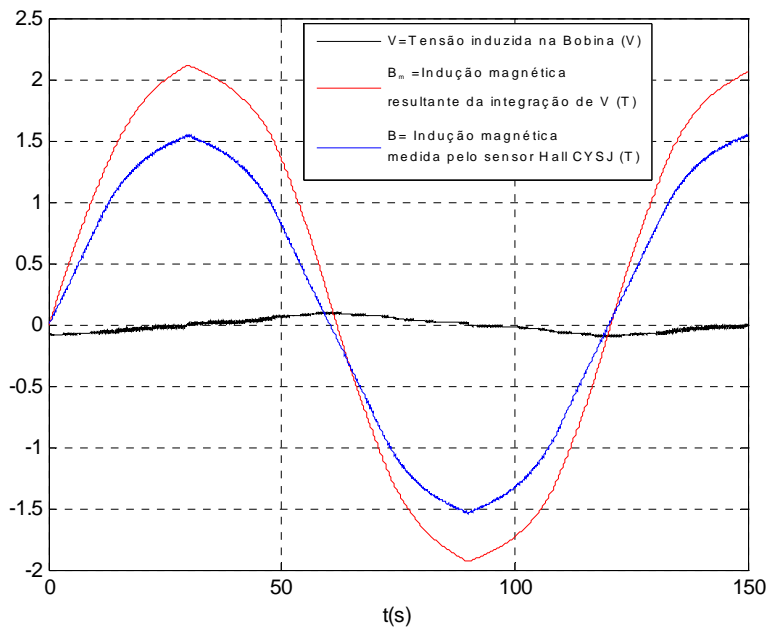


Figura 58: Curvas principais para $\pm 70A$; NdFeB; 0,9pol

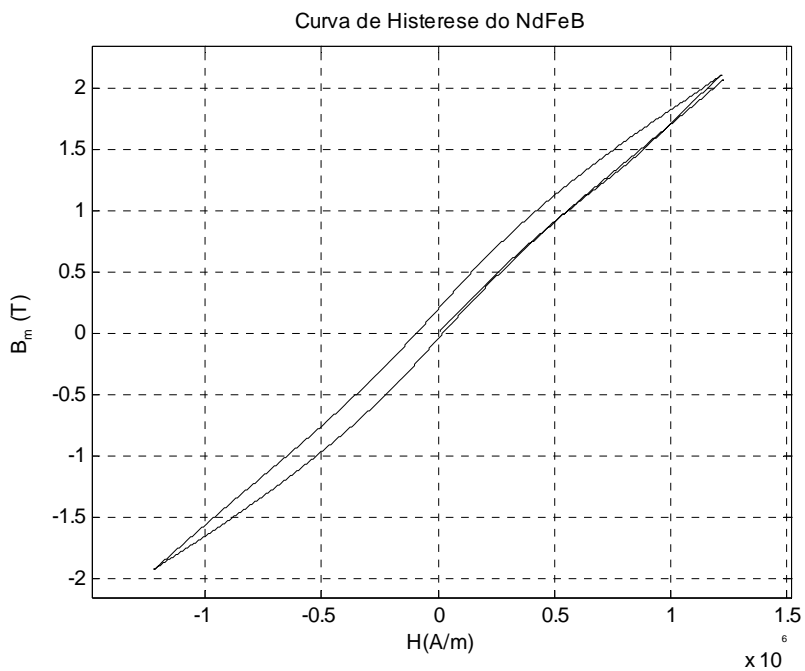


Figura 59: Curva B_m vs. H para $\pm 70A$; NdFeB; 0,9pol.

Conforme visto na 59 a saturação da amostra não foi atingida, mesmo com a aplicação de um campo magnético elevado (em torno de $1,2 \times 10^6$ A/m). Como pode ser visto na figura 58 o valor de B_m alcançou valores superiores a 2T, o que não condiz com os valores típicos apresentados na literatura. Este resultado indica que é necessário uma investigação mais detalhada das unidades envolvidas.

Os procedimentos utilizados na automação da aquisição dados para as curvas de magnetização dos materiais analisados mostraram a grande potencialidade dos sistemas de medidas apresentados, mesmo sendo necessário a realização de alguns ajustes para o seu pleno funcionamento.

Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos dois sistemas de medidas para obtenção de curvas B_m vs. H .

Estes sistemas possibilitaram a automação do processo de medida dessas curvas e permitiram averiguar diversas interpretações eletromagnéticas dos materiais estudados. Estes sistemas contaram com diversos equipamentos de empresas especializadas em automação e também contaram com dispositivos implementados para ajustes e controle. Para cada sistema, estes equipamentos foram combinados adequadamente, e assim, permitiram realizar o intento para implementação do sistema de medida para curvas de magnetização de materiais ferromagnéticos. As medidas realizadas mostraram-se adequadas aos objetivos pretendidos nesse trabalho.

No Sistema de medidas utilizando uma placa GPIB (SGPIB), foi possível realizar as primeiras medidas com o objetivo de familiarização com os equipamentos e observar quais as melhoras que poderiam ser feitas a partir do antigo sistema inicial. Portanto diversas alterações no sistema foram realizadas com o uso de recursos computacionais do gaussímetro e do multímetro, podendo assim realizar os primeiros resultados que permitiram criar métodos eficazes para obtenção de curvas de indução magnética (B). Logo após foram desenvolvidos métodos de integração e de um sistema gráfico para controle deste sistema, de tal forma que se obtivesse o resultado da integração do sinal de tensão da bobina sensora, para que os resultados de indução magnética média (B_m) fossem digitalizados. Por fim, este sistema foi rearranjado com a utilização de ajuste manual e controle através de um gerador de funções, e portanto esta nova configuração, dentro de suas limitações, permitiu realizar bons resultados.

No Sistema de medidas utilizando placa de aquisição de dados (SPAD), foi permitido o uso de novos recursos, onde foi possível substituir o gaussímetro e o voltímetro pela placa de aquisição de dados PCI-1711 e por dispositivos de ajuste e controle que foram confeccionados. Este sistema alcançou o objetivo de obter resultados que superassem as limitações do sistema anterior, para que as curvas B_m vs. H de materiais ferromagnéticos pudessem ser obtidas de forma automatizada, a partir do ponto desejado e sem disparo manual. Os resultados foram satisfatórios quanto aos fenômenos magnéticos ocorridos, todavia foram constatados a necessidade de ajustes computacionais ou outros métodos que sanassem os problemas surgidos.

Em ambos sistemas os dispositivos confeccionados mostraram-se bastante úteis na obtenção dos resultados. Estes dispositivos foram discutidos com detalhes tanto a respeito do

funcionamento quanto o método de confecção. Diversas ilustrações foram essenciais para que fosse possível transmitir claramente suas contribuições para cada um dos os sistemas apresentados.

De uma forma geral ambos os sistemas deram os passos preliminares para obtenção das curvas B_m vs. H e permitiram utilizar e comparar os resultados da teoria com os resultados dos sistemas físicos.

Trabalhos Futuros

É possível desenvolver em projetos futuros, diversas configurações para ambos sistemas, que possivelmente poderiam contribuir na melhoria dos resultados. Ao longo do projeto foram sugeridos alguns procedimentos a serem retomados, como a utilização de uma placa de controle com interface GPIB para o SGPIB. Outra sugestão seria encontrar novos recursos que filtrem os ruídos de tensão ocorridos na obtenção dos sinais de tensões induzidas nas bobinas sensoras para o caso do SPAD, devido às distorções e *offset* discutidos.

Este trabalho já está sendo conduzido por novos alunos do laboratório. Com o avanço na obtenção dos resultados pela atualização dos programas de controle e realização de novos métodos para automação será possível obter curvas de histerese condizentes com a literatura. Alguns testes de medidas de magnetização de materiais mais complexos, tais como os supercondutores, já estão sendo feitos para que sejam estudados os resultados. Essa coleta de resultados, em conjunto com os resultados obtidos nesse trabalho, possibilitará que os sistemas possam ser otimizados.

Bibliografia

- [1] JILES, David.; **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. 2. ed. Editora Chapman & Hall, 1998.
- [2] Luiz Alberto L. de Almeida; Antonio Marcus N. Lima; Gurdip S. Deep; Helmut Neff. ***Um modelo diferencial para histerese magnética: Representação algébrica recursiva***. DEE- UF BA, Bahia; DEE - UFCG, Paraíba; VIR-TECH A/S, Kuldysen 10, DK-2630 Taastrup, Denmark, *Revista Controle & Automação/Vol.14 no.1/Jan., Fev. e Março 2003*, Artigo submetido em 20/12/00, 1ª Revisão em 11/04/02
- [3] **FERROXCUBE**. Disponível em: <<http://www.ferroxcube.com/>> Último acesso 1 de Fevereiro de 2008.
- [4] LAKESHORE; **User's Manual EM4 Series & EM7 Electromagnets**.Revision 1.5. , 11 April 2002.
- [5] LAKESHORE; **Technical Manual $\pm 35V \pm 70A$ Power Suply 100PPM 208/220/380/400V**.
- [6] Thermo NESLAB; **Thermo NESLAB Manual, Merlin Recirculating Chillers**. Revision 02 de Março de 2003.
- [7] Disponível em:<<http://en.wikipedia.org/wiki/Chiller>> Último acesso 15 de Dezembro de 2007.
- [8] **NATIONAL INSTRUMENTS**; Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/products/us/4gpib665-668.pdf>> Último acesso 10 Fevereiro de 2008.
- [9] Disponível em:<http://www.measurementcomputing.com/gpib_board.htm> Último acesso 15 de Dezembro de 2007.
- [10] HEWLETT – PACKARD; **User's Guide HP 34401A Multimeter**. 4 ed. Printed in U.S.A., February 1996.
- [11] LAKESHORE; **User's Manual Model 450 Gaussimeter**.Revision 1.4. , 18 February 2000.
- [12] ADVANTECH; **User's Manual PCI-1711 Series**. 1st ed. Printed in Taiwan, June 2001.
- [13] **ADVANTECH**; Disponível em: <http://www.advantech.com/products/100-kS-s-12-bit-16-ch-SE-Input-Low-Cost-Multifunction-Card/mod_1-2311JT.aspx> Último acesso 15 Fevereiro de 2008.
- [14] 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.

[15] RIO LINK Tecnologia Ltda; **Manual de Instruções da fonte digital dupla 30V/6A modelo ICEL PS6100.**

[16] *BB AUTOMAÇÃO LTDA*; Disponível em: <http://www.bbautomacao.com.br/hall_magnetico/PDFs_Portugues/Elementos%20Efeito%20Hall%20GaAs%20CYSJ1069.pdf> Último acesso 2 Agosto 2007.

[17] Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina111.pdf>> Último acesso 10 de Fevereiro de 2007.

Anexos

Anexo A

```
% Este programa simula as curvas BmvsH para o ar
% e para materiais ferromagnéticos a partir da
% aproximação da entrada de campo magnético (H)
% por uma função senoidal. A indução magnética
%(B) será calculada a partir dessa função.

clear
mizero=4*pi*1e-7;
%Variar os parâmetros abaixo para cada tipo de material.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Hc=18;Bs=0.47;h0=23;zeta=0.8;d=0.02;Br=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t=0:d:15*pi; H=90*sin(2.63*t).*exp(t/2000);
delta=2*( [0 diff(H)]>0)-1;
reversal=[diff(delta) 0];
Hr=H(1);

for n=1:1:150
    Hpr(n)=h0*tan(pi*Br/(2*Bs))+delta(n)*Hc-Hr;
    Hp=Hpr(n)*(tanh(-zeta*(H(n)-Hr)/Hpr(n))+1);
    B(n)=2*(Bs/pi)*atan((H(n)-delta(n)*Hc+Hp)/h0);
    x(n)=H(n);
    if reversal(n)~=0;
        Hr=H(n);
        Br=B(n);
    end
end

end

% t=0:150.3/length(x):150;
% plot(t,x*1.32e4*mizero,'k','LineWidth',2);
% grid on
% xlabel('t(s)')
% ylabel('B_m(T)')
% title('B_m em função do tempo')
%
% t=0:150.3/length(x):150;
% plot(t,x*1.32e4,'k','LineWidth',2);
% grid on
% xlabel('t(s)')
% ylabel('H(A/m)')
% title('H aplicado em função do tempo')
%
% plot(x*1.32e4,x*1.32e4*mizero,'k','LineWidth',2);
% grid on
% xlabel('H(A/m)')
% ylabel('B_m(T)')
% title('Curva B_mxH do ar')

% t=0:150.3/length(x):150;
% plot(t,B,'k','LineWidth',2);
% grid on
% xlabel('t(s)')
% ylabel('B_m(T)')
```

```

% title('B_m aplicado em função do tempo para o ferrite 3c15')
%
t=0:150.3/length(x):150;
plot(t,x,'k','LineWidth',2);
grid on
xlabel('t(s)')
ylabel('H(A/m)')
title('H aplicado em função do tempo para o ferrite 3c15')
% %
% t=0:150.3/length(x):150;
% plot(x,B,'k','LineWidth',2);
% grid on
% xlabel('H(A/m)')
% ylabel('B_m(T)')
% title('Curva de histerese para o ferrite 3c15')

```

Anexo B

```
function varargout = Teste(varargin)
% TESTE M-file for Teste.fig
%     TESTE, by itself, creates a new TESTE or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = TESTE returns the handle to a new TESTE or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     TESTE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in TESTE.M with the given input arguments.
%
%     TESTE('Property','Value',...) creates a new TESTE or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%     applied to the GUI before Teste_OpeningFunction gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%     stop. All inputs are passed to Teste_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Teste

% Last Modified by GUIDE v2.5 09-Aug-2006 10:56:00

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Teste_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Teste_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Teste is made visible.
function Teste_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Teste (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Teste
```

```

handles.output = hObject;
zero=0.000;
handles.number_errors = 0;
guidata(hObject, handles);
set(handles.corr, 'string', zero)
set(handles.gauss, 'string', zero)
set(handles.volt, 'string', zero)
set(handles.temp, 'string', zero)
set(handles.Imin, 'string', zero)
set(handles.Imax, 'string', zero)
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
set(handles.mensagem, 'string', ...
    ['Entre antes de iniciar, com a velocidade desejada, com as correntes
    ', ...
    ' inicial e final e o numero de voltas.'])
set(handles.voltas, 'string', 1)
% UIWAIT makes Teste wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Teste_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function veloc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to veloc (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
else
    set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes on selection change in veloc.
function veloc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to veloc (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject, 'String') returns veloc contents as cell array
% contents{get(hObject, 'Value')} returns selected item from veloc
veloc=get(hObject, 'string');
handles=guihandles(handles.veloc);
guidata(handles.veloc, handles);

function Imin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to Imin (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function Imin_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Imin (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Imin as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Imin as a
double

% Determine whether val is a number between -70 and 70
val = str2double(get(handles.Imin,'String'));
if isnumeric(val) & length(val)==1 & ...
    val >= get(handles.slider1,'Min') & ...
    val <= get(handles.slider1,'Max')
    set(handles.slider1,'Value',val);
    Imin=get(hObject,'String');
    handles=guihandles(handles.Imin);
    guidata(handles.Imin,handles);
else
% Increment the error count, and display it
%set(handles.mensagem,'Visible',on);
handles.number_errors = handles.number_errors+1;
    guidata(hObject,handles); % store the changes
    set(handles.mensagem,'String',...
        ['Cuidado! Valor errado de corrente. Entre com valores entre -70 e
70.',...
        ' Voce entrou com valor(es) errado(s) ',...
        num2str(handles.number_errors),' vez(es).']);
set(handles.slider1,'Value',0);
set(handles.Imin,'String',0);

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%        'usewhitebg' to 0 to use default.  See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else

```

```

        set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
    end

% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'Value') returns position of slider
%         get(hObject, 'Min') and get(hObject, 'Max') to determine range of
slider

set(handles.Imin, 'String', ...
    num2str(get(handles.slider1, 'Value')));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%         'usewhitebg' to 0 to use default.  See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject, 'BackgroundColor', [.9 .9 .9]);
else
    set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes on slider movement.
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'Value') returns position of slider
%         get(hObject, 'Min') and get(hObject, 'Max') to determine range of
slider

set(handles.Imax, 'String', ...
    num2str(get(handles.slider2, 'Value')));

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Imax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Imax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
else

```

```

        set(hObject, 'BackgroundColor', get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'));
    end

function Imax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Imax (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of Imax as text
%          str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of Imax as a
double

val = str2double(get(handles.Imax, 'String'));
% Determine whether val is a number between -70 and 70
if isnumeric(val) & length(val)==1 & ...
    val >= get(handles.slider2, 'Min') & ...
    val <= get(handles.slider2, 'Max')
    set(handles.slider2, 'Value', val);
    Imax=get(hObject, 'string');
    handles=guihandles(handles.Imax);
    guidata(handles.Imax, handles);

else
% Increment the error count, and display it
    %set(handles.mensagem, 'Visible', on);
    handles.number_errors = handles.number_errors+1;
    guidata(hObject, handles); % store the changes
    set(handles.mensagem, 'String', ...
        ['Cuidado! Valor errado de corrente. Entre com valores entre -70 e
70.', ...
        'Voce entrou com valor(es) errado(s) ', ...
        num2str(handles.number_errors), ' vez(es).']);
    set(handles.slider2, 'Value', 0);
    set(handles.Imax, 'String', 0);
end

% --- Executes on button press in zerar.
function zerar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to zerar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
zero=0.000;
gauss=gpib('ni', 0, 01);
mult=gpib('ni', 0, 20);
fopen(mult);
fopen(gauss);
fprintf(mult, '*rst');
fprintf(gauss, 'anod2');
set(handles.corr, 'string', zero)
set(handles.gauss, 'string', zero)
set(handles.volt, 'string', zero)
set(handles.temp, 'string', zero)
set(handles.Imin, 'string', zero)
set(handles.Imax, 'string', zero)
set(handles.slider1, 'Value', zero);
set(handles.slider2, 'Value', zero);
% set(handles.mensagem, 'Visible', on);

```



```

% set(handles.mensagem,'Visible',on);
D='Desligado';
set(handles.mensagem,'string',D)
fprintf(gauss,'acon %g',zero);
fclose(gauss);
fclose(mult);
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function titulo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to titulo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% -----
function titulo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to titulo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function eixo_y_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to eixo_y (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% -----
function eixo_y_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to eixo_y (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function eixo_x_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to eixo_x (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% -----
function eixo_x_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to eixo_x (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function voltas_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to voltas (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function voltas_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to voltas (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of voltas as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of voltas as a
double

% --- Executes on button press in Parar.
function Parar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Parar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

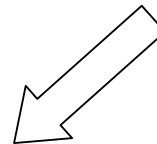
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of Parar

pause;
selection = questdlg(['Tem certeza que deseja parar a aquisicao de
dados?'],...
                    ['Parar' get(handles.figure1,'Name') '...'],...
                    'Sim','Continuar','Sim');
if strcmp(selection,'Continuar')
    return;
else
    stop;
    fprintf(mult,'*rst');
    fprintf(gauss,'anod2');
    set(handles.corr,'string',zero)
    set(handles.gauss,'string',zero)
    set(handles.volt,'string',zero)
    set(handles.temp,'string',zero)
    set(handles.Imin,'string',zero)
    set(handles.Imax,'string',zero)
    set(handles.slider1,'Value',zero);
    set(handles.slider2,'Value',zero);
    % set(handles.mensagem,'Visible',on);
    % set(handles.mensagem,'Visible',on);
    I='Interrupcao da aquisicao de dados. ';
    set(handles.mensagem,'string',I)
    fprintf(gauss,'acon %g',zero);
    fclose(gauss);
    fclose(mult);
end

% --- Executes on button press in iniciar.
function iniciar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to iniciar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% clear vgauss vcorr vmult
% clear c d imin curvas dt k t imax dx tmax zero
% clc;
delete('C:\Usuarios\Clayton\VETORES.mat');
zero=0;
v=get(handles.voltas,'string');

```



```

Imax=get(handles.Imax,'string');
Imin=get(handles.Imin,'string');
M=get(handles.veloc,'Value');
switch M
case 1
    M=1
case 2
    M=0.5
case 3
    M=0.2
case 4
    M=0.1
case 5
    M=0.05
case 6
    M=0.02
case 7
    M=0.01
end
V1=str2mat(v);
%N=str2mat(M);
%dx=str2num(N);
dx=M;
x=str2mat(Imax);
y=str2mat(Imin);
V=str2num(V1);
imax1=str2num(x);
imin1=str2num(y);
imax=(100/70)*imax1;
imin=(100/70)*imin1;
if (imin1<-70)|(imax1>70)
    handles.number_errors = handles.number_errors+1;
    guidata(hObject,handles); % store the changes
    set(handles.mensagem,'String',...
        ['Cuidado! Valor errado de corrente. Entre com valores entre -70 e
70.',...
        ' Voce entrou com valor(es) errado(s) ',...
        num2str(handles.number_errors),' vez(es).']);
    imax=0;
    imin=0;
end
dt=0.2;
tmax=V*dt*((imax-imin)+1)/dx;
if dt/dx >0.07
% Isto garante que a corrente seja variada em 10A/s.
tmax
portas= instrfind;
gauss = gpib('ni',0,01);
mult = gpib('ni',0,20);

%endereca a porta GPIB do gauss "interliga o comp com o gauss".

fopen(gauss);
fopen(mult);
%depende daquilo que esta acima "open ou closed"

a=get(gauss,'status')

```

```

b=get(mult, 'status')
%verifica ligado /desligado.
if a == 'open'
L='Ligado';
set(handles.mensagem, 'string',L)
else
set(handles.mensagem, 'string', 'Erro interno. Por favor reinicie o programa.' )
end
%Definindo configuracoes iniciais do gaussmetro
fprintf(gauss, 'acdc 0');%dc
fprintf(gauss, 'unit t');%deixa em tesla
if imax<=16
fprintf(gauss, 'range 1')%alcance de 300mT
else
fprintf(gauss, 'range 0')%alcance de 3T
end
fprintf(gauss, 'anod 2');% controle remoto
fprintf(gauss, 'aocon %g', imin);%varia a tensao em percentagem, em que %g
representa
%
% pontos flutuantes; faz a intercomunicacao
entre comp e gauss.

fprintf(mult, '*cls');
fprintf(mult, 'init');
fprintf(mult, 'conf:volt:dc 0.5,1e-2');
fprintf(mult, 'volt:dc:nplc 0.2');
% fprintf(mult, 'zero:auto off');
% fprintf(mult, 'freq:aper 0.01');para medidas de frequencia
% fprintf(mult, 'per:aper 0.01'); para medidas de periodo
% fprintf(mult, 'conf:volt:dc:10');

% Como a variacao de corrente cooresponde 10A/s entao

tic
t=0;
k=1;
P=1;
mi=4*pi*1e-7;
S=7.1e-4;%Area em m2 da amostra
N=1000;%Numero de espiras
vgauss1(1)=zero;
vmult(1)=zero;
vtempo(1)=zero;
vgauss(1)=zero;
vcorr(1)=zero;
vgauss2(1)=zero;
fprintf(gauss, 'fast 1');
%for P = 1:V
while ((toc<=tmax) & (imin<=imax))
if t<toc
% Logica da construcao do grafico.
j=k+1;
fprintf(gauss, 'read?');
vgauss(j)=str2num(fscanf(gauss));% e armazenado o que veio do gauss em
string
% o valor string(referentes a numeros e simbolos mat) pass a ter valor
numerico

```

```

% tic
% while toc<1e-6
% end
%
    fprintf(mult, 'read?');
    vmult(j)= fscanf(mult, '%g');
    vgauss1(j)=vgauss1(k)+((vmult(j)+vmult(k))*dt)/(2*S*N);%rotina de
integracao
    %para calculo de fluxo de campo medio (Bm=vgauss1)
%    vgauss2(j)= vgauss(j)/mi;
    vcorr(j)=0.7*imin;% valor de corrente em amperes
    vtempo(j)=t;
    imin=imin+dx;% OK
    t=t+dt; % OK
    k=k+1; % OK
    imin
    t
    set(handles.corr, 'string', vcorr(k))
    set(handles.gauss, 'string', vgauss(k))
    set(handles.volt, 'string', vmult(k)*1000)
    set(handles.temp, 'string', vtempo(k))
    if imin<=imax
        fprintf(gauss, 'aocon %g', imin);
        fprintf(gauss, 'field');% retorna o valor lido por aocon %g em cada
looping;
                                %com filtro fica mais preciso
    end
end
end
end

    fprintf(gauss, 'aocon %g', zero); %faz a tensao ir para zero, concomitante a
corrente
% tic
% while toc<1
% end
vgauss2=vgauss/mi;
save('VETORES', 'vmult', 'vgauss2', 'vcorr', 'vtempo', 'vgauss1');
%close all
%plot(vgauss2, vgauss1)
%hold
%plot(vtempo, vgauss1, 'o')
%hold
%plot(vtempo, vmult, 'o')

fprintf(gauss, '*rst');
fclose(gauss);
fprintf(mult, '*rst');
fclose(mult);
p=get(gauss, 'status');
if p == 'closed'
D='Desligado';
set(handles.mensagem, 'string', 'Desligado')
else
set(handles.mensagem, 'string', 'Erro interno. Por favor reinicie o programa.')
end
tic
while toc<1

```

```

end
if ((imax1)&(imin1)) == 0
    set(handles.mensagem,'string','Inicie o programa com pelo menos uma das
correntes diferentes de zero')
end
end
handles=guihandles(handles.iniciar);
guidata(handles.iniciar,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function graf_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to graf (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes on selection change in graf.
function graf_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to graf (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns graf contents as cell array
%       contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from graf

%--- Executes on button press in grafico.
function grafico_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to grafico (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
load('VETORES');
popup_sel_index = get(handles.graf, 'Value');
switch popup_sel_index
    case 1
        set(handles.eixo_x,'string','H(A/m)')
        set(handles.eixo_y,'string','B(T)')
        set(handles.titulo,'string','Grafico de Hiterese')
        plot(vgauss2,vgauss1,'o')
        grid
    case 2
        set(handles.eixo_x,'string','t(s)')
        set(handles.eixo_y,'string','H(A/m)')
        set(handles.titulo,'string','Tempo X Intesidade de Campo')
        plot(vtempo,vgauss2,'o')
        grid
    case 3
        set(handles.eixo_x,'string','t(s)')
        set(handles.eixo_y,'string','B(T)')
        set(handles.titulo,'string','Tempo X Campo')

```

```

        plot(vtempo,vgauss1,'o')
        grid
    case 4
        set(handles.eixo_x,'string','t(s)')
        set(handles.eixo_y,'string','FEM(V)')
        set(handles.titulo,'string','Tempo X Tensao')
        plot(vtempo,vmult,'o')
        grid
    case 5
        set(handles.eixo_x,'string','t(s)')
        set(handles.eixo_y,'string','I(A)')
        set(handles.titulo,'string','Tempo X Corrente')
        plot(vtempo,vcorr,'o')
        grid
    case 6
        set(handles.eixo_x,'string','')
        set(handles.eixo_y,'string','')
        set(handles.titulo,'string','')
        plot(0,0)
end

% --- Executes when figure1 window is resized.
function figure1_ResizeFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% -----
function Arquivo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Arquivo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% -----
function arquivo_abrir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to arquivo_abrir (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

[filename, pathname] = uigetfile('*.mat', 'Arquivos.mat');
if isequal(filename,0)|isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    disp(['File ', pathname, filename, ' found'])
end

% file = uigetfile('*.mat');
% if ~isequal(file, 0)
%     open(file);
% end

% -----
function Arquivo_salvar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Arquivo_salvar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% -----

```

```

function salvar_figura_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to salvar_figura (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
file = uiputfile('*.mat');
% if ~isequal(file, 0)
    save(file);
% end

% -----
function salvar_pontos_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to salvar_pontos (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
arq = uiputfile('*.mat');

save('arq', 'vmult', 'vgauss2', 'vcorr', 'vtempo', 'vgauss1');
% -----
function Arquivo_visualizar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Arquivo_visualizar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
printpreview(handles.figure1)

% -----
function Arquivo_imprimir_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Arquivo_imprimir (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
printdlg(handles.figure1)

% -----
function Arquivo_fechar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Arquivo_fechar (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
selection = questdlg(['Fechar o programa?'],...
                    ['Fechar ' get(handles.figure1,'Name') '...'],...
                    'Sim', 'Nao', 'Sim');
if strcmp(selection, 'Nao')
    return;
else
    close
end

```


Anexo C

```
%-----Script para cálculo da Curva BmvsH-----
%
% *** Constantes de proporcionanilade para cálculo de Bm ***
%
% N= número de espiras.
% S= Área de seção da bobina.
% O "default" de N e S são respectivamente N=1000 espiras
%e S=7.0686e-004 m².
%
% *** 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;
N=1000;
S=7.0686e-004;
%S=2.14e-4;
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('Ah... mané, quer destruir a fonte de corrente?');
    disp('Já setei para 70A');
    disp('Digite qualquer tecla para continuar...');
    pause
else
    C=x/70;
    corrente=x;
end
clc

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

```