

SISTEMA DE TESTE E CALIBRAÇÃO ATIVA PARA MAGNETÔMETROS
DE NÚCLEO SATURADO

Gustavo Gomes Cabral

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr. André Wiermann

Co-orientador(a): Dr. Luiz Carlos de Carvalho
Benyosef

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

Cabral, Gustavo Gomes

Sistema de Teste e Calibração Ativa para
Magnetômetros de Núcleo Saturado/Gustavo Gomes
Cabral. – Rio de Janeiro: ON, 2019.

83 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador(a): André Wiermann

Co-orientador(a): Luiz Carlos de Carvalho Benyosef
Dissertação (mestrado) – ON/Programa de Pós-
graduação em Geofísica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 81 – 83.

1. Magnetômetro Fluxgate. 2. Sensor Magnético.
3. Calibração. I. Wiermann , André .II. Observatório Nacional. III. Título.

“SISTEMA DE TESTE E CALIBRAÇÃO ATIVA PARA MAGNETÔMETROS
DE NÚCLEO SATURADO”

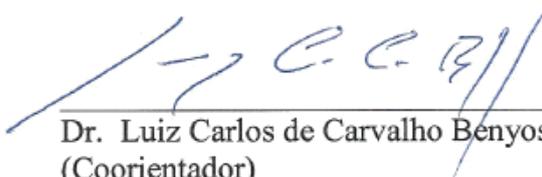
GUSTAVO GOMES CABRAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:



Dr. André Wiermann – ON/MCTIC
(Orientador)



Dr. Luiz Carlos de Carvalho Benyosef – ON/MCTIC
(Coorientador)



Dr. Cosme Ferreira da Ponte Neto – ON/MCTIC



Dr. Guilherme de Andrade Garcia - INMETRO

RIO DE JANEIRO – BRASIL

19 DE SETEMBRO DE 2019

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

SISTEMA DE TESTE E CALIBRAÇÃO ATIVA PARA MAGNETÔMETROS DE NÚCLEO SATURADO

Gustavo Gomes Cabral

Setembro/2019

Os magnetômetros de núcleo saturado, ou *fluxgate magnetometers*, requerem a aplicação de técnicas específicas de calibração e teste visando a obtenção de seus coeficientes de calibração e confirmação de suas características técnicas. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um conjunto de procedimentos de alto nível, aliados a sistemas eletrônicos e ferramentas computacionais que permitam o teste e a calibração ativa deste tipo de magnetômetro. Os resultados obtidos poderão ser aplicados no desenvolvimento de novos magnetômetros, na verificação do funcionamento de instrumentos já existentes e na comparação entre vários instrumentos.

Palavras-chave: Magnetômetro Fluxgate; Sensor Magnético; Calibração; Sistemas Automatizados; Geofísica; Campo Geomagnético.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

ACTIVE CALIBRATION AND TESTING SYSTEM FOR FLUXGATE MAGNETOMETERS

Gustavo Gomes Cabral

September/2019

Saturated-core magnetometers, or fluxgate magnetometers, require the application of specific calibration and testing techniques in order to obtain their calibration coefficients and confirm their technical characteristics. This work proposes the development of a set of high-level procedures, combined with electronic systems and computational tools that allow the testing and active calibration of this type of magnetometer. The results obtained can be applied to the development of new magnetometers, to verify the functioning of existing instruments and to compare different instruments.

Keywords: Fluxgate Magnetometer; Magnetic Sensor; Calibration; Automated Systems; Geophysics; Geomagnetic Field.

Sumário

Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	10
1 Introdução	1
2 Objetivo	2
3 Metodologia	4
3.1 Determinação dos Parâmetros do Núcleo	9
3.2 Determinação dos Parâmetros do Instrumento	10
3.2.1 Obtenção da Curva de Resposta ao Campo Magnético Externo	10
3.2.2 Ruído	10
3.2.3 Dependência Térmica	10
3.2.4 Limites de Operação	11
3.3 Procedimento de Teste	12
3.3.1 Determinação dos Parâmetros de Calibração	13
4 O Magnetômetro de Núcleo Saturado	15
4.1 Aplicações	16
4.2 Variantes do Princípio de Funcionamento	17
4.3 Material do Núcleo	18
4.4 Geometria do Núcleo	18
4.5 Magnetômetro Triaxial	19
4.6 Digitalização dos Magnetômetros	19
4.7 Magnetômetro de Teste	20
5 Instrumentação Utilizada	24
5.1 Bobina de Helmholtz	24
5.2 Blindagem Magnética	27
5.3 Fonte de Alimentação do Magnetômetro	30
5.4 Fonte Programável de Corrente Contínua	31

5.5	Amperímetro Programável Padrão	32
5.6	Multímetro Programável Padrão	33
5.7	Comutador	33
5.8	Interligação dos Instrumentos ao Computador	35
5.9	Protocolos de comunicação	37
6	Sistema de Calibração Computadorizado	39
6.1	Programa de Calibração	39
6.2	Procedimento de Calibração	41
6.3	Algoritmo Computacional	41
6.3.1	Processo de Controle do Comutador	42
6.3.2	Processo de Medição do Magnetômetro	42
6.3.3	Processo de Medição do Campo Magnético Aplicado	43
6.3.4	Processo Automático de Variação de Parâmetros	43
7	Resultados	48
7.1	Testes de Caracterização para Campo Magnético Mínimo	49
7.2	Testes de Caracterização para Campo Magnético Variável	50
7.3	Determinação dos Parâmetros de Calibração	61
7.4	Testes de Longa Duração	65
7.4.1	Instalação dos Magnetômetros no Observatório Magnético de Vassouras	66
7.4.2	Programas Computacionais para Captura e Armazenamento de Dados	67
7.4.3	Programa Computacional para Interpretação e Tratamento de Dados de Magnetômetros	68
7.4.4	Programa Computacional para Geração dos Gráficos Comparativos dos Magnetômetros	69
8	Conclusão	78
8.1	Perspectivas Futuras	79
	Referências Bibliográficas	81

Lista de Figuras

3.1	Exemplo de sinais de referência aplicados pela bobina de Helmholtz. . .	6
3.2	Exemplo de sinais de medição do magnetômetro em teste para os respectivos sinais de referência gerados pela bobina de Helmholtz. . .	7
3.3	Exemplo de curva de calibração a partir dos sinais de referência e medição.	8
4.1	Diagrama simplificado de magnetômetro que utiliza detecção de segundo harmônico da tensão de saída.	17
4.2	Arranjo do sensor magnético com núcleo toroidal desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional(LDSM-ON).	19
4.3	Representação dos Sensores de um Magnetômetro Triaxial.	20
4.4	Imagem do circuito eletrônico do magnetômetro contruído para os teste deste projeto.	22
4.5	Imagem do sensor triaxial de núcleo saturado utilizado no magnetômetro deste projeto.	23
5.1	Imagem do arranjo triaxial de bobinas de Helmholtz utilizadas neste projeto.	26
5.2	Representação da intensidade do campo magnético no intervalo de um par de bobinas de Helmholtz.	27
5.3	Representação simplificada das linhas de fluxo magnético em um cilindro de material com alta permeabilidade magnética.	31
5.4	Imagem da blindagem magnética utilizada para caracterização em campo magnético aproximadamente nulo.	32
5.5	Diagrama do circuito comutador.	34
5.6	Caixa comutadora desenvolvida para esta aplicação.	35
5.7	Instrumentos utilizados na caracterização magnética.	37
6.1	Imagem da tela principal do programa de calibração com suas funções. 40	
6.2	Imagem da tela auxiliar do programa de calibração com suas funções. 46	

6.3	Imagem da blindagem termo-magnética utilizada para caracterização em campo magnético aproximadamente nulo com determinação da dependência térmica.	47
6.4	Imagem da blindagem térmica utilizada para caracterização em campo magnético variável com determinação da dependência térmica.	47
7.1	Tabela da caracterização de Offset com a variação de temperatura. . .	51
7.2	Eixo X - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.	51
7.3	Eixo Y - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.	52
7.4	Eixo Z - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.	52
7.5	Eixo X - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado.	54
7.6	Eixo Y - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado	55
7.7	Eixo Z - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado.	56
7.8	Eixo X - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.	57
7.9	Eixo Y - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.	57
7.10	Eixo Z - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.	57
7.11	Eixo X - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.	57
7.12	Eixo Y - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.	58
7.13	Eixo Z - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.	58
7.14	Eixo X - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.	58
7.15	Eixo Y - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.	59
7.16	Eixo Z - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.	59
7.17	Eixo X - Variação da temperatura durante medição em campo nulo. .	59
7.18	Eixo Y - Variação da temperatura durante medição em campo nulo. .	60

7.19	Eixo Z - Variação da temperatura durante medição em campo nulo.	60
7.20	Relação de resposta do sensor interno de temperatura.	62
7.21	Temperaturas média, máxima e mínima durante medição em campo nulo - valores em dado bruto não convertidos para °C.	62
7.22	Eixo X - Curva de resposta do magnetômetro.	62
7.23	Eixo Y - Curva de resposta do magnetômetro.	63
7.24	Eixo Z - Curva de resposta do magnetômetro.	63
7.25	Eixo X - Curva de ajuste linear do magnetômetro.	64
7.26	Eixo Y- Curva de ajuste linear do magnetômetro.	64
7.27	Eixo Z - Curva de ajuste linear do magnetômetro.	70
7.28	Magnetômetro CXM539.	70
7.29	Magnetômetro LEMI-417.	71
7.30	Magnetômetro ON LDSM.	71
7.31	Posição relativa dos instrumentos utilizados nas medições de longo período.	72
7.32	Programa utilizado para captura e armazenamento das medições dos magnetômetros via comunicação serial.	73
7.33	Programa para Interpretação e Tratamento de Dados de Magnetômetros.	73
7.34	Programa para Geração dos Gráficos Comparativos dos Magnetômetros.	74
7.35	Exemplo de Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Desenvolvido no LDSM e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.	74
7.36	Exemplo de Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.	75
7.37	Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Desenvolvido no LDSM e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.	75
7.38	Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.	75
7.39	Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Comercial CrossBow CXM539 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.	76
7.40	Gráfico da Variação de Temperatura Medida pelo Magnetômetro Desenvolvido pelo LDSM (Valores Brutos) Durante Teste de Longa Duração.	76
7.41	Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Desenvolvido pelo LDSM, Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Referência INTERMAGNET.	77

Lista de Tabelas

7.1	Dados do sistema de referência INTERMAGNET para o Observatório Magnético de Vassouras.	65
7.2	Requisitos para Magnetômetros Vetoriais do INTERMAGNET.	66

Capítulo 1

Introdução

A história do geomagnetismo reconhece um grande número de instrumentos utilizados para detecção do campo geomagnético, desde as antigas bússolas até os instrumentos de Gauss, Eschenhagen, La Cour e muitos outros, até os atuais. Existem muitas invenções engenhosas nesses instrumentos. Descrições detalhadas e a teoria deles são encontradas em diversos textos sobre o geomagnetismo (JANKOWSKI e SUCKSDORFF, 1996).

Dentre os diversos tipos de magnetômetros utilizados para medição do campo geomagnético, os magnetômetros de núcleo saturado estão entre os mais utilizados em trabalhos de pesquisa e prospecção geofísica.

Aplicações dos magnetômetros de núcleo saturado incluem a utilização em observatórios magnéticos terrestres e espaciais, atividades de exploração geofísica, sistemas de controle de atitude de veículos aéreos, terrestres, marinhos e submarinos, sistemas militares de detecção submarina e detecção de objetos enterrados, entre outros.

Os magnetômetros de núcleo saturado requerem a aplicação de técnicas específicas de calibração e teste visando a obtenção de seus coeficientes de calibração e confirmação de suas características técnicas.

Os coeficientes de calibração podem ser obtidos através de diferente métodos, dentre eles a obtenção experimental através da variação ativa e de forma controlada dos parâmetros físicos que resultam na alteração dos resultados das medições realizadas pelo magnetômetro em teste. Estes coeficientes correlacionam, no caso de magnetômetros triaxiais, a intensidade, direção e sentido do campo magnético ao qual o instrumento está submetido, com seu sinal de resposta.

Capítulo 2

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um conjunto de procedimentos, sistemas eletrônicos e ferramentas computacionais que permitam o teste e a calibração ativa de magnetômetros de núcleo saturado, por meio da imposição da variação dos parâmetros físicos aos quais estão submetidos e a medição dos seus sinais de resposta.

Com o desenvolvimento dos sistemas aqui apresentados, é também um objetivo deste trabalho que eles possam ser aplicados no desenvolvimento e calibração de novos magnetômetros, verificação do funcionamento de instrumentos já existentes, com a verificação da qualidade de suas medições, e na comparação entre instrumentos para validação das medições e seleção de instrumentos pela verificação de suas especificações.

O método de calibração de magnetômetros proposto, e portanto a caracterização dos parâmetros de funcionamento tanto do seu circuito eletrônico interno quanto do sensor propriamente dito, exige um grande número de medições que permitam o ajuste das curvas de resposta do instrumento por métodos estatísticos. Para que o objetivo principal de permitir o teste e a calibração ativa de magnetômetros de núcleo saturado através do método proposto seja alcançado, objetivos relativos a cada etapa do desenvolvimento precisam ser atingidos. Dentre estes diversos objetivos, podem ser destacados:

- Desenvolvimento de um sistema de calibração e teste que permita superar as limitações de assimetria e não homegeidade do campo magnético local, além de possíveis interferências eletromagnéticas;
- Validação da instrumentação já existente no LDSM para a aplicação específica de calibração ativa de magnetômetros de núcleo saturado;

- Seleção e integração de instrumentação eletrônica de precisão com sistema automático de controle e aquisição de dados;
- Criação de programas computacionais originais que permitam o controle automático dos instrumentos eletrônicos, para variação controlada dos parâmetros de teste e aquisição dos sinais de resposta dos magnetômetros em teste;
- Criação de programas computacionais originais e desenvolvimento de infraestrutura de apoio para realização de testes comparativos de longa duração.

Capítulo 3

Metodologia

Como existem diversas limitações que impedem a existência de condições ideais de caracterização, são propostos para este sistema um conjunto de ferramentas e processos sequenciais que visam atenuar as limitações próprias da natureza dos instrumentos a serem testados, do ambiente ao redor e dos meios de teste para permitir a criação de um sistema de calibração de alto padrão que atenda às exigências de qualidade de magnetômetros de precisão.

O método de calibração consiste basicamente em criar um campo magnético em condições controladas para o qual o magnetômetro em teste é submetido. Entretanto, conforme já citado no início deste capítulo, diversos fatores impossibilitam a criação de campo magnético de referência ideal.

Como não há um padrão magnético materializado é necessário gerar um o campo magnético de referência para ser utilizado na calibração.

Neste sistema, o campo magnético de referência utilizado para excitar o instrumento em teste é criado aplicando-se corrente elétrica controlada em pares de bobinas solenoidais em arranjo paralelo, conforme descrito mais detalhadamente no capítulo 4.

O campo magnético gerado possui direção e sentido determinados pelo arranjo das bobinas e polaridade da corrente elétrica aplicada.

Tendo-se criado um campo magnético de referência, poderia-se propor a simples comparação do magnetômetro em teste com outro magnetômetro tomado como padrão e submetido ao mesmo campo magnético. Entretanto, o campo magnético é influenciado por tudo ao qual ele permeia, e em especial pelo próprio núcleo do sensor que possui alta permeabilidade magnética. Desta forma, a simples presença

de outro magnetômetro na vizinhança do instrumento em teste seria suficiente para distorcer o campo magnético criado como referência e inviabilizar a calibração.

É importante destacar que o vetor do campo magnético gerado sempre será somado ao vetor do campo magnético local, portanto toda medição será na verdade a medição da resultante destes campos e não somente do campo magnético gerado.

Para atenuar a influência da variação do campo magnético no tempo e no espaço e a interação do campo magnético com o meio e conseqüentemente com os instrumentos de medição, são utilizados dois métodos:

Primeiro um magnetômetro de alta precisão e com certificação de calibração é tomado como padrão e submetido a uma seqüência de campos magnéticos de diferentes amplitudes gerados pela bobina de Helmholtz. Desta forma se obtêm os parâmetros de caracterização da bobina de Helmholtz. Ou seja, um instrumento padrão é utilizado para calibrar a bobina de Helmholtz nas condições locais, considerando o ambiente ao redor e que também pode influenciar para a distorção do campo magnético local somado ao campo gerado, e temperatura ao qual ela está submetida.

Em seguida, o magnetômetro padrão é substituído pelo magnetômetro a ser testado, sendo colocado exatamente na mesma posição e alinhamento do magnetômetro de referência. O magnetômetro a ser testado é então excitado com uma seqüência de campos magnéticos de diferentes amplitudes gerados pela bobina já caracterizada, permitindo assim o levantamento da curva de calibração do magnetômetro.

Para cada valor de intensidade magnética utilizado como referência, são aplicados vários ciclos rápidos de reversão magnética. Os ciclos de reversão são aplicados para que a subtração dos valores máximos e mínimos de medição, dados respectivamente pelas medições diretas e reversas para cada intervalo de tempo, resulte na subtração da intensidade média do campo geomagnético local que atua como uma sobreposição. Cada ciclo de reversão é realizado com rapidez suficiente para superar a magnitude das variações naturais do campo geomagnético.

Com várias medições disponíveis para cada sinal de referência, um algoritmo de filtragem estatística usando um método robusto de média pode ser aplicado para minimizar os efeitos do ruído nos sinais de medição do campo magnético. Tais ruídos provêm de fontes inevitáveis e distintas de interferência magnética, elétrica e térmica.

Os gráficos das figuras (3.1) e (3.2) apresentam respectivamente exemplos de sequência de sinais de referência aplicados pela bobina de Helmholtz e os respectivos sinais de medição do magnetômetro em teste para cada amplitude de campo magnético no sentido direto e reverso.

Na figura (3.1) a curva verde representa a amplitude do campo geomagnético local, a curva vermelha representa o campo magnético aplicado no sentido direto (somado ao campo local), a curva azul representa o campo magnético aplicado no sentido reverso (somado ao campo local) e a curva preta representa o campo magnético efetivamente aplicado, sem considerar a influência do campo geomagnético local.

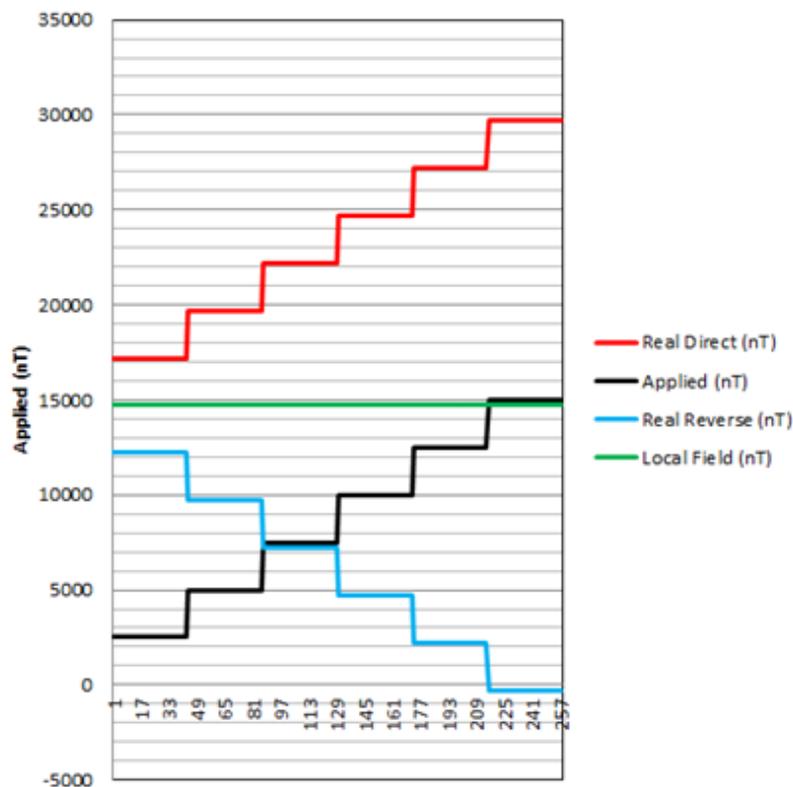


Figura 3.1: Exemplo de sinais de referência aplicados pela bobina de Helmholtz.

Na figura (3.2) a curva vermelha representa o campo magnético medido para os sinais aplicados no sentido direto (dado bruto), a curva azul representa o campo magnético medido para os sinais aplicados no sentido reverso (dado bruto) e a curva preta representa a curva resultante da subtração das curvas direta e reversa. Esta subtração resulta na curva do campo magnético efetivamente aplicado, extraindo assim a influência do campo geomagnético local.

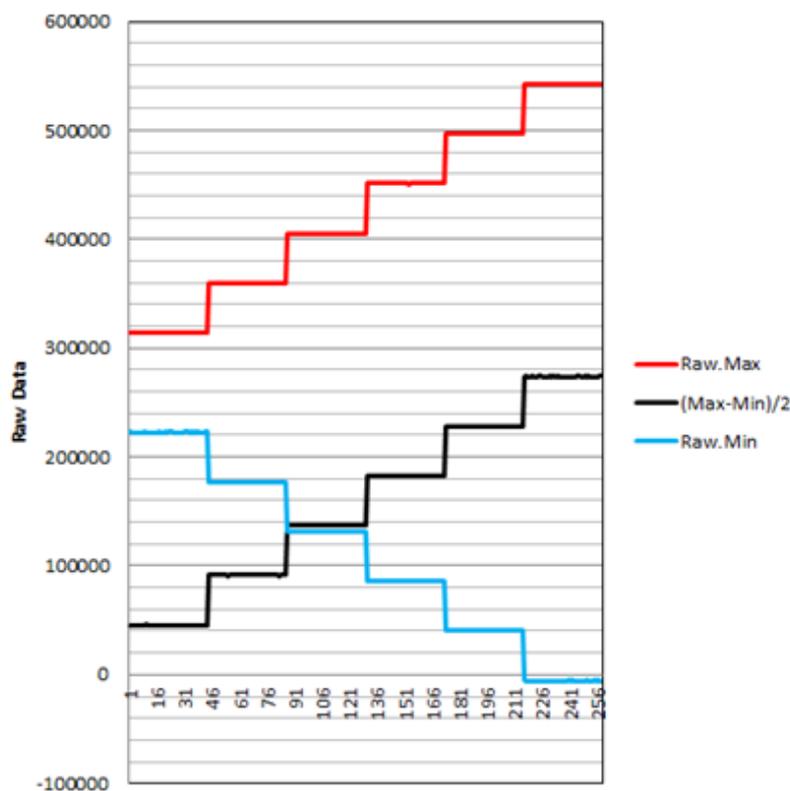


Figura 3.2: Exemplo de sinais de medição do magnetômetro em teste para os respectivos sinais de referência gerados pela bobina de Helmholtz.

Os dados apresentados pelas curvas de sinal de campo magnético aplicado e sinal de medição do magnetômetro em teste vão compor a curva de correlação entre estes, que permitirá a extração dos coeficientes de calibração, conforme exemplo apresentado na figura (3.3).

Os principais parâmetros a serem obtidos para calibração de um magnetômetro são seu ganho, *offset* (saída do magnetômetro para campo nulo em cada componente) e ângulos entre os sensores individuais em sistemas multi-eixo.

Para a avaliação da curva de resposta do magnetômetro sob teste em função do campo magnético externo aplicado, são utilizadas bobinas de Helmholtz para a geração do campo magnético de referência. A partir da resposta do magnetômetro para cada valor de campo aplicado se pode estimar os parâmetros que determinam a curva característica de calibração.

A metodologia utilizada neste trabalho é baseada no desenvolvimento e utilização de ferramentas experimentais de teste e calibração, processamento dos sinais obti-

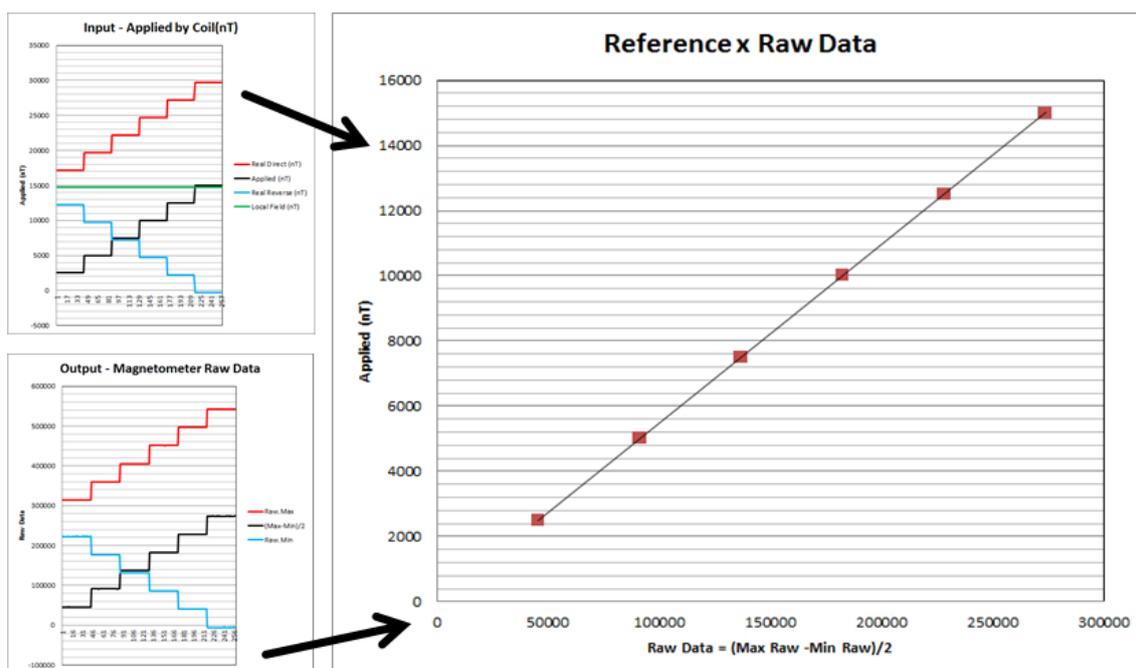


Figura 3.3: Exemplo de curva de calibração a partir dos sinais de referência e medição.

dos com o magnetômetro de teste, determinação dos coeficientes de calibração e validação dos valores obtidos através de comparação estatística com magnetômetros de referência em análise de longo período.

Este método visa superar as principais dificuldades encontradas na calibração de magnetômetros de núcleo saturado como:

1. A variação do campo magnético no tempo e no espaço;
2. A impossibilidade de simples comparação com instrumento de referência como resultado da característica descrita acima;
3. A inexistência de padrão magnético materializado;
4. A dificuldade de se produzir campo magnético nulo;
5. A interação do campo magnético com o meio e conseqüentemente com os instrumentos de medição.

Os parâmetros a serem verificados em um magnetômetro de núcleo saturado podem ser divididos em parâmetros de caracterização do núcleo sensor e parâmetros de caracterização do instrumento. Este trabalho visa em especial a determinação dos parâmetros do instrumento, já que a caracterização do núcleo sensor é realizada

como parte das atividades de projeto e fabricação do magnetômetro e já estarão determinadas no momento da calibração. Além disto, a caracterização do instrumento como um todo abrange também as particularidades do núcleo sensor utilizado.

Os sistemas aqui propostos poderão ser aplicados no desenvolvimento e calibração de novos magnetômetros, verificação do funcionamento de instrumentos já existentes com a verificação da qualidade de suas medições, e na comparação entre instrumentos para validação das medições e seleção de instrumentos pela verificação de suas especificações.

3.1 Determinação dos Parâmetros do Núcleo

Dentre os principais parâmetros do núcleo sensor a serem determinados durante o desenvolvimento e fabricação de um magnetômetro de núcleo saturado, podemos destacar:

1. Frequência e fase de operação;
2. Curva de histerese;
3. Coercividade;
4. Linearidade;
5. Sensibilidade do núcleo sensor.

Ainda que estes parâmetros sejam parte de uma etapa anterior à calibração, o sistema desenvolvido neste trabalho permite a interligação de um gerador de funções para varredura automática da frequência de excitação do núcleo sensor. Esta medição permite gerar curvas de resposta em frequência para o magnetômetro em teste, com as quais pode-se avaliar os resultados para a frequência de operação determinada durante o desenvolvimento do magnetômetro.

A frequência ótima de excitação, que resulta em sinais de maior amplitude, pode ser determinada através da substituição temporária do circuito interno do oscilador do magnetômetro por oscilador externo programável que permite o levantamento da curva de resposta do magnetômetro para diferentes frequências de excitação.

3.2 Determinação dos Parâmetros do Instrumento

3.2.1 Obtenção da Curva de Resposta ao Campo Magnético Externo

Os principais parâmetros desconhecidos para calibração de um magnetômetro são seu ganho, *offset* (saída do magnetômetro para campo nulo em cada componente) e ângulos entre os sensores individuais em sistemas multi-eixo. Para a avaliação da curva de resposta do magnetômetro de teste em função do campo magnético externo aplicado, são utilizadas bobinas de Helmholtz para a geração do campo magnético de referência. A partir da resposta do magnetômetro para cada valor de campo aplicado se pode estimar os parâmetros que determinam a curva característica de calibração.

3.2.2 Ruído

O ruído presente em um magnetômetro pode ser definido como qualquer variação na medição, não causada pela variação do campo magnético externo de interesse. Os ruídos podem ser provenientes tanto do sensor fluxgate como dos circuitos eletrônicos associados a ele, sendo que cada sensor terá seu ruído próprio característico.

O ruído pode ser determinado pelas medições no intervalo de tempo apropriado para a faixa de frequência de interesse. Aqui são propostos três métodos:

1. Medição dentro de blindagem magnética e verificação da estabilização do sinal médio para o intervalo de medição pretendido;
2. Registro da série temporal e processamento para cálculo da distribuição da potência espectral;
3. Comparação das leituras de dois magnetômetros instalados próximos e em uma área de campo magnético relativamente calmo e gradiente constante.

3.2.3 Dependência Térmica

Um dos principais problemas dos magnetômetros de núcleo saturado é a dependência do sinal de saída com a temperatura. As deformações e alterações das propriedades dos materiais de um sensor "*fluxgate*" e dos circuitos eletrônicos associados causadas pela variação de temperatura podem alterar os seus coeficientes de ganho e *offset* (saída do magnetômetro para campo nulo em cada componente). Portanto, todas essas mudanças características precisam ser precisamente determinadas. A deriva de

offset ou, em outras palavras, a deriva da linha de base é especialmente importante para os observatórios magnéticos. (KLIMOVICH *et al.*, 2007) (CSONTOS *et al.*, 2007)

Com o uso de componentes eletrônicos modernos e empregando técnicas de *feedback* dinâmico, é possível minimizar a influência das mudanças de temperatura nos circuitos eletrônicos. No entanto, os sensores *fluxgate* ainda são muito influenciados pela variação de temperatura. Foi estabelecido que os efeitos da temperatura são proporcionais ao campo que está sendo medido (PRIMDAHL, 1970).

Para se caracterizar a influência da variação de temperatura na medição do campo magnético, a proposta é o desenvolvimento de um sistema que permita os seguintes testes:

1. Variação de temperatura do circuito eletrônico instalado dentro de uma câmara térmica para avaliação da influência da temperatura;
2. Variação de temperatura do sensor instalado dentro de uma câmara térmica com blindagem magnética para determinação da variação de *offset* com a temperatura;
3. Variação de temperatura do sensor instalado dentro de uma câmara térmica instalada no centro de uma bobina de Helmholtz para avaliação do ganho com variação de temperatura e campo magnético aplicado;
4. Comparação das leituras de longo período de dois magnetômetros instalados próximos e em uma área de campo magnético relativamente calmo e gradiente constante, mas livres para sofrerem a influência de variações de temperatura.

3.2.4 Limites de Operação

Outros parâmetros que podem ser avaliados nos magnetômetros em teste e que determinam seus limites de operação incluem:

- Taxa de amostragem - É definido como o número de leituras por segundo geradas pelo magnetômetro.
- Largura de banda - É a medida de quão rápido o magnetômetro responde às mudanças do campo magnético;
- Faixa de operação - Refere-se aos limites superior e inferior dos valores que podem ser gravados com o instrumento em questão;

- Faixa dinâmica de operação - É a relação entre a amplitude máxima registrável e a resolução. Normalmente expressa em decibéis (dB);
- Resolução - Descreve quais são as menores mudanças registráveis. A resolução é limitada pelo nível de ruído interno do instrumento com relação à amplitude do sinal de medição;
- Erro sistemático de uma série de medidas - É o desvio do valor médio das medições em relação ao valor real;
- Exatidão - Descreve a exatidão absoluta verdadeira. A exatidão de 0,1 nT diz que a diferença entre o valor verdadeiro e o medido não é superior a 0,1 nT. A exatidão absoluta é determinada pela soma do erro quadrático médio com o erro sistemático;
- Sensibilidade - Pode ser definido como a menor variação absoluta que pode ser detectada por uma medição, sendo dada pela razão de variação da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo;
- Erro de ortogonalidade - É determinado pelo erro de ortogonalidade angular entre os sensores que compõe um magnetômetro triaxial, ou seja o erro de alinhamento de cada um destes sensores com seu eixo correspondente X, Y ou Z;
- Erro de linearidade - O erro de linearidade é o desvio da curva de saída do sensor de uma linha reta especificada através do ajuste linear;
- Deriva ou estabilidade de longo período - É o desvio do valor médio das medições em relação ao valor real considerando medições de longo período;
- Dimensões, peso e consumo de energia.

3.3 Procedimento de Teste

Para viabilizar a caracterização do instrumento descrita na seção anterior são necessários um conjunto de passos/etapas/medições que de forma estrutural/sequencial criam meios de referência para calibração e contribuem para minimizar as limitações e dificuldades descritas na introdução deste capítulo.

3.3.1 Determinação dos Parâmetros de Calibração

A calibração do magnetômetro em teste resulta na determinação de parâmetros que descrevem unicamente a relação entre os sinais de resposta, obtidos pelos seus sensores através dos circuitos eletrônicos associados, e o valor do campo magnético de referência ao qual este magnetômetro é submetido.

Tais parâmetros de calibração podem também ser descritos como os parâmetros do modelo matemático que descreve o comportamento do magnetômetro em função dos seus sinais de entrada. Portanto tais parâmetros permitem a conversão do valor bruto do sinal de saída do magnetômetro em valor estimado do campo magnético de medição.

Os principais parâmetros a serem determinados na calibração de um magnetômetro são seu ganho, *offset* (saída do magnetômetro para campo nulo em cada componente) e ângulos entre os sensores individuais em sistemas multi-eixo.

Para a avaliação da curva de resposta do magnetômetro de teste em função do campo magnético externo aplicado, são utilizadas bobinas de Helmholtz para a geração do campo magnético de referência. A partir da resposta do magnetômetro para cada valor de campo aplicado se pode estimar os parâmetros que determinam a curva característica de calibração.

Partindo da premissa que o sinal bruto de saída do magnetômetro varia linearmente com variação do campo magnético ao qual está submetido, a curva característica de calibração pode ser estimada a partir de um modelo matemático linear do comportamento do magnetômetro.

Este modelo pode ser determinado através da regressão linear dos sinais de saída do magnetômetro com relação ao campo magnético de referência utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Este é um método de modelagem amplamente reconhecido e largamente utilizado na análise de regressão linear para aproximação de soluções de medição, em especial sistemas sobredeterminados (sistemas que possuem mais equações que incógnitas, em especial em função de múltiplas medições) que possuam uma distribuição estatística normal do ruído, ou seja, uma variação dos valores de ruído que reproduz a curva de distribuição de Gauss.

O método dos mínimos quadrados é aplicado ajustando-se o conjunto de dados de entrada para valores tais que o erro médio quadrático em relação aos valores de

referência seja minimizado.

Para que a premissa de uma distribuição normal dos dados de medição seja realmente favorável para o ajuste através do método dos mínimos quadrados é importante que valores expúrios de medição, ou seja, valores atípicos ou estatisticamente muito distantes da média, sejam descartados, e que o maior número possível de medições para um mesmo valor de referência seja obtido.

O método de regressão linear simples ajusta o conjunto de dados de acordo com a seguinte equação:

$$y = Ax + B + e \quad (3.1)$$

onde a combinação linear de y e x é dada pelos coeficientes das matrizes A e B , sendo a soma dos erros impostos ao sistema, tais como ruído, representada pelo coeficiente e .

O modelo apresentado acima é caracterizado como um método de regressão linear simples por considerar uma única variável independente, neste caso o sinal bruto de saída do magnetômetro em teste, para criar o modelo que determina a variável resposta $y(x)$, ou campo magnético estimado.

Entretanto, é de se esperar que o sinal bruto de saída do magnetômetro em teste seja razoavelmente influenciado por outros fatores, em especial pelas variações de temperatura, já que as medições realizadas pelo magnetômetro são diretamente relacionadas com a estabilidade dimensional dos elementos que compõe o sensor, tais como as bobinas de excitação e sensora, construídas com longos enrolamentos de cobre que sofrem dilatação/contração com as variações de temperatura. Outras partes que também podem ser influenciadas pela variação de temperatura são o material do núcleo e os componentes eletrônicos dos circuitos de amplificação e aquisição de dados dos magnetômetros. Portanto é importante avaliar a dependência do sinal de saída do magnetômetro com a variação da temperatura.

Para que a variação de temperatura seja também levada em conta na modelagem de resposta do magnetômetro, o método de regressão linear simples não é suficiente, sendo utilizada então a modelagem de regressão linear múltipla, onde a única variável de resposta é definida como linearmente dependente de duas ou mais variáveis independentes.

Capítulo 4

O Magnetômetro de Núcleo Saturado

O princípio de funcionamento dos magnetômetros de núcleo saturado, conhecido como princípio *fluxgate*, foi utilizado pela primeira em moduladores magnéticos (RIPKA, 2003). O nome *fluxgate* vem do "chaveamento" ou "*gating*" do fluxo, que ocorre na transição de núcleo saturado para não saturado (PRIMDAHL, 1979).

Os magnetômetros de núcleo saturado tradicionais medem campos magnéticos contínuos ou alternados de baixa frequência. São dispositivos intrinsecamente vetoriais, ou seja, sensíveis à direção de campo e podem ser projetados para medições de até 1mT, podendo alcançar resolução de até 10 pT. Portanto, se a resolução na faixa de nT for necessária, os magnetômetros de núcleo saturado são hoje a melhor opção para instrumentos de baixo custo (VOPÁLENSKÝ *et al.* (2003)). Embora os primeiros magnetômetros de núcleo saturado tenham aparecido no início da década de 1930, esses sensores ainda são amplamente utilizados em diversas aplicações e o efeito *fluxgate*, mesmo sendo conhecido por décadas, ainda atrai o interesse de muitos trabalhos teóricos (RIPKA, 2003).

O sensor de núcleo saturado é constituído de um núcleo de material ferromagnético de alta permeabilidade, envolto por dois conjuntos de bobinas, um conjunto para excitação do núcleo e outro para a detecção do campo magnético externo ao qual foi submetido. A corrente elétrica que percorre a bobina de excitação produz um campo que periodicamente satura (em ambas as direções) o material magnético do núcleo do sensor. Na saturação, a permeabilidade magnética do núcleo cai e a densidade de fluxo magnético, no interior do núcleo, associada ao campo magnético medido diminui. Esta mudança da magnetização do núcleo induz uma grande tensão elétrica na bobina de captação. Como o conjunto de bobinas de excitação é construído com enrolamentos duplos opostos, as magnetizações correspondentes a estes enrolamentos

se cancelam e a única mudança de fluxo é a causada pelo campo externo constante e a mudança da permeabilidade diferencial (PRIMDAHL, 1979). Esta relação faz com que os harmônicos de segunda ordem (e seus múltiplos) da frequência de excitação, que aparecem no sinal de tensão elétrica na bobina de captação, contenham a informação da intensidade da componente do vetor de campo magnético externo alinhada com o sensor.

Esta tensão elétrica, proporcional ao campo medido, geralmente é a saída do sensor, mas alguns magnetômetros *fluxgate* também funcionam no modo curto-circuito (saída em corrente).

4.1 Aplicações

Além das já citadas aplicações dos magnetômetros de núcleo saturado, como a utilização em observatórios magnéticos terrestres e espaciais (ACUÑA, 2002) (MATSUOKA *et al.*, 2013), atividades de exploração geofísica, bússolas para sistemas aéreos, terrestres, marinhos e submarinos e detecção, o princípio "*fluxgate*" é empregado também em sensores de corrente elétrica, leitura de marcações e etiquetas magnéticas (RIPKA, 2003) e instrumentos biomagnéticos (RIPKA e NAVRATIL, 1997).

Uma aplicação de grande interesse para observatórios geomagnéticos é a utilização de magnetômetros com o objetivo de registro contínuo, e a longo prazo, das variações temporais do vetor geomagnético. Do ponto de vista local, um observatório magnético monitora as variações magnéticas cujo conhecimento é necessário, para por exemplo entender falhas de fornecimento de energia elétrica ou dificuldades em telecomunicações, além de ser referência para a a calibração de outros instrumentos magnéticos.

Muitas vezes, o observatório é o único lugar para obter informações sobre a declinação geomagnética local e sua mudança, e no caso de fenômenos especiais, a confirmação do caráter natural do fenômeno pode ser obtida no observatório. A gravação local de variações magnéticas é muitas vezes necessária pelas empresas de prospecção para a redução de seus dados (JANKOWSKI e SUCKSDORFF, 1996).

4.2 Variantes do Princípio de Funcionamento

Existem diferentes tipos de magnetômetros de núcleo saturado que diferem pelo princípio de funcionamento aplicado, nomeadamente na grandeza medida para a determinação do campo magnético (PEDERSEN *et al.*):

1. envelope do pico da corrente primária (VACQUIER *et al.*, 1947) (ENGELTER, 1986);
2. segundo harmônico da corrente primária (GERMAIN, 1963);
3. segundo harmônico da tensão secundária (FORSTER, 1955) (PRIMDAHL, 1979);
4. assimetria temporal da tensão secundária (KELLY, 1951) (SON, 1989)

O princípio mais utilizado dos magnetômetros de núcleo saturado é o de detecção de segundo harmônico da tensão de saída, conforme explicado no início deste capítulo. Os outros princípios também são utilizados, mas até agora não provaram trazer vantagens substanciais, exceto a simplificação dos circuitos. RIPKA (2003). Este é o tipo utilizado pelo LDSM-ON (Figura 4.1).

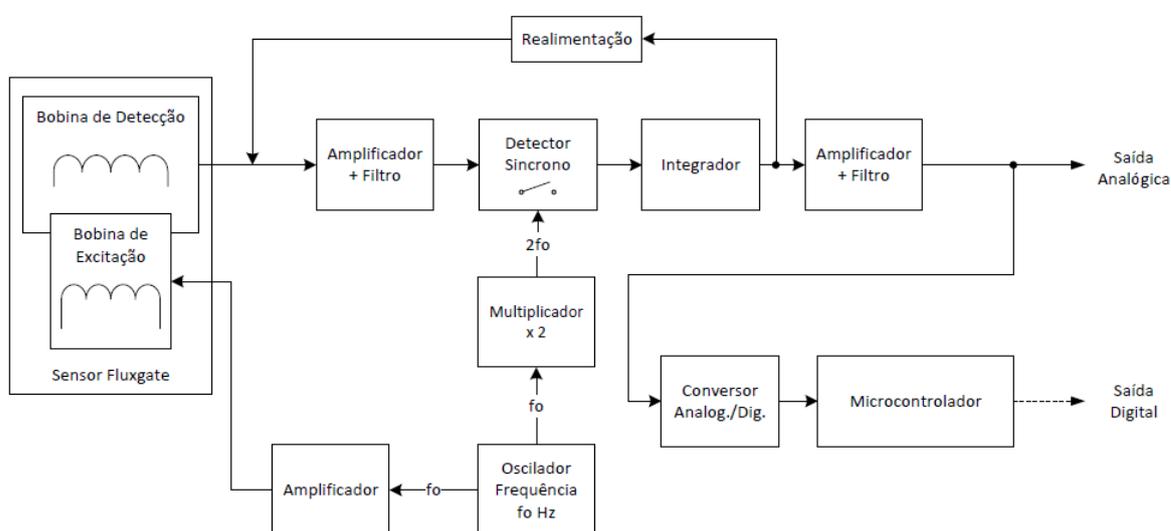


Figura 4.1: Diagrama simplificado de magnetômetro que utiliza detecção de segundo harmônico da tensão de saída.

Os magnetômetros modernos utilizam sensores fluxgate triaxiais. Para os magnetômetros triaxiais, geralmente é utilizada uma montagem ortogonal de três sensores de eixo único (RIPKA, 2003) e compensados individualmente. Embora esses

sistemas tenham muitos problemas decorrentes do efeito de campo cruzado, eles são muito populares por sua simplicidade e baixo preço. Os sensores individuais devem ser montados simetricamente e a uma distância suficiente para evitar interferência entre eles. Se possível, seus enrolamentos de excitação são conectados em série e são excitados pelo mesmo gerador. Um exemplo de magnetômetro avançado deste tipo é o dispositivo desenvolvido para o satélite sueco Astrid-2 (BRAUER *et al.*, 2000).

4.3 Material do Núcleo

Alta permeabilidade e baixa coercividade, mas com curva de magnetização não retangular é preferida para o material do núcleo. O material deve ter um baixo número de imperfeições estruturais, baixo estresse interno, seção transversal uniforme, superfície lisa e alta homogeneidade dos parâmetros.

Baixa magnetização de saturação (para baixa potência) e alta resistividade elétrica (para baixas perdas de Foucault) são vantajosas. O mínimo de ruído é alcançado para as ligas que possuem alta magnetoestricção. Materiais adequados para núcleos de fluxgate são permalloys (com 78-81% de níquel) e ligas amorfas. Núcleos de ferrite, muito comuns em transformadores, são usados em casos excepcionais, pois proporcionam baixa sensibilidade ao sensor (RIPKA, 2003).

4.4 Geometria do Núcleo

Os magnetômetros de núcleo saturado podem ser classificados segundo a geometria de seus núcleos. Os principais tipos são:

1. Núcleo Toroidal
2. Núcleo Solenoidal
3. Núcleo "*Race-track*"

Os magnetômetros desenvolvidos pelo Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (LDSM-ON) utilizam núcleo com geometria toroidal. A geometria toroidal é vantajosa no desenvolvimento de sensores de baixo ruído, ainda que os sensores de núcleo toroidal possuam baixa sensibilidade, devido à grande desmagnetização. Os sensores utilizando esta geometria também permitem o balanceamento fino da simetria do núcleo girando o núcleo em relação

à bobina sensora (RIPKA, 2003).

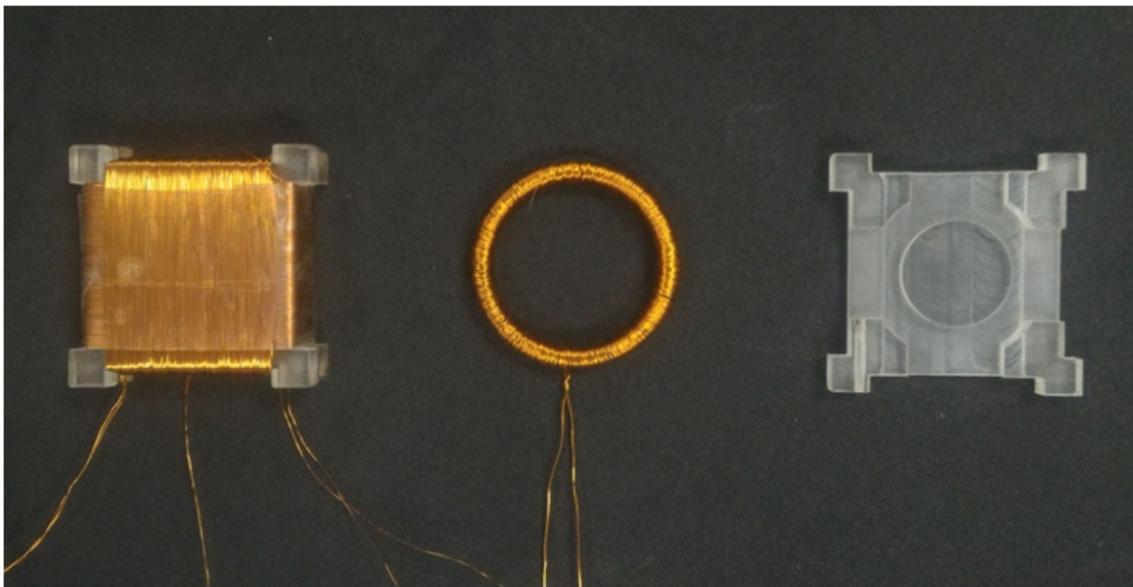


Figura 4.2: Arranjo do sensor magnético com núcleo toroidal desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional LDSM-ON).

4.5 Magnetômetro Triaxial

Para que o magnetômetro de núcleo saturado seja um magnetômetro vetorial triaxial são utilizados comumente um conjunto de três sensores em um arranjo ortogonal, sendo cada sensor alinhado com cada um dos três eixos X, Y e Z respectivamente. A figura 4.3 apresenta um modelo esquemático simplificado do arranjo dos três sensores, similar ao magnetômetro triaxial desenvolvido pelo Observatório Nacional.

Arranjos similares podem ser construídos para a criação de magnetômetros triaxiais a partir de sensores uniaxiais, tais como sensores toroidais montados nas faces de um cubo, ou mesmo arranjos esféricos com bobinas de excitação transpassantes, entre outros.

4.6 Digitalização dos Magnetômetros

Os magnetômetros de núcleo saturado com digitalização podem ser divididos em três tipos básicos em função do tipo utilizado (CERMAN *et al.*, 2005):

1. magnetômetros analógicos com digitalização posterior utilizando conversores A/D de alta resolução;

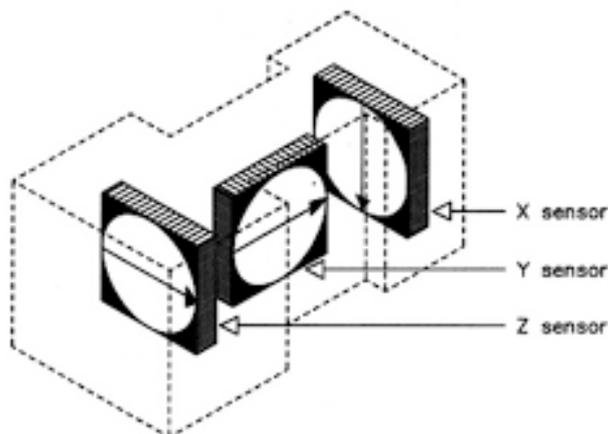


Figura 4.3: Representação dos Sensores de um Magnetômetro Triaxial.

2. aplicação de modulação delta-sigma ao loop de realimentação do sensor;
3. detecção de sinal e sinal de saída do sensor totalmente digitais .

O primeiro método, a digitalização dos magnetômetros de núcleo saturado utilizando conversores A/D de alta resolução, é atualmente dominante e é empregada no magnetômetro que será utilizado neste projeto.

A descrição de detecção e realimentação digital para magnetômetros de núcleo saturado pode ser encontrada em (PIIL-HENRIKSEN *et al.*, 1996) e a descrição da digitalização da saída analógica pode ser encontrada em (PRIMDAHL *et al.*, 1999).

4.7 Magnetômetro de Teste

Desde 1998, o Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (LDSM-ON) desenvolve e constrói sensores fluxgate de alta resolução utilizando fitas magnéticas amorfas e nanocristalinas (BENYOSEF *et al.*, 2013). Estes magnetômetros já foram utilizados em diversos projetos no Brasil e exterior, incluindo sensores para aplicações científicas, comerciais e militares. (BENYOSEF, 2008) (BENYOSEF *et al.*, 2013) (MACHARET *et al.*, 2016)(NACIONAL, 2017).

O magnetômetro de teste utilizado neste trabalho foi construído no Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (LDSM-ON) especialmente para esta aplicação e com o propósito específico de se utilizar um magnetômetro original como instrumento a ser calibrado.

O magnetômetro de teste é um magnetômetro de núcleo saturado triaxial construído a partir do projeto eletrônico desenvolvido pelo Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (LDSM-ON) para o trabalho descrito por (MACHARET *et al.*, 2016). O projeto original sofreu algumas poucas variações com o intuito de melhorar a estabilidade dos circuitos em função da variação da temperatura e com arranjo e formato mais adequados à aplicação para medição em observatórios magnéticos. A 4.4 apresenta imagem do circuito construído.

O circuito eletrônico criado para o trabalho descrito por (MACHARET *et al.*, 2016) é baseado na topologia tradicional de demodulação síncrona de segundo harmônico com realimentação de corrente, com o sensor operando em condição de campo nulo. Este arranjo permite uma grande faixa dinâmica e grande estabilidade, reduzindo a sensibilidade do circuito às variações dos parâmetros centrais.

O magnetômetro utiliza três sensores, também desenvolvidos e construídos pelo LDSM-ON, que possuem formato toroidal em arranjo ortogonal triaxial e com núcleos compostos de fitas amorfas de uma liga de CoFeSiB. As ligas amorfas à base de cobalto possuem menor ruído intrínseco e menor condutividade, resultando em correntes parasitas menores, adequadas ao uso em altas frequências. A 4.5 apresenta imagem dos sensores utilizados.

Para aumento da sensibilidade e redução do nível de ruído, estas fitas amorfas foram fabricadas pelo processo de fundição com rápido resfriamento através da técnica de *melt spinning*. Após a fabricação as fitas foram submetidas a uma técnica de melhoria: através do recozimento para alívio das tensões mecânicas é induzido o aparecimento de anisotropia magnética transversa resultando na rotação dos domínios espontâneos de magnetização.

O sensor e o seu circuito eletrônico foram montados em encapsulamentos especialmente desenvolvidos para esta aplicação. Os encapsulamentos foram projetados para permitir a separação dos sensores do circuito eletrônico, tal que a influência e possível interferência eletromagnética de um sobre o outro seja atenuada pela distância e blindagem elétrica individual de cada encapsulamento. Esta blindagem elétrica é realizada com o uso de uma fina película de cobre ao redor das faces internas do encapsulamento, desde que o material utilizado não seja ferromagnético

Além da separação física do sensor e o seu circuito eletrônico, o projeto do formato do encapsulamento do sensor tem a função de prover meios para permitir o

correto alinhamento de cada eixo do magnetômetro com os eixos de referência de medição, tal que a calibração apresente adequada repetibilidade.

Estes encapsulamentos plásticos foram projetados e fabricados através do uso de ferramentas computacionais para fabricação automatizada. A fabricação empregada utiliza método aditivo de construção por meio de impressora 3D. Tal método além de permitir a fabricação local e perfeitamente otimizada para a aplicação, pode ser utilizada no futuro para replicar quantos encapsulamentos similares sejam necessários.

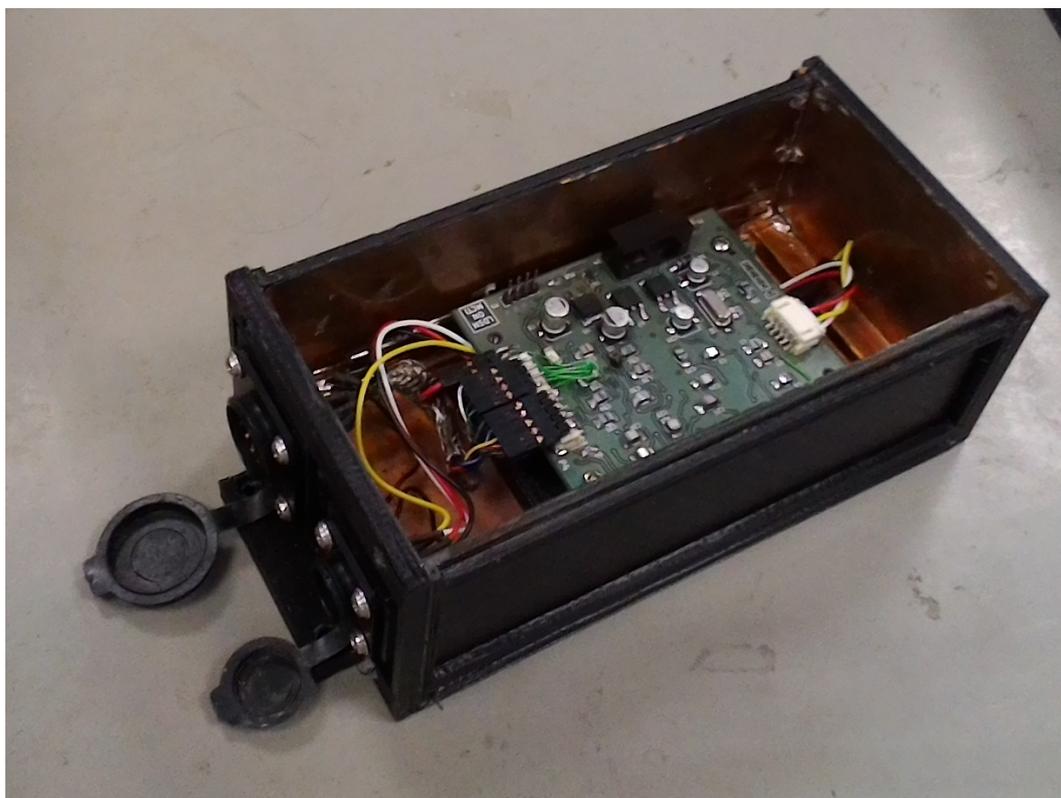


Figura 4.4: Imagem do circuito eletrônico do magnetômetro contruído para os testes deste projeto.

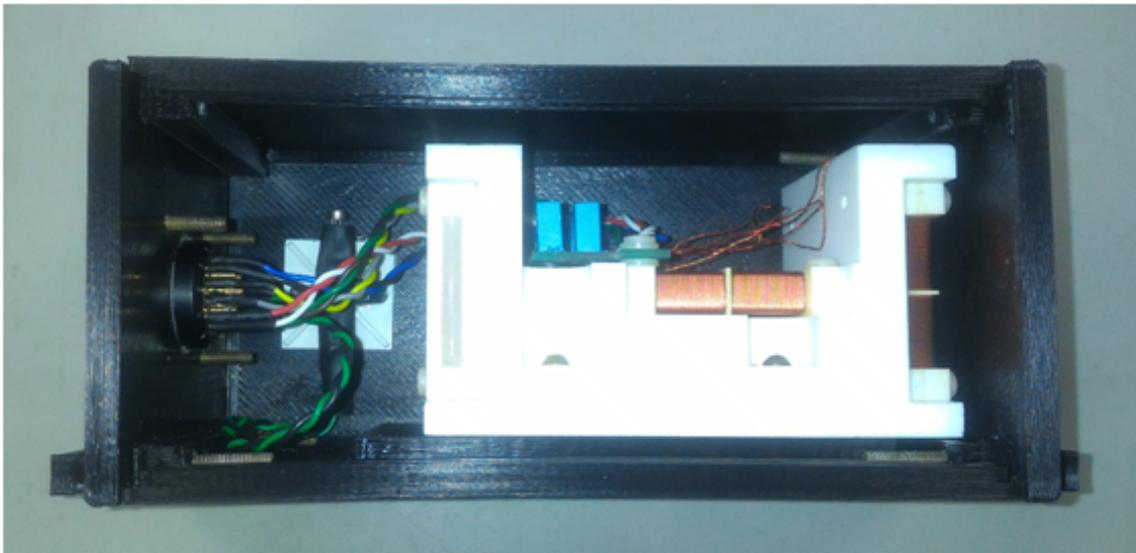


Figura 4.5: Imagem do sensor triaxial de núcleo saturado utilizado no magnetômetro deste projeto.

Capítulo 5

Instrumentação Utilizada

Este capítulo descreve as ferramentas, instrumentos de precisão e acessórios desenvolvidos para os sistemas de caracterização apresentados no capítulo 6.

5.1 Bobina de Helmholtz

A bobina de Helmholtz é uma das principais ferramentas para a calibração dos magnetômetros. Estas bobinas são contruídas em pares de bobinas solenoidais idênticas montadas simetricamente em um mesmo eixo e separadas por uma distância tal que produzam um campo magnético aproximadamente uniforme no ponto central equidistante. Estas bobinas pares são alimentadas por uma mesma corrente elétrica em intensidade e direção. Recebem este nome em homenagem ao físico Hermann von Helmholtz.

O campo magnético que é criado por uma bobina de uma determinada geometria depende da posição relativa à bobina. Se assumirmos que este sistema de bobina é suficientemente grande, haverá um volume central no qual o campo é homogêneo dentro de algum critério. Em geral, esse volume é pequeno em comparação com o tamanho da bobina. Em teoria, um solenóide de comprimento infinito produzirá um campo magnético homogêneo dentro de seus limites (MERAYO *et al.*, 2001) JANKOWSKI e SUCKSDORFF (1996).

O eixo da bobina é a direção do vetor de campo magnético que é produzido no centro geométrico de tal bobina quando uma corrente elétrica é aplicada aos enrolamentos desta. Se a geometria da bobina possuir simetria rotacional, o eixo da bobina será coincidente com o eixo de simetria. Portanto, quando uma corrente elétrica de intensidade I é aplicada à bobina, o campo magnético produzido é proporcional à corrente elétrica ao longo deste eixo.

O sistema de bobinas Helmholtz quadradas é, em princípio, semelhante ao circular, sendo que a distância utilizada entre elas é $0,5445 \cdot L$, onde L é o comprimento do lado do quadrado.

O campo magnético no centro do sistema de bobinas Helmholtz normal (ao longo do eixo das bobinas) é dado pela Equação 5.1 abaixo (JANKOWSKI e SUCKSDORFF, 1996):

$$B = 8\mu_o \cdot \frac{I_n}{5} \cdot \sqrt{5} \cdot r = 899,18 \cdot \frac{I_n}{r} \quad (5.1)$$

onde B é o campo magnético em nT/A , I é a corrente elétrica em Amperes, n é o número de espiras de um enrolamento e r é o raio em metros.

O campo magnético para bobinas quadradas próximo ao ponto central é dado por (JANKOWSKI e SUCKSDORFF, 1996):

$$B = 4\mu_o \frac{IL^2}{\pi} (L^2 + 4a^2) \left(\frac{L^2}{2} + a^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

No ponto central o valor resultante é (JANKOWSKI e SUCKSDORFF, 1996):

$$B = 1628,7I_n/L \quad (5.3)$$

onde B é o campo elétrico em nT/A , I é a corrente elétrica em Amperes, n é o número de espiras de um enrolamento quadrado, L é o lado do quadrado e a é a distância ($0,5445L/2$) no ponto central. A homogeneidade corresponde à homogeneidade de uma bobina Helmholtz circular.

Para permitir a geração de campos magnéticos em todas as direções, é utilizado um conjunto de três pares de bobinas ortogonais com um centro comum e cuja combinação determina a direção e a intensidade do campo magnético. As bobinas utilizadas neste projeto possuem seção quadrada como pode ser visto na Figura 5.1.

Para este trabalho os ângulos entre os sensores são considerados suficientemente ortogonais e não são avaliados.

Uma limitação importante de ser mencionada para a utilização das dependências do Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional é a ausência de uma sala blindada para a utilização da bobina de Helmholtz para os teste de caracterização dos sensores. Desta forma todos os testes realizados com a bobina estarão também sob a influência das variações do campo geomagnético



Figura 5.1: Imagem do arranjo triaxial de bobinas de Helmholtz utilizadas neste projeto.

local durante as medições. Entretanto, também é um objetivo não explícito deste trabalho o desenvolvimento de métodos que reduzam os efeitos destas variações na qualidade dos testes de calibração.

Segundo (KOIKE *et al.*, 1990), o sinal de referência, no caso deste trabalho gerado pela bobina de Helmholtz, e as variações naturais do campo geomagnético serão sobrepostas, causando interferência com o processo em que o magnetômetro produz um valor de sensibilidade. Se esse efeito interferente for forte, o grau de precisão da calibração irá cair. Ao fazer medições quando as variações geomagnéticas estão em um estado calmo e usando valores médios obtidos através de medições repetidas, é possível atingir 0,1 % de exatidão.

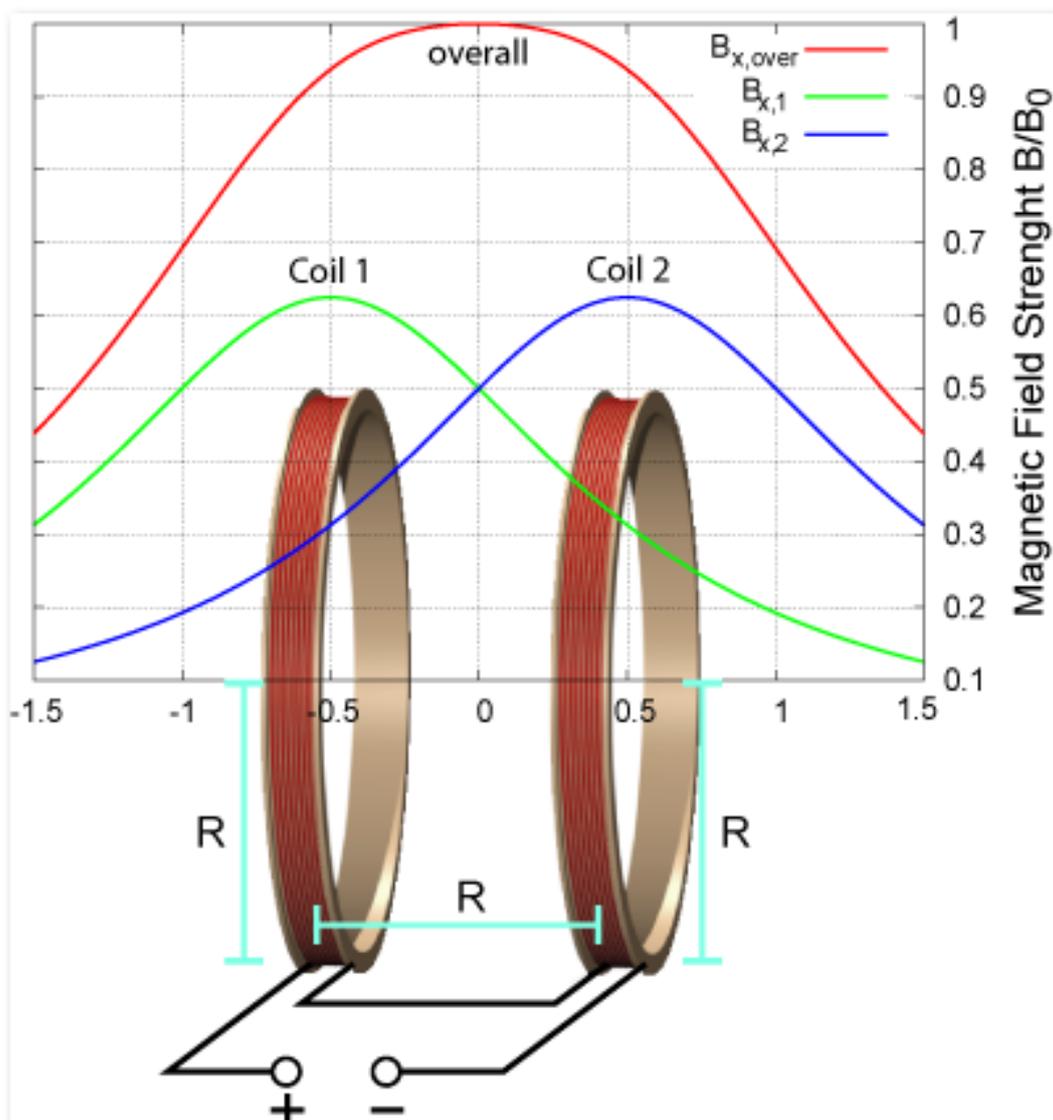


Figura 5.2: Representação da intensidade do campo magnético no intervalo de um par de bobinas de Helmholtz circulares.

5.2 Blindagem Magnética

Um dos parâmetros importantes no processo de calibração de magnetômetros é a determinação de sua resposta a um campo magnético nulo, que na prática se traduz em um campo magnético mínimo. A determinação deste parâmetro é denominada como caracterização de Offset ou caracterização de resposta ao campo magnético mínimo.

Como o fluxo magnético proveniente do campo geomagnético está presente em toda a parte e permeia tudo que encontra, a obtenção de um campo magnético de intensidade zero é impraticável. Um método de se obter um campo magnético aproximadamente nulo é através da utilização de uma chamada blindagem magnética.

Como o fluxo magnético não pode ser contido, uma das soluções práticas utilizadas é o desvio do curso deste fluxo através de uma blindagem magnética. Esta blindagem consiste na utilização de chapas de um material de alta permeabilidade magnética dispostas em um arranjo mecânico propício para o fim de desviar ao máximo o fluxo magnético, representado pelas suas linhas de campo, para o interior deste material e assim criar uma região no espaço exterior próximo com fluxo magnético mínimo. Este tipo de blindagem por utilizar apenas elementos passivos, é denominada blindagem magnética passiva.

Outra solução prática para obtenção de um campo magnético mínimo é a utilização de bobinas eletromagnéticas paralelas, como as utilizadas na bobina de Helmholtz. Neste arranjo, um campo magnético de mesma intensidade e direção, mas com sentido contrário ao campo magnético local é gerado pelas bobinas por meio de uma fonte de corrente ligada às bobinas. O efeito subtrativo da interação do campo gerado com o campo local tende a criar uma região de campo mínimo, aproximadamente homogêneo, no espaço central entre as bobinas. Esta solução por utilizar elementos ativos é definida aqui como uma blindagem ativa.

Esta solução de blindagem ativa requer a medição do campo local para o controle da corrente elétrica correspondente a ser aplicada nas bobinas. Entretanto, o campo geomagnético varia constantemente no tempo e no espaço, o que tende a tornar este controle de corrente de difícil realização, já que o sensor de referência estará obrigatoriamente instalado em uma posição diferente do sensor em teste.

Uma terceira opção é a utilização combinada da blindagem passiva com a blindagem ativa. Nesta solução a blindagem ativa é utilizada para o cancelamento do campo magnético principal, ou seja, a subtração do campo médio, ficando a cargo da blindagem passiva o papel de isolar as variações de pequena intensidade remanescentes. Entretanto, esta solução tende a ter um custo muito maior e um arranjo complexo devido, entre outros fatores, à interação do campo gerado pela blindagem ativa com o material da blindagem passiva.

Considerando a utilização de uma blindagem passiva, cabe definir o seu projeto otimizado para melhor cumprir a função de desviar o curso do fluxo magnético e assim criar uma região de campo magnético mínimo. Para que a construção da blindagem magnética seja viável, esta deverá ter forma preferencialmente simples, composta por material de alta permeabilidade magnética e com superfícies que criem rotas de menor resistência ao fluxo magnético. Assim sendo, algumas das principais

características a serem consideradas são:

- Formato e dimensão
- Continuidade Magnética
- Material

Como uma parte do fluxo magnético que percorre o interior do material da blindagem sempre tenderá a deixá-lo ao encontrar uma zona de transição na direção do fluxo, a blindagem deve possuir um formato em que as transições possuem raios de curvatura suaves.

Seguindo este princípio, a geometria ideal para uma blindagem magnética passiva é dada por uma esfera perfeita, entretanto sua fabricação é inviável para a aplicação pretendida. O formato seguinte em desempenho para uma blindagem magnética passiva é dado por um cilindro de comprimento infinito, que na prática é convertido em um cilindro de comprimento algumas vezes maior que seu diâmetro (por exemplo, 4:1) e com as extremidades fechadas.

A continuidade magnética é necessária para o desvio adequado de fluxo magnético e o melhor desempenho é dado por blindagens de peça única, livres de interrupções na superfície. Quando as condições impossibilitam a fabricação da blindagem em peça única, a continuidade pode ser preservada através de um bom contato mecânico por sobreposição ou através de soldas utilizando material compatível. A manutenção da continuidade entre as superfícies aprimora o desempenho geral da blindagem e garante que o fluxo magnético possa continuar ao longo do caminho de maior permeabilidade.

Para o fechamento das extremidades do cilindro de blindagem magnética, são utilizadas tampas laterais, que permitem a abertura para a colocação do sensor a ser testado em seu interior, com abas com largura suficiente para permitir um bom contato mecânico por sobreposição de chapas e assim garantir adequada continuidade magnética.

Para que o material esteja livre de aberturas nas superfícies principais de condução do fluxo magnético, a passagem dos cabos dos sensores é feita nas faces transversais à direção deste fluxo. É importante considerar o impacto das penetrações no desempenho da blindagem, devendo a relação entre diâmetro e comprimento ser

aumentada o máximo possível como forma de compensação. Ao aumentar o comprimento de uma blindagem enquanto mantemos seu diâmetro, nos aproximamos da configuração de um cilindro infinitamente longo, o que melhora o desempenho da blindagem em uma região de maior distância da abertura.

Além de possuir transições suaves, o material deverá ser contínuo no sentido do fluxo, o que implica no posicionamento adequado da blindagem em relação ao campo magnético externo ao qual é submetida para utilização com o propósito de um campo magnético interno mínimo.

Materiais utilizados na blindagem passiva possuem tipicamente permeabilidade magnética relativa muito alta ($\mu/\mu_{0max.} > 10^4$). Alguns exemplos de ligas metálicas utilizadas na blindagem são Mu-metal (composto de aproximadamente 80% de níquel, 5% de molibdênio e pequenas quantidades de vários outros elementos) e Permalloy (composto de aproximadamente 80% de níquel e 20% de teor de ferro).

Para o efeito de desvio do fluxo de campo magnético dado por um cilindro com as extremidades fechadas, são utilizados diversos cilindros de diâmetros escalonados e concêntricos.

A blindagem magnética utilizada neste projeto, para caracterização de resposta ao campo magnético mínimo, é uma blindagem magnética passiva composta por cinco cilindros concêntricos com as extremidades fechadas por tampas de aba larga e abertura central para passagem dos cabos elétricos para interligação do magnetômetro em teste. Esta blindagem faz parte do acervo do LDSM-ON e foi adquirida anteriormente a este projeto. A figura 5.4 apresenta uma imagem desta blindagem.

5.3 Fonte de Alimentação do Magnetômetro

A alimentação elétrica do magnetômetro durante a calibração é realizada através de uma fonte de bancada com saída de tensão contínua, que deve ser suficientemente estável para não induzir erros adicionais ao sistema de teste.

A fonte de alimentação utilizada possui saída isolada de tensão elétrica programável entre 0 – 30V, com corrente elétrica máxima de 3A e nível de ruído menor que $1mV_{rms}$.

O modelo de fonte de alimentação disponível no LDSM e utilizado neste projeto

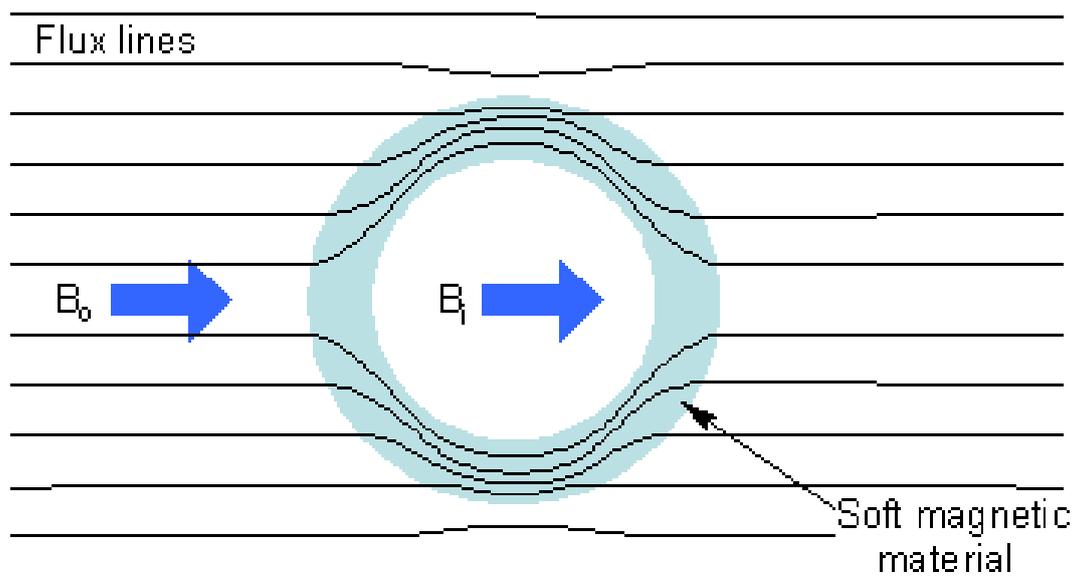


Figura 5.3: Representação simplificada das linhas de fluxo magnético em um cilindro de material com alta permeabilidade magnética (similar ao material utilizado na blindagem magnética deste projeto) exposto a um campo magnético externo.

é o "9130 - Triple Output Programmable DC Power Supply" do fabricante "BK Precision".

5.4 Fonte Programável de Corrente Contínua

O sinal elétrico utilizado para produzir o campo magnético na bobina de Helmholtz é proveniente de uma fonte com saída programável de corrente elétrica contínua. Esta fonte é controlada pelo programa de calibração instalado no computador ao qual está interligada. Esta característica permite que a intensidade magnética aplicada ao magnetômetro em teste possa ser programada para variar automaticamente ao longo dos ciclos de calibração.

A fonte de corrente elétrica utilizada possui resolução de $50\mu A$ para a faixa de operação de $1A$.

O modelo de fonte programável de corrente elétrica, com medição incorporada, disponível no LDSM e utilizado neste projeto é o "2400 5A SourceMeter" do fabricante "Keithley".



Figura 5.4: Imagem da blindagem magnética utilizada para caracterização em campo magnético aproximadamente nulo.

5.5 Amperímetro Programável Padrão

Devido a possíveis discrepâncias entre o valor de corrente elétrica programado para ser gerado pela fonte de corrente elétrica contínua programável e o valor efetivamente aplicado nas bobinas de calibração, um amperímetro de precisão é utilizado em série com o circuito desta fonte.

Assim como a fonte de corrente elétrica contínua, este amperímetro é também programável e é interligado ao computador do programa de calibração. Esta interligação permite a programação da escala de medição e a aquisição automática das medições de corrente elétrica em sincronia com os ciclos de calibração.

A medição de corrente elétrica através deste amperímetro é utilizada para o cálculo do campo magnético correspondente aplicado ao magnetômetro em teste. Os coeficientes que correlacionam o campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz a partir da corrente elétrica aplicada são determinados teoricamente pelas fórmulas apresentadas na seção 5.1 e confirmadas através da medição do campo magnético medido por um magnetômetro de referência calibrado, posicionado no mesmo ponto de medição central no interior do arranjo de bobinas que será utilizado para a calibração de outros magnetômetros.

O modelo de multímetro programável disponível no LDSM e utilizado na função

de amperímetro neste projeto é o "8846A - 6 1/2 digit Precision Multimeter" do fabricante "Fluke".

5.6 Multímetro Programável Padrão

Para leitura do sinal de saída de magnetômetros que não possuem saída digital é utilizado um multímetro de precisão interligado ao computador do programa de calibração. Esta interligação permite a programação do tipo de medição a ser realizada para leitura da saída analógica do magnetômetro, em geral sinal de tensão elétrica contínua (0-10 V) ou sinal de corrente elétrica contínua (4-20 mA).

Além da seleção do tipo de medição, a interligação com o computador permite programar a escala de medição e a aquisição automática destas medições em sincronia com os ciclos de calibração assim como é realizado para o sinal de corrente elétrica aplicado nas bobinas de Helmholtz.

Para a calibração dos magnetômetros de saída analógica deve-se levar em consideração a conversão do valor do sinal de saída do magnetômetro, tensão ou corrente elétrica, com o valor do campo magnético medido correspondente.

O magnetômetro utilizado para os testes realizados neste trabalho possui saída digital serial com protocolo de comunicação próprio.

O modelo de multímetro disponível no LDSM e utilizado neste projeto é o "8846A - 6 1/2 digit Precision Multimeter" do fabricante "Fluke".

5.7 Comutador

A caixa comutadora (Figura 5.6) foi projetada e fabricada especialmente para esta aplicação e é responsável por receber e interpretar os comandos provenientes do computador, via comunicação serial, para comutar a interligação entre a fonte de corrente elétrica, multímetro e a bobina de Helmholtz. Deste modo, permite ligar, desligar ou alternar a polaridade do sinal de corrente elétrica aplicado nas bobinas.

Este equipamento é composto de uma placa microcontrolada interligada a uma placa de réles que está por sua vez conectada aos cabos do sinal de corrente elétrica.

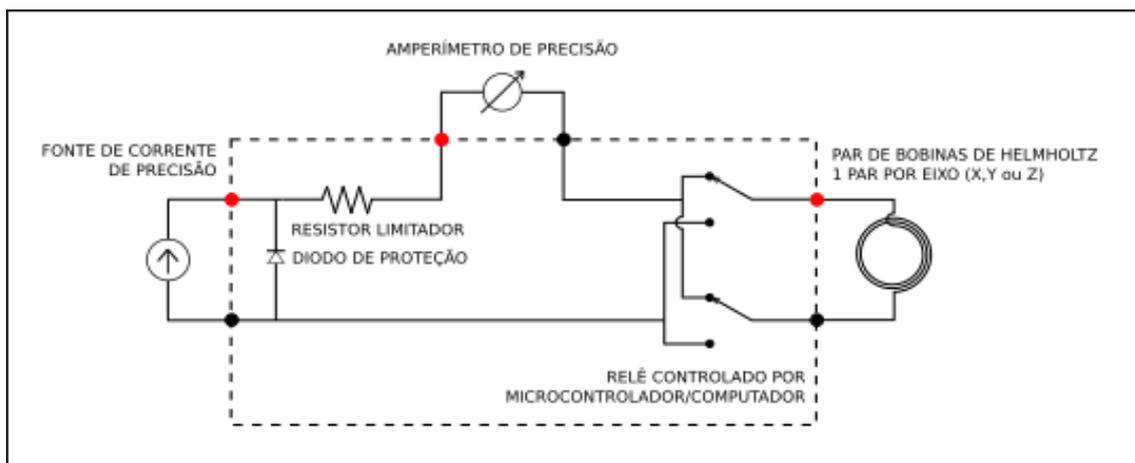


Figura 5.5: Diagrama simplificado do circuito comutador, sendo um para cada par do arranjo triaxial das bobinas de Helmholtz.

A caixa comutadora utiliza um microcontrolador de placa única (*single-board microcontroller*), chamado desta forma por possuir um microcontrolador integrado em uma única placa de circuito impresso. Esta placa fornece todos os circuitos necessários para permitir que um microcontrolador possa ser utilizado no controle de dispositivos externos.

Um microcontrolador é um computador presente em um único circuito integrado que é dedicado a executar tarefas para uma aplicação específica. Ele contém memória, conexões de entrada e saída programáveis, bem como um processador.

O programa contido na memória do comutador apenas interpreta os comandos enviados pelo computador de calibração, via comunicação serial, e aciona os relés correspondentes. Toda sequência e tempo de acionamento dos relés é determinado pelo programa do computador de calibração.

Para controlar a polaridade e o estado ligado/desligado dos pares das bobinas de Helmholtz são utilizadas chaves do tipo relé. Estas são chaves eletromagnéticas operadas por uma corrente elétrica relativamente pequena que pode ligar ou desligar o condutor de uma corrente elétrica de maior intensidade.

Como a resistência elétrica destas chaves relé é praticamente nula quando estão fechadas e a resistência elétrica é praticamente infinita quando estão abertas (considerando o nível de tensão elétrica empregado) o seu uso garante que exatamente a mesma corrente elétrica é aplicada na bobina de Helmholtz na polarização direta e na polarização reversa, além de garantir que a bobina está desligada quando as chaves estão abertas, independente de possíveis correntes induzidas ou de fuga na fonte de corrente, amperímetro ou cabos.

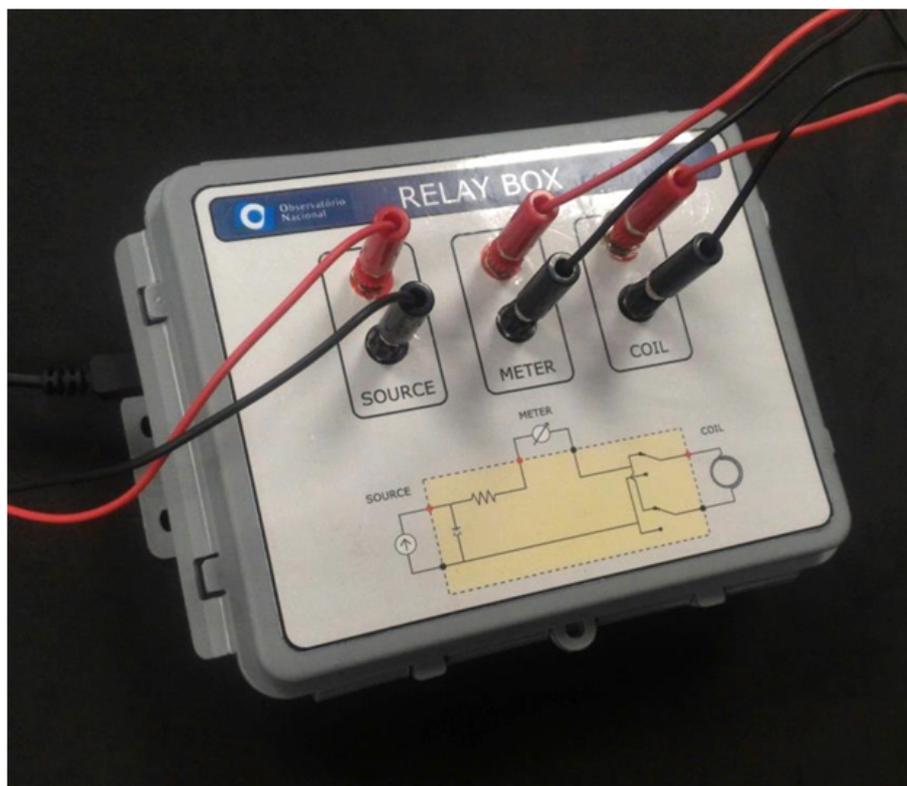


Figura 5.6: Caixa comutadora desenvolvida para esta aplicação.

5.8 Interligação dos Instrumentos ao Computador

Todos os instrumentos de precisão, caixa comutadora e magnetômetro em teste utilizados neste sistema são interligados ao computador de calibração através de canais de comunicação serial. Para cada um dos chamados equipamentos periféricos existe um canal de comunicação serial bidirecional exclusivo no computador.

A comunicação serial é uma técnica de comunicação utilizada para transmissão de dados em que transmissão destes ocorre através de uma série de pulsos elétricos em ordem sequencial por meio de um cabo elétrico, ou o equivalente no caso da utilização de outro tipo de canal físico de comunicação. Pode ser considerada como a forma mais simples de comunicação eletrônica entre um remetente e um receptor. Outra forma de comunicação, em contraste com a comunicação serial, é a comunicação paralela, onde cada pacote de dados é enviado como um todo através de vários canais paralelos.

A comunicação serial impõe restrições com relação à velocidade de transmissão, mas que não representam impacto significativo, considerando as taxas de comunicação requeridos pelo procedimento utilizado neste projeto e a velocidade máxima de comunicação disponível tanto nos instrumentos de precisão quanto no magnetômetro em teste.

Os instrumentos metrológicos, caixa comutadora e magnetômetro em teste utilizados neste trabalho possuem portas de interface serial padrão RS-232. Este padrão de comunicação serial é amplamente utilizado e estabelece um protocolo de comunicação, entre outras especificações, para interligar computadores a dispositivos periféricos permitindo a troca de dados em série.

Este padrão foi estabelecido em 1962 pela "Electronic Industry Association and the Telecommunications Industry Association (EIA/TIA) e seu nome oficial é EIA/TIA-232, sendo RS-232 proveniente da sigla "RS" que significa padrão recomendado ("recommended standard" em inglês).

Computadores modernos, como o utilizado neste projeto, possuem diversas portas de interface de comunicação padrão USB. Este padrão de comunicação foi desenvolvido por um consórcio de empresas fabricantes de computadores e estabelece a especificação dos cabos, conectores e protocolos de comunicação utilizados na conexão, comunicação e alimentação elétrica entre os dispositivos que utilizam este tipo de interligação.

O USB é um barramento de comunicação serial universal (Universal Serial Bus) onde o computador é o responsável pela identificação e gerenciamento da comunicação com os dispositivos interligados.

Portas de comunicação padrão USB são largamente utilizadas em computadores atuais pela facilidade de conexão de diferentes periféricos, por fornecer alimentação elétrica e possuir taxas de comunicação mais altas que o padrão RS-232, mas possui uma implementação mais complexa.

Ainda que possua taxas de comunicação mais baixas que o USB, o padrão RS-232 é muito utilizado em aplicações científicas e industriais pela sua confiabilidade, relativa simplicidade, menor custo computacional e facilidade de teste. Este padrão de comunicação está presente na maioria dos instrumentos utilizados na área de geofísica que permitem a transmissão de seus dados.

Para que computador utilizado neste projeto possa ser interligado através das suas portas de interface de comunicação padrão USB aos periféricos que utilizam portas de interface de comunicação padrão RS-232, foram utilizados conversores de sinal dedicados para cada canal.

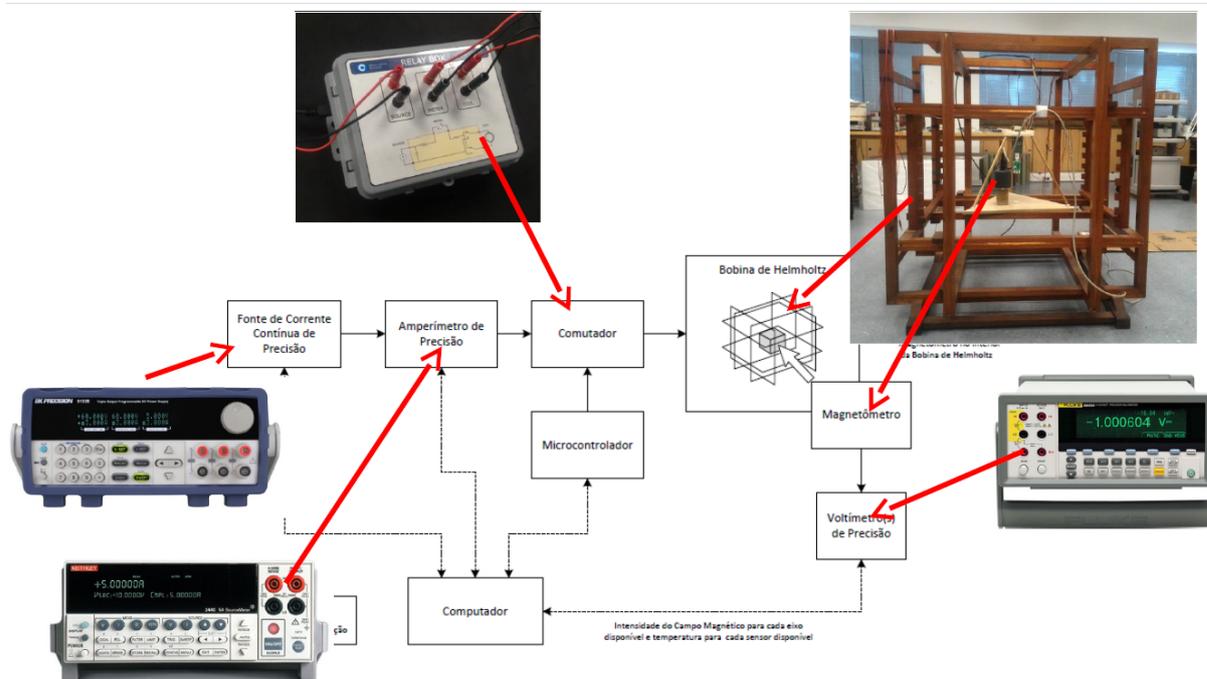


Figura 5.7: Instrumentos utilizados na caracterização magnética.

5.9 Protocolos de comunicação

Para que os dados transmitidos através dos canais físicos de comunicação serial entre computador e periféricos possam ser corretamente interpretados foram utilizados protocolos de comunicação que permitem o envio de comandos e a leitura de dados de medição dos instrumentos utilizados como padrão, da caixa comutadora e do magnetômetro em teste.

Para os instrumentos utilizados como padrão foi empregado o protocolo de comunicação conhecido como GPIB que é especificado pelo padrão ANSI/IEEE 488.1-2003 - IEEE Standard For Higher Performance Protocol for the Standard Digital Interface for *Programmable Instrumentation*.

Para a caixa comutadora foi utilizado o protocolo Firmata. Este protocolo foi criado para o controle de microcontroladores a partir de um computador. Como

princípio este protocolo pretende poder ser implementado na memória interna de qualquer tipo de arquitetura de microcontrolador e pode ser controlado a partir de qualquer tipo de computador existente.

O Firmata é um protocolo de comunicação baseado no formato MIDI (Musical Instrument Digital Interface), onde são utilizados bytes de comando seguidos de byte de dados. Tanto o formato MIDI quanto o Firmata utilizam mensagens com 2 bytes de comprimento, sendo que os bytes de comando são de 8 bits e os bytes de dados são de 7 bits. As bibliotecas de programação para o protocolo Firmata podem teoricamente ser implementadas para qualquer plataforma de microcontrolador, no entanto a implementação mais completa é para o Arduino, que é o modelo placa microcontrolada selecionada para o controle do comutador deste projeto.

Com o uso do protocolo Firmata, toda a lógica de acionamento das chaves comutadoras passa a ser realizada pelo computador, ficando a cargo da placa apenas interpretar os comandos e acionar as portas de saída correspondentes do microcontrolador e conseqüentemente dos relés comutadores a elas interligadas.

Os magnetômetros em teste possuem protocolos próprios de comunicação. Portanto cada novo magnetômetro poderá exigir a modificação do programa para interpretação dos dados transmitidos.

Capítulo 6

Sistema de Calibração Computadorizado

Uma das principais razões para o desenvolvimento de um sistema automatizado por computador é a necessidade de se produzir muitos ciclos de aplicação de campo magnético de referência em intervalos controlados em tempo e intensidade. Isto torna a operação manual impraticável.

Para este trabalho o computador de calibração utilizado é um computador padrão PC (*Personal Computer*) com sistema operacional *Windows* e plataforma de desenvolvimento *LABView* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) para programação em linguagem G.

6.1 Programa de Calibração

O programa de calibração, desenvolvido em linguagem G especificamente para este trabalho, utiliza uma interface gráfica que permite a realização das seguintes atividades principais:

- Configuração e utilização das portas de comunicação serial para os instrumentos de teste interligados ao computador;
- Variação do campo magnético aplicado nas bobinas de Helmholtz em polaridade e intensidade;
- Programação da variação automática do campo magnético aplicado nas bobinas de Helmholtz em ciclos de calibração de longo período;
- Cálculo de compensação para influência do campo magnético local e filtragem dos sinais;

- Aplicação de coeficientes de calibração para as leituras de campo magnético realizadas pelo magnetômetro em teste;
- Registro gráfico e em arquivo eletrônico das leituras de campo magnético nos eixos X, Y e Z, realizadas pelo magnetômetro em teste, com relação ao campo magnético aplicado e a temperatura do sensor;
- Geração de gráficos comparativos entre campo magnético aplicado e campo magnético medido;
- Geração de gráficos comparativos entre temperatura e campo magnético medido.

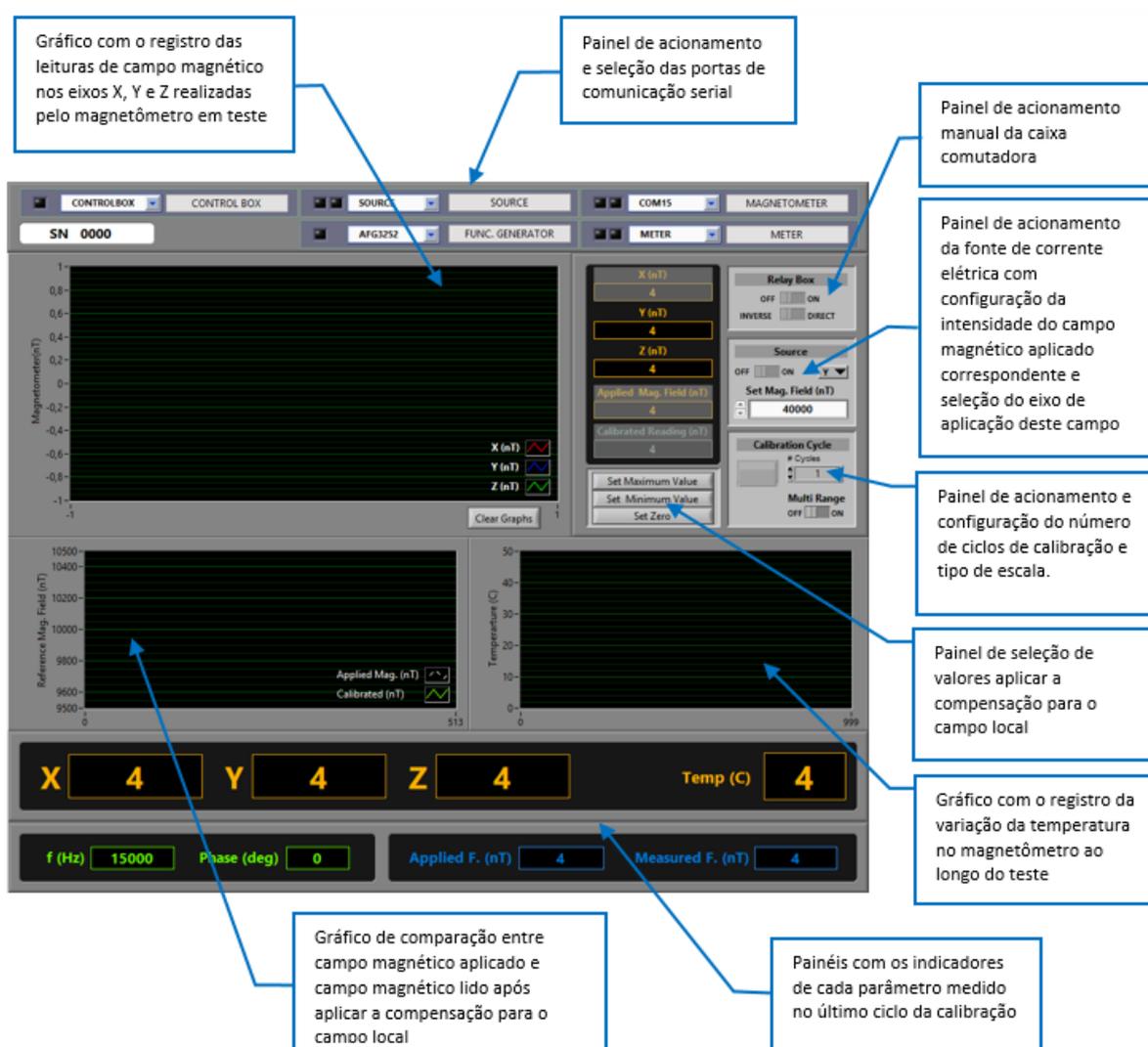


Figura 6.1: Imagem da tela principal do programa de calibração com suas funções.

6.2 Procedimento de Calibração

Os sistemas de caracterização do magnetômetro de núcleo saturado descritos no capítulo ?? podem ser agrupados em dois grupos principais:

- Caracterizações em campo magnético aproximadamente nulo, com ou sem variação da temperatura;
- Caracterizações com campo magnético variável aplicado, com ou sem variação da temperatura;

No primeiro grupo de caracterizações, o magnetômetro é colocado dentro da blindagem magnética ou termo-magnética (figuras 5.4 e 6.3) e interligado ao sistema de calibração para leitura das medições, filtragem das medições e determinação do *offset*, considerando ou não a influência da variação térmica. Neste caso, a bobina de Helmholtz e os instrumento associados não são acionados no programa de calibração e este é utilizado apenas para registro dos dados de medição.

No segundo grupo de caracterizações, o magnetômetro é posicionado no interior da bobina de Helmholtz, que pode também contemplar uma blindagem térmica (figura 6.4) para as caracterizações correspondentes.

Neste grupo, o programa de calibração é utilizado para aplicar diferentes valores de campo magnético sobre o magnetômetro em teste através da bobina de Helmholtz e os instrumento associados.

Esta variação do campo magnético permite a determinação dos demais coeficientes de calibração por meio da correlação entre os valores aplicados e os valores medidos após vários ciclos de variação do campo aplicado, filtragem dos valores medidos e compensação da influência do campo local.

6.3 Algoritmo Computacional

O programa de calibração foi desenvolvido utilizando programação pseudo-paralela com quatro processos principais atuando concomitantemente para o controle e a leitura dos instrumentos utilizados como padrão, magnetômetro em teste e rotina automática de calibração:

1. Processo de controle do comutador;

2. Processo de medição do magnetômetro;
3. Processo de medição do campo aplicado;
4. Processo automático de variação de parâmetros;

6.3.1 Processo de Controle do Computador

O processo de controle do computador realiza as seguintes rotinas principais:

1. Configura as variáveis de controle do computador;
2. Abertura da comunicação serial com o computador: Inicia a comunicação com o microcontrolador do computador utilizando protocolo Firmata e coloca todos os réles na condição inicial (bobina desligada);
3. Controla a comunicação serial com o computador: Recebe os comandos de ligar ou desligar a bobina e o comando de polaridade direta ou reversa e envia para o acionamento dos relés correspondentes no microcontrolador via comunicação serial. Permanece neste ciclo sempre aguardando novos comandos ou o fechamento da comunicação;
4. Fechamento da comunicação serial: Se é solicitado o fechamento da comunicação serial ou se há algum erro de comunicação o processo envia um comando para o fechamento da porta de comunicação serial e permanece aguardando uma nova tentativa de comunicação ou o fechamento do programa.

6.3.2 Processo de Medição do Magnetômetro

O processo de medição do magnetômetro de teste realiza as seguintes rotinas principais:

1. Configura as variáveis de medição do magnetômetro de teste;
2. Abertura da comunicação serial com o magnetômetro: Inicia a comunicação com o magnetômetro utilizando protocolo específico do magnetômetro em teste;
3. Realiza a comunicação serial com o magnetômetro em teste para a leitura dos seus dados de medição: Lê os dados provenientes do magnetômetro e aplica os coeficientes preliminares de calibração para leitura do campo magnético e da temperatura. A partir destas leituras são registrados os valores de campo magnético mínimo e máximo. O campo magnético mínimo é resultante da superposição do campo magnético aplicado em sentido reverso e o campo local, já o campo magnético máximo é resultante superposição do campo magnético

aplicado em sentido direto e o campo local. Para se encontrar o valor que corresponde somente ao campo aplicado, sem a contribuição do campo local, o valor a ser utilizado é o valor médio entre as leituras de campo magnético máximo e mínimo. Este é definido como Campo Magnético Medido. Permanece neste ciclo sempre aguardando novos comandos ou o fechamento da comunicação;

4. Fechamento da comunicação serial: Se é solicitado o fechamento da comunicação serial ou se há algum erro de comunicação o processo envia um comando para o fechamento da porta de comunicação serial e permanece aguardando uma nova tentativa de comunicação ou o fechamento do programa.

6.3.3 Processo de Medição do Campo Magnético Aplicado

O processo de medição do campo magnético aplicado realiza as seguintes rotinas principais:

1. Configura as variáveis de medição do campo magnético aplicado;
2. Abertura da comunicação serial com o magnetômetro: Inicia a comunicação serial e configura o amperímetro para o modo de amperímetro de corrente contínua;
3. Realiza a comunicação serial com o amperímetro para a leitura da corrente elétrica aplicada na bobina de Helmholtz pela fonte de corrente: Estabelece a leitura da medição de corrente elétrica e em função do eixo selecionado (X, Y ou Z) aplica a constante de correlação entre corrente aplicada (em mA) e campo magnético (em nT) correspondente. A fim de reduzir a influência do ruído na medição, um número de leituras pré-definido é realizado e o valor utilizado é o resultante da média aritmética destas leituras. Ao final da medição este valor é definido como Campo Magnético Aplicado.
4. Fechamento da comunicação serial: Se é solicitado o fechamento da comunicação serial ou se há algum erro de comunicação o processo envia um comando para o fechamento da porta de comunicação serial e permanece aguardando uma nova tentativa de comunicação ou o fechamento do programa.

6.3.4 Processo Automático de Variação de Parâmetros

O processo automático de variação de parâmetros realiza as seguintes rotinas principais:

1. Configura as variáveis do processo automático de variação de parâmetros: Configura os modos de operação com seleção do eixo a ser medido e modo de varredura. Para faixa de varredura define o valor inicial, o valor final e a subdivisão. Para cada conjunto de parâmetros a ser variado (em varredura sequencial), um vetor com os valores a ser utilizado é gerado, permitindo múltiplas combinações de varredura.
2. Ciclos de varredura: A partir dos vetores determinados na etapa anterior, a seguinte sequência de comandos, leituras, cálculos e registros é realizada para cada valor dentro dos ciclos de varredura determinados por estes vetores que determinam o valor de campo magnético a ser aplicado.
 - (a) Envia comando para a fonte de corrente elétrica com o valor de corrente a ser aplicado na bobina de Helmholtz e aguarda estabilização. Nesta etapa a saída da fonte de corrente ainda está desligada;
 - (b) Envia comando para o processo de controle do comutador aplicar o modo de polarização direta;
 - (c) Envia comando para o processo de controle do comutador para ligar a chave entre a bobina de Helmholtz e a fonte de corrente;
 - (d) Envia comando para o processo de fonte para ligar a saída da fonte de corrente e aguarda estabilização;
 - (e) Configura para modo de leitura do campo magnético máximo (campo aplicado direto + campo local) e aguarda as leituras de campo magnético aplicado através do multímetro e do campo magnético lido pelo magnetômetro em teste;
 - (f) Envia comando para desligar a fonte de corrente e aguarda estabilização. Configura para modo de leitura neutro;
 - (g) Envia comando para o processo de controle do comutador para desligar a chave entre a bobina de Helmholtz e a fonte de corrente e aguarda estabilização;
 - (h) Envia comando para o processo de controle do comutador aplicar o modo de polarização inversa;
 - (i) Aguarda estabilização;
 - (j) Envia comando para o processo de controle do comutador para ligar a chave entre a bobina de Helmholtz e a fonte de corrente;
 - (k) Envia comando para o processo de fonte para ligar a saída da fonte de corrente e aguarda estabilização;

- (l) Configura para modo de leitura do campo magnético mínimo (campo aplicado inverso + campo local) e aguarda as leituras de campo magnético aplicado através do multímetro e do campo magnético lido pelo magnetômetro em teste;
- (m) Envia comando para desligar a saída da fonte de corrente. Coloca o processo Meter Magnetometer em modo de cálculo do campo resultante a partir das leituras de campo magnético máximo (campo aplicado direto + campo local) e de campo magnético mínimo (campo aplicado inverso + campo local);
- (n) Envia comando para o processo de controle do comutador para desligar a chave entre a bobina de Helmholtz e a fonte de corrente. Aguarda estabilização;
- (o) Desabilita a atualização do registro das leituras dos instrumentos;
- (p) Atualiza registro de medidas realizadas com as leituras de campo magnético realizadas pelo magnetômetro e atualiza gráficos.
- (q) Atualiza registro de medidas realizadas com as leituras de campo aplicado, temperatura do magnetômetro (temperatura média no intervalo deste ciclo de medição), fase, frequência e número de identificação do magnetômetro em teste;
- (r) Atualiza os gráficos de Campo Aplicado x Campo Medido, Campo Aplicado x Erro, Campo Medido x Temperatura, Frequencia x Erro, Fase x Erro;
- (s) Atualiza o cálculo dos coeficientes de calibração utilizando o método dos mínimos quadrados a partir dos novos valores de Campo medido, Campo Aplicado e Temperatura;
- (t) Atualização da planilha de dados adquiridos;
- (u) Atualização do registro da planilha em arquivo.

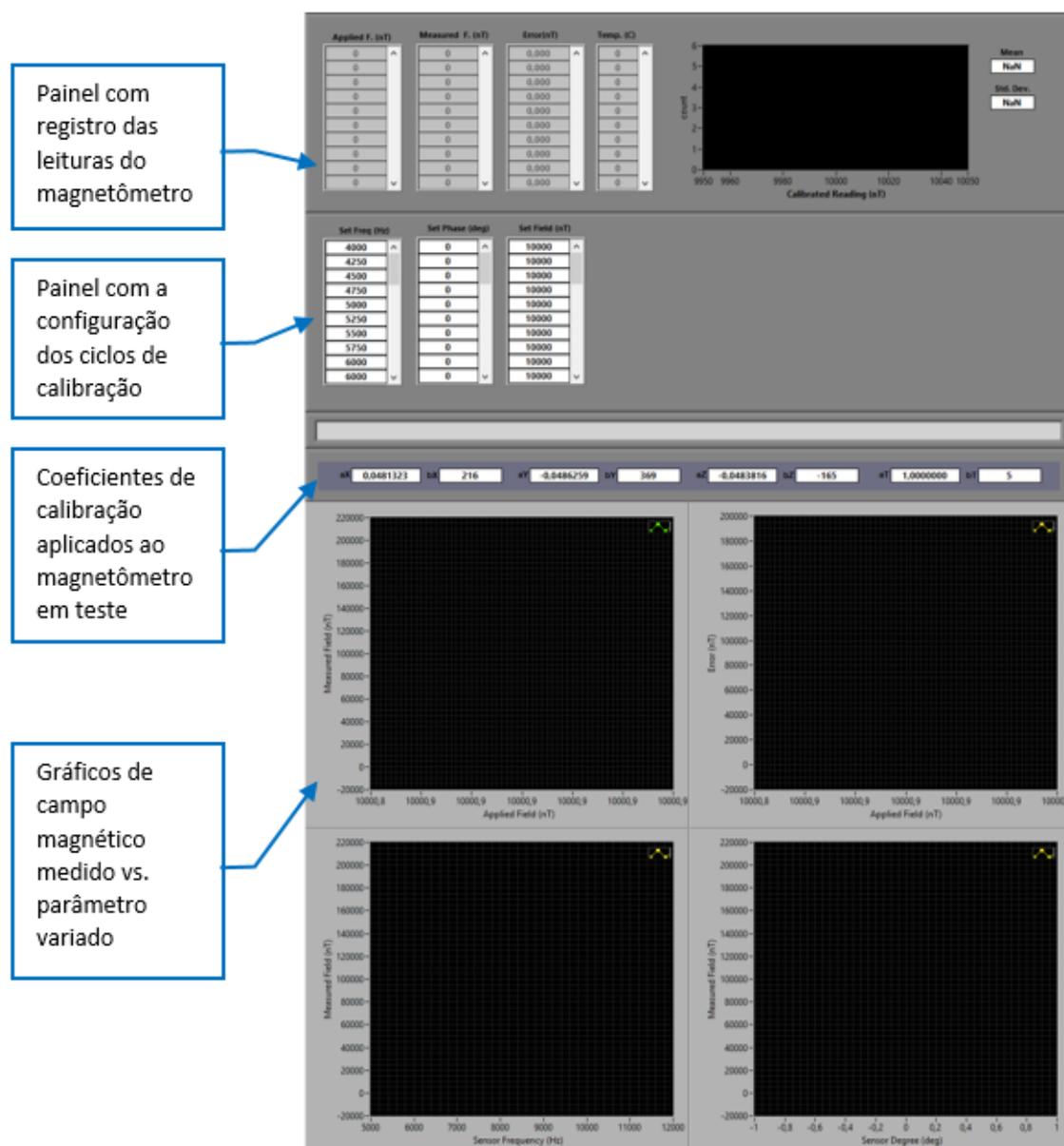


Figura 6.2: Imagem da tela auxiliar do programa de calibração com suas funções.



Figura 6.3: Imagem da blindagem termo-magnética utilizada para caracterização em campo magnético aproximadamente nulo com determinação da dependência térmica.



Figura 6.4: Imagem da blindagem térmica utilizada para caracterização em campo magnético variável com determinação da dependência térmica.

Capítulo 7

Resultados

Neste trabalho foram desenvolvidos conjuntos de procedimentos, sistemas eletrônicos e ferramentas computacionais que permitem o teste e a calibração ativa de magnetômetros de núcleo saturado. Entre as diversas atividades realizadas para este projeto, podemos destacar:

- Desenvolvimento de procedimento de calibração para caracterização de magnetômetros de núcleo saturado com utilização de bobinas de Helmholtz para variação ativa do campo de magnético de referência e blindagem magnética para referência de campo magnético aproximadamente nulo;
- Construção e ajuste de um magnetômetro triaxial de núcleo saturado para ser utilizado como elemento de teste;
- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos de comunicação com as fonte para acionamento da bobina de Helmholtz, comutação do sinal de corrente controlada e medição;
- Desenvolvimento de circuitos eletrônicos e algoritmos para captura e interpretação dos sinais de medição proveniente de diversos tipos de magnetômetros de núcleo saturado;
- Desenvolvimento de programas computacionais específicos para implementação dos procedimentos de calibração para caracterização de magnetômetros de núcleo saturado com utilização de bobinas de Helmholtz, incluindo algoritmos para acionamento do comutador, interpretação/filtragem dos sinais dos magnetômetros e cálculo dos parâmetros de calibração;
- Montagem e teste do sistema de calibração utilizando magnetômetros triaxiais de referência e magnetômetro de teste;

- Desenvolvimento de programas computacionais específicos para implementação de rotinas de medição, filtragem e cálculo de parâmetros de calibração do magnetômetro de teste para medições de longo período;

Nas seções seguintes são apresentados alguns exemplos de caracterização realizadas com o magnetômetro de teste desenvolvido para este projeto e o sistema de calibração ativa computadorizada objeto deste trabalho.

Os testes realizados seguem uma versão resumida da metodologia apresentada no capítulo 3, os instrumentos descritos no capítulo 5 e o sistema automatizado descrito no capítulo 6.

7.1 Testes de Caracterização para Campo Magnético Mínimo

Nesta seção são apresentados os resultados de um exemplo do teste de caracterização para campo magnético mínimo realizado com o magnetômetro de teste. O intuito desta atividade no processo de calibração de magnetômetro de teste é a determinação de sua resposta a um campo magnético mínimo ou por aproximação tido como nulo. A determinação deste parâmetro é denominada aqui como caracterização de Offset. Este teste também inclui a variação da temperatura como parâmetro.

No exemplo aqui descrito, a caracterização de offset foi realizada com o magnetômetro de teste inserido na blindagem magnética de múltiplas camadas, conforme método descrito no capítulo 3.

Foram realizadas 20300 medições para cada um dos três eixos, tendo como referência o campo magnético considerado aproximadamente nulo e com uma variação de temperatura na faixa de 22°C a 30 °C. A tabela mostrada na figura (7.1) apresenta o resumo dos valores médios de campo magnético equivalente observado, dado pelos valores brutos na saída digital do magnetômetro de teste dentro de cada uma das faixas de temperatura observadas. Ou seja, para cada variação de 1°C de temperatura todas as medidas realizadas neste intervalo são tomadas para compor o valor médio correspondente. A variação de temperatura durante o teste foi gradual, com o número de medições similar para cada um dos intervalos de temperatura apresentados.

Os gráficos apresentados nas figuras (7.2), (7.3) e (7.4) apresentam o resultado da variação da resposta do magnetômetro ao campo magnético aproximadamente nulo e sua variação com a temperatura para cada eixo. Este valores serão utilizados para o ajuste da aproximação linear a ser realizada após a caracterização do magnetômetro no ciclo de calibração ativa.

Os valores de saída do magnetômetro de teste, apresentados nos gráficos e tabelas, são dados brutos (*raw*) que correspondem aos valores de campo magnético na escala digital dados pela saída do conversor analógico/digital interno ao circuito do magnetômetro de teste, onde a correspondência com os valores físicos reais é dada pelo ajuste linear realizado. O mesmo ocorre para os valores brutos de temperatura apresentados nos gráficos, que são dados pela saída do conversor analógico/digital interligado ao sensor de temperatura interno ao magnetômetro.

7.2 Testes de Caracterização para Campo Magnético Variável

Nesta seção são apresentados os resultados dos ciclos de caracterização do magnetômetro de teste através da variação automática do campo magnético aplicado por meio da bobina de Helmholtz interligada ao sistema de calibração.

Para estes testes, o magnetômetro foi inserido no ponto central da bobina de Helmholtz com seus eixos alinhados com os eixos de referência do instrumento. A temperatura foi mantida aproximadamente estável durante a calibração de cada eixo, de forma a definir o valor de temperatura de referência para calibração. Desta forma, ajustes futuros em função da variação da temperatura e a dependência do sinal de saída em função desta, são feito a partir deste valor de temperatura tomado como $T(0)$ para cada eixo.

Os ciclos automáticos de variação do sinal de referência foram configurados para seis valores de campo magnético: 2500, 5000, 7500, 10000, 12500 e 15000 nT. As medições são realizadas em ciclos ascendentes e descendentes na faixa destes valores de referência. Este teste foi programado para 21 ciclos completos de medição, sendo então realizadas, para cada valor de referência, 42 medições automáticas, somando um total de 252 medições por eixo.

As tabelas apresentadas nas figuras (7.5),(7.6) e (7.7) abaixo apresentam um re-

Temperature (°C)	Temp_Raw	X_Raw	Y_Raw	Z_Raw
22	320	8443	8299	-8525
23	330	8443	8305	-8511
24	340	8450	8324	-8498
25	350	8474	8370	-8453
26	360	8502	8406	-8394
27	370	8515	8427	-8351
28	380	8520	8446	-8298
29	390	8503	8466	-8242
30	400	8504	8460	-8227

Figura 7.1: Tabela da caracterização de Offset com a variação de temperatura.

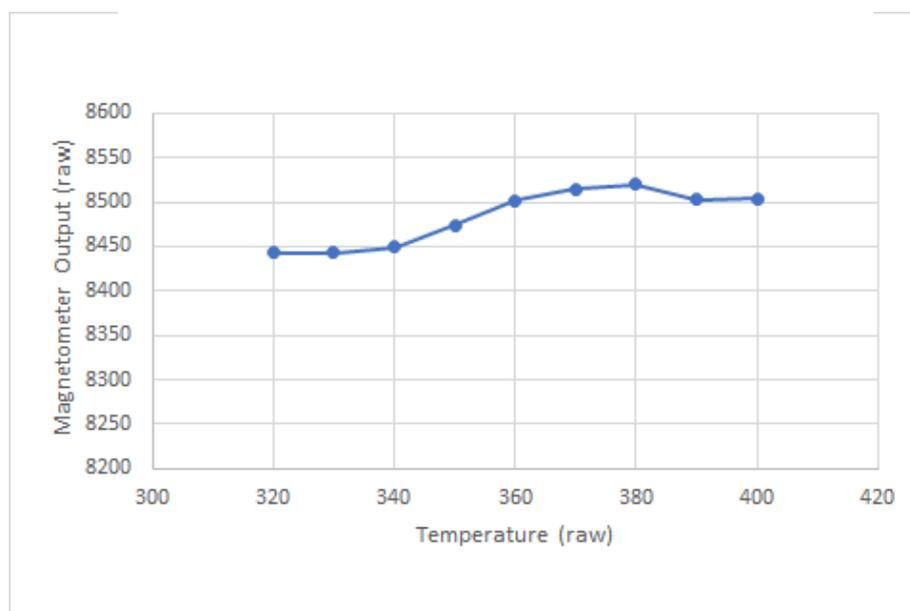


Figura 7.2: Eixo X - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.

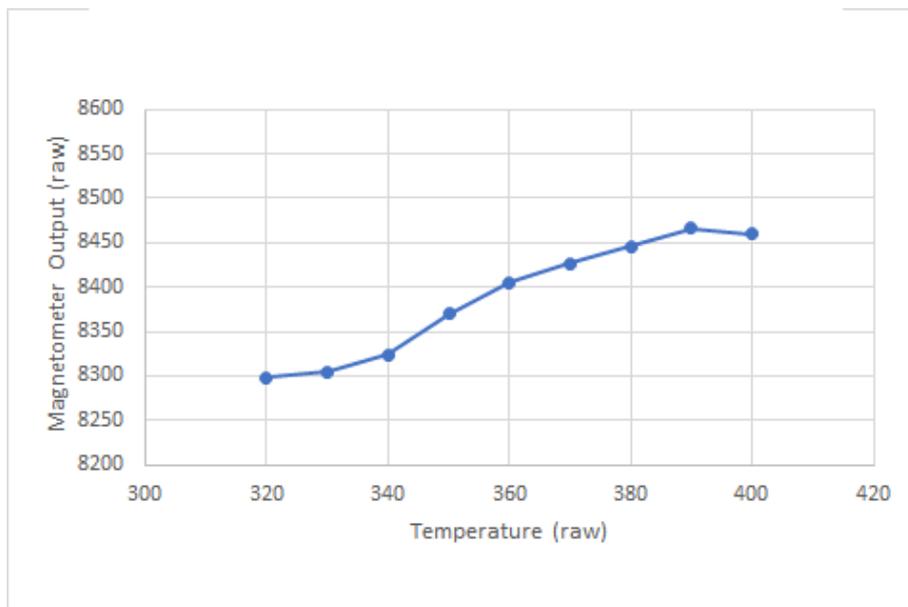


Figura 7.3: Eixo Y - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.

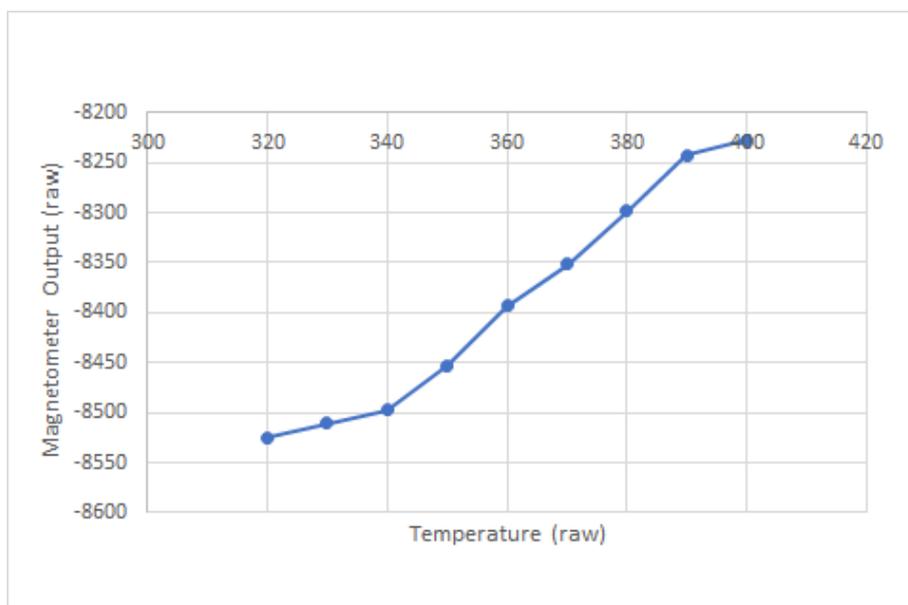


Figura 7.4: Eixo Z - Gráfico do valor médio de saída do magnetômetro para campo magnético mínimo.

sumo geral dos resultados obtidos em cada ciclo de medição para cada um dos eixos X, Y e Z. Algumas medições foram omitidas para facilidade de visualização.

Abaixo são apresentados os valores médios utilizados como sinal ativo de referência, representados pelo campo magnético equivalente gerado na bobina de Helmholtz a partir da variação de corrente elétrica contínua aplicada, e os valores médios encontrados como sinal de resposta do magnetômetro em teste, correspondentes aos valores brutos da saída digital do magnetômetro, para cada um dos valores de referência.

Para este teste, é esperado que a variação de temperatura seja a menor possível, já que este valor estável servirá de referência para o valor T_0 de calibração, ou seja, o valor de temperatura de referência da calibração. Estes valores podem ser vistos para cada um dos eixos ortogonais de referência, dentro da faixa de variação de temperatura encontrada durante o teste. Sendo que o ciclo de calibração é realizado em momento distinto para cada eixo, portanto distintas faixas de variação de temperatura podem ser encontradas.

Os gráficos da variação do valor de campo magnético equivalente para cada eixo aplicado em relação ao valor nominal selecionado na fonte de corrente programável, apresentados nas figuras (7.11), (7.12) e (7.13) e correspondentes às tabelas apresentadas nas figuras (7.8), (7.9) e (7.10), mostram a importância da medição independente do valor de corrente elétrica aplicada com um instrumento de maior precisão. As linhas contínuas interligando os pontos nos gráficos não representam ainda um ajuste linear, sendo apresentadas para auxiliar a visualização.

As figuras (7.14), (7.15) e (7.16) apresentam as diferenças entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado para cada um dos eixos. Como pode ser verificado neste exemplo, a diferença pode alcançar valores acima de 1nT. Estes erros podem talvez serem explicados pela necessidade da fonte de corrente programável ser obrigada a realizar mudanças de escala ao longo da ampla faixa de aplicação de corrente elétrica solicitada.

O magnetômetro de teste possui um sensor de temperatura, instalado junto aos seus sensores magnéticos, para permitir a verificação da temperatura e possível ajuste dos seus valores de saída de medição do campo magnético em função da variação da temperatura. Esta medição de temperatura é dada em valor bruto, gerado pela saída digital do circuito de medição do magnetômetro, proporcional ao valor em unidade física, por exemplo em graus Celsius.

Seq	X_Reference (nT)	X_Applied (nT)	X_Raw	X_Temp
1	2500	2499.6	45731.5	361.6
2	5000	5000.3	91538.0	361.5
3	7500	7500.1	137271.0	361.1
4	10000	10001.0	182933.0	362.1
5	12500	12500.6	228679.5	361.5
6	15000	15000.5	274347.0	362.8
7	15000	15000.5	274278.0	362.2
8	12500	12500.7	228779.0	361.8
9	10000	10001.0	182862.0	361.9
10	7500	7500.1	137292.0	361.6
11	5000	5000.3	91520.5	362.2
12	2500	2499.5	45822.0	362.2
13	2500	2499.5	45815.0	362.4
14	5000	5000.3	91461.0	362.1
15	7500	7500.1	137245.5	360.5
16	10000	10000.9	182988.0	362.1
17	12500	12500.6	228674.5	362.0
18	15000	15000.4	274338.5	362.4
19	15000	15000.4	274254.5	362.0
20	12500	12500.7	228574.5	362.0
21	10000	10001.0	182921.5	360.8
22	7500	7500.1	137216.0	361.6
23	5000	5000.3	91431.0	362.1
24	2500	2499.5	45834.0	362.2
25	2500	2499.6	45740.0	362.1
26	5000	5000.3	91481.5	361.3
27	7500	7500.2	137237.5	361.2
28	10000	10001.0	182900.0	361.7
29	12500	12500.7	228559.0	361.4
30	15000	15000.5	274537.5	361.4
31	15000	15000.5	274372.5	361.9
32	12500	12500.7	228623.5	361.4
33	10000	10001.0	182958.5	361.9
34	7500	7500.2	137168.0	362.1
35	5000	5000.3	91518.5	361.9
36	2500	2499.6	45767.0	360.8
37	2500	2499.6	45822.0	362.1
38	5000	5000.3	91562.5	362.4
39	7500	7500.1	137336.5	362.2
40	10000	10001.0	182977.0	361.6
41	12500	12500.7	228652.0	361.4
42	15000	15000.5	274365.0	361.6
		• • •		
235	15000	15000.5	274340.5	361.9
236	12500	12500.7	228701.5	361.9
237	10000	10001.0	183107.5	361.9
238	7500	7500.2	137246.0	362.8
239	5000	5000.3	91464.5	361.8
240	2500	2499.6	45777.5	361.4
241	2500	2499.6	45798.5	362.2
242	5000	5000.3	91487.5	361.9
243	7500	7500.2	137148.0	361.8
244	10000	10001.0	182995.0	363.2
245	12500	12500.7	228767.0	362.2
246	15000	15000.5	274296.0	361.6
247	15000	15000.6	274250.5	361.9
248	12500	12500.7	228677.0	361.7
249	10000	10001.0	182897.0	360.6
250	7500	7500.2	137247.5	362.0
251	5000	5000.3	91554.5	361.9
252	2500	2499.6	45687.0	362.2

Figura 7.5: Eixo X - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado.

Seq	Y_Reference (nT)	Y_Applied (nT)	Y_Raw	Y_Temp
1	2500	2499.5	47681.0	341.6
2	5000	5000.1	95757.0	341.7
3	7500	7499.9	143329.0	341.5
4	10000	10000.7	190896.0	341.8
5	12500	12500.3	238822.0	342.6
6	15000	15000.0	286456.5	341.6
7	15000	15000.0	286289.0	340.6
8	12500	12500.3	238828.5	341.2
9	10000	10000.7	191049.0	341.8
10	7500	7499.9	143469.5	341.6
11	5000	5000.1	95711.0	340.7
12	2500	2499.4	47875.0	342.8
13	2500	2499.4	48053.5	341.1
14	5000	5000.1	95722.0	340.9
15	7500	7499.9	143303.5	340.6
16	10000	10000.7	190978.5	341.4
17	12500	12500.2	238790.0	341.4
18	15000	15000.0	286441.0	341.9
19	15000	15000.0	286411.0	341.4
20	12500	12500.3	238695.0	341.4
21	10000	10000.6	191110.0	341.2
22	7500	7499.9	143274.5	340.1
23	5000	5000.1	95767.0	341.7
24	2500	2499.4	47913.0	341.4
25	2500	2499.4	47844.5	340.8
26	5000	5000.1	95580.0	340.8
27	7500	7499.9	143495.0	340.9
28	10000	10000.7	191121.0	341.4
29	12500	12500.2	238643.5	340.5
30	15000	14999.9	286403.0	340.7
31	15000	15000.0	286471.0	341.9
32	12500	12500.3	238829.5	341.2
33	10000	10000.7	190941.5	340.4
34	7500	7499.9	143419.5	341.6
35	5000	5000.1	95648.0	340.8
36	2500	2499.4	47903.5	340.9
37	2500	2499.4	48023.5	340.6
38	5000	5000.1	95741.5	340.1
39	7500	7499.9	143465.0	340.8
40	10000	10000.7	191152.0	340.8
41	12500	12500.2	238704.0	340.5
42	15000	14999.9	286582.5	341.2
		•		
		•		
		•		
235	15000	14999.8	286385.0	342.1
236	12500	12500.1	238711.5	341.1
237	10000	10000.5	191027.0	341.5
238	7500	7499.8	143370.0	342.2
239	5000	5000.0	95873.5	340.8
240	2500	2499.4	48041.5	341.1
241	2500	2499.4	47801.5	341.4
242	5000	5000.0	95562.5	342.2
243	7500	7499.8	143291.5	341.6
244	10000	10000.5	191012.5	342.6
245	12500	12500.0	238750.0	343.4
246	15000	14999.8	286443.5	340.9
247	15000	14999.7	286429.5	341.4
248	12500	12500.1	238709.5	341.6
249	10000	10000.5	191193.0	341.9
250	7500	7499.8	143448.0	341.9
251	5000	5000.0	95569.0	342.1
252	2500	2499.4	47902.0	341.8

Figura 7.6: Eixo Y - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado

Seq	Z_Reference (nT)	Z_Applied (nT)	Z_Raw	Z_Temp
1	2500	2499.4	45748.0	338.0
2	5000	5000.0	91198.5	337.9
3	7500	7499.7	137032.5	338.1
4	10000	10000.4	182654.0	338.0
5	12500	12499.9	228329.0	338.8
6	15000	14999.6	274002.0	337.8
7	15000	14999.6	273843.0	338.1
8	12500	12499.9	228301.0	337.6
9	10000	10000.5	182672.5	338.4
10	7500	7499.7	136961.0	337.8
11	5000	5000.0	91284.0	338.1
12	2500	2499.4	45781.0	338.7
13	2500	2499.4	45754.0	338.1
14	5000	5000.0	91274.5	338.0
15	7500	7499.7	137004.5	338.8
16	10000	10000.5	182792.5	338.2
17	12500	12500.0	228247.0	337.1
18	15000	14999.7	273790.5	337.9
19	15000	14999.7	273882.0	338.0
20	12500	12500.0	228338.0	338.2
21	10000	10000.5	182741.0	338.2
22	7500	7499.8	136949.0	337.6
23	5000	5000.0	91356.0	337.9
24	2500	2499.4	45738.5	339.1
25	2500	2499.4	45681.5	337.5
26	5000	5000.0	91359.0	338.4
27	7500	7499.8	136882.0	337.6
28	10000	10000.5	182776.5	338.0
29	12500	12500.0	228388.0	338.0
30	15000	14999.7	273964.5	339.1
31	15000	14999.6	273838.0	337.8
32	12500	12500.0	228380.5	338.3
33	10000	10000.4	182671.5	338.2
34	7500	7499.7	137013.0	337.6
35	5000	5000.0	91351.0	337.5
36	2500	2499.4	45605.5	338.1
37	2500	2499.4	45955.0	338.4
38	5000	5000.0	91132.5	337.9
39	7500	7499.7	136904.5	338.9
40	10000	10000.4	182603.0	338.0
41	12500	12499.9	228312.5	338.1
42	15000	14999.6	274014.0	338.4
		•		
		•		
		•		
235	15000	14999.6	273922.0	338.9
236	12500	12499.9	228207.0	338.6
237	10000	10000.4	182743.0	339.1
238	7500	7499.7	137078.0	339.8
239	5000	5000.0	91317.5	338.8
240	2500	2499.4	45793.5	339.2
241	2500	2499.4	45742.5	339.1
242	5000	5000.0	91127.0	338.6
243	7500	7499.7	137106.5	338.6
244	10000	10000.4	182667.0	339.3
245	12500	12499.9	228330.5	339.9
246	15000	14999.6	273825.5	338.9
247	15000	14999.6	273903.5	339.3
248	12500	12499.9	228286.0	339.1
249	10000	10000.4	182496.5	339.0
250	7500	7499.7	137013.0	338.6
251	5000	5000.0	91319.5	339.2
252	2500	2499.4	45554.0	338.9

Figura 7.7: Eixo Z - Tabela do teste de caracterização da resposta do magnetômetro em função do campo magnético aplicado.

X_Reference (nT)	X_Applied_Avg (nT)	X_Raw_Avg	X_Temp_Avg
2500	2500	45781	362
5000	5000	91512	362
7500	7500	137253	362
10000	10001	182951	362
12500	12501	228647	362
15000	15001	274324	362

Figura 7.8: Eixo X - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.

X_Reference (nT)	Y_Applied (nT)	Y_Raw_Avg	Y_Temp_Avg
2500	2499	47905	341
5000	5000	95701	341
7500	7500	143371	341
10000	10001	191048	341
12500	12500	238731	341
15000	15000	286395	341

Figura 7.9: Eixo Y - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.

X_Reference (nT)	Z_Applied (nT)	Z_Raw_Avg	Z_Temp_Avg
2500	2499	45689	338
5000	5000	91323	338
7500	7500	136978	338
10000	10000	182664	339
12500	12500	228275	339
15000	15000	273933	339

Figura 7.10: Eixo Z - Valores nominais do campo magnético de referência e valores realmente aplicados.

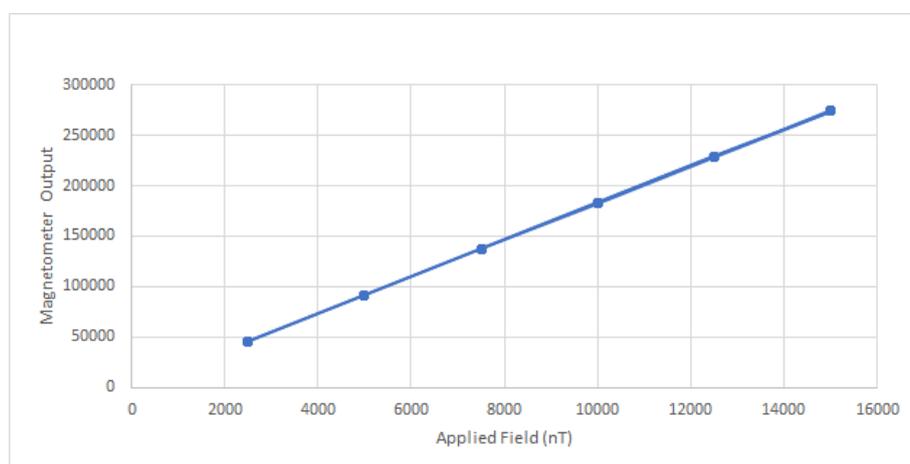


Figura 7.11: Eixo X - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.

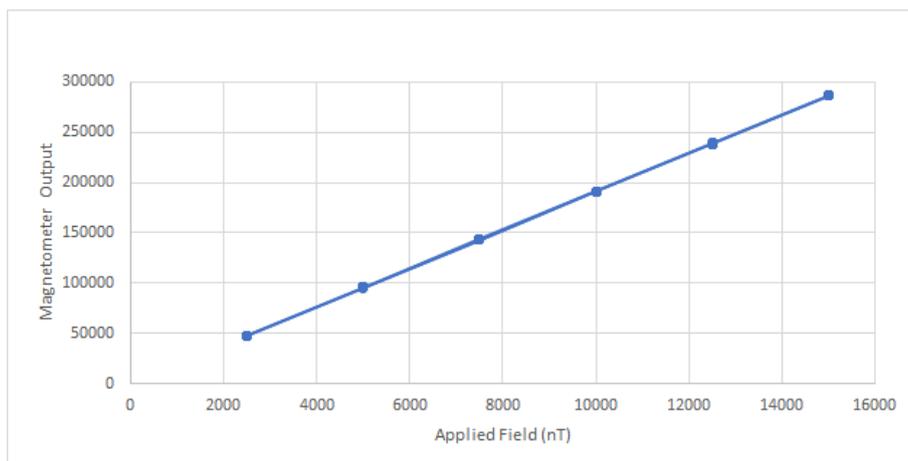


Figura 7.12: Eixo Y - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.

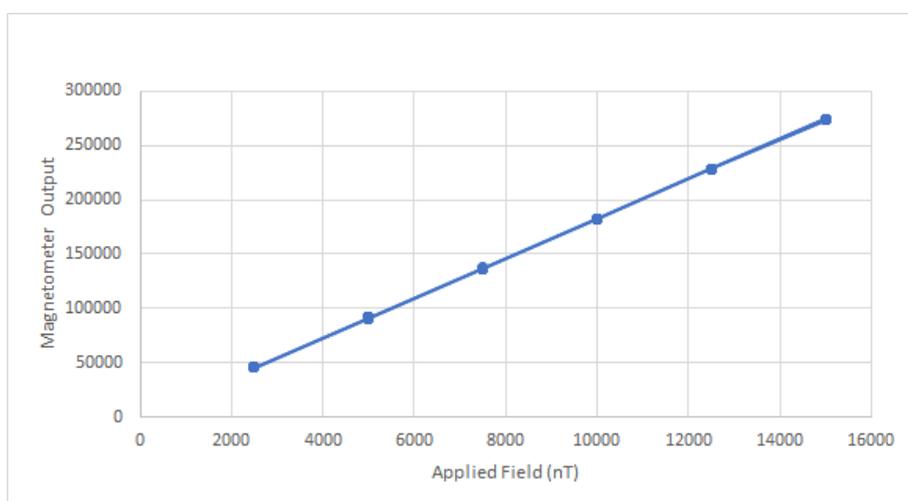


Figura 7.13: Eixo Z - Curva de resposta do magnetômetro de teste ao campo magnético de referência aplicado.

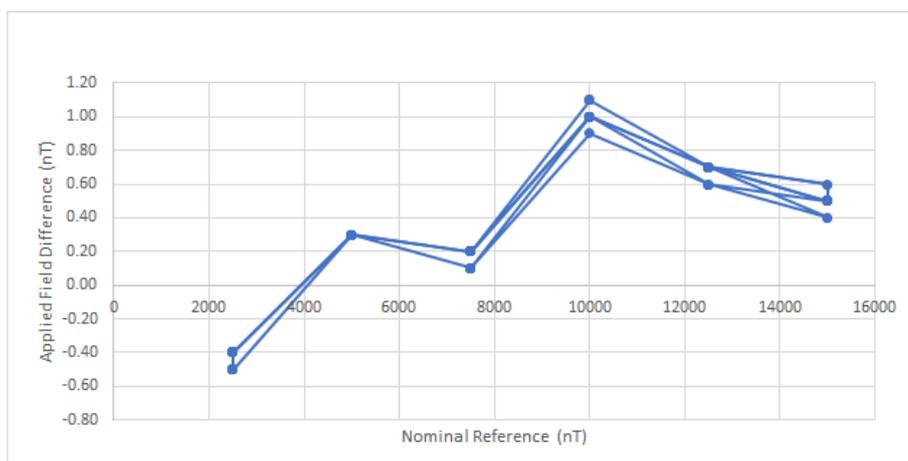


Figura 7.14: Eixo X - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.

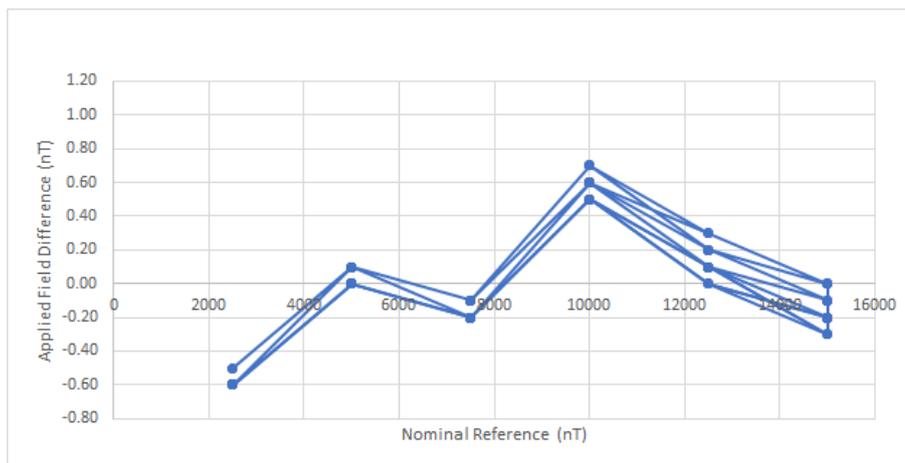


Figura 7.15: Eixo Y - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.

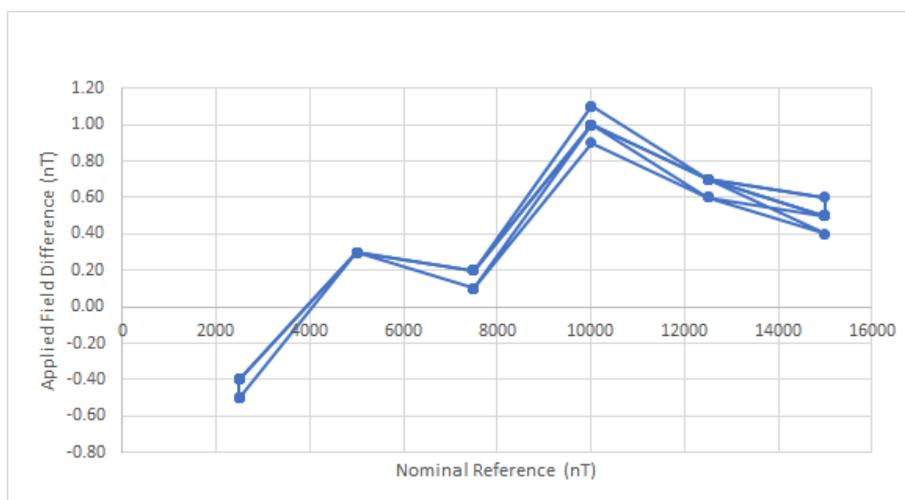


Figura 7.16: Eixo Z - Diferença entre o valor do campo magnético nominal de referência e o campo magnético efetivamente aplicado.

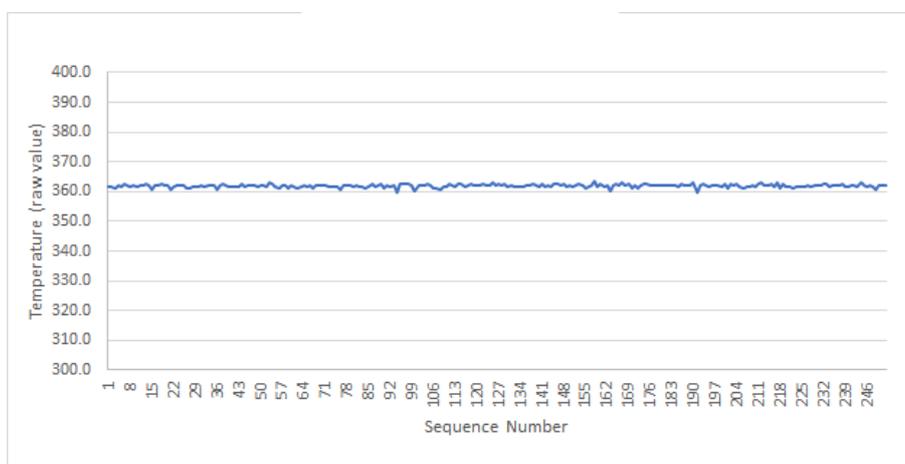


Figura 7.17: Eixo X - Variação da temperatura durante medição em campo nulo.

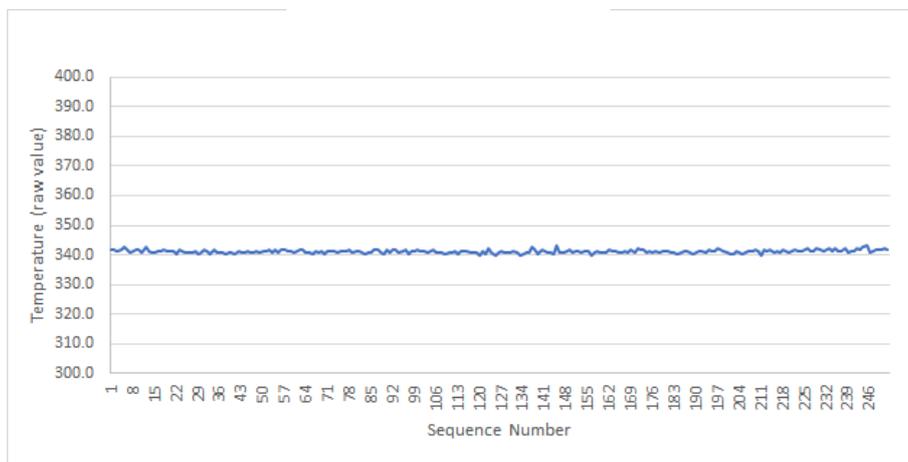


Figura 7.18: Eixo Y - Variação da temperatura durante medição em campo nulo

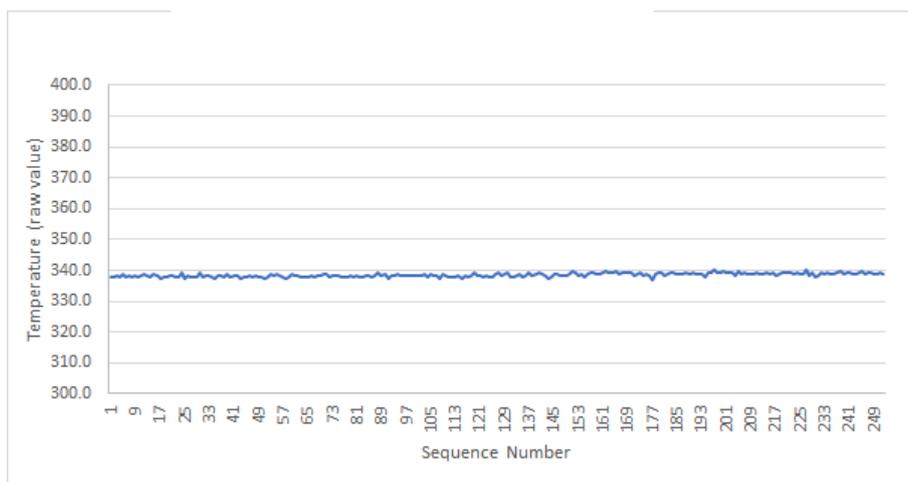


Figura 7.19: Eixo Z - Variação da temperatura durante medição em campo nulo.

Os gráficos de temperatura apresentados nas figuras (7.17),(7.18) e (7.19) mostram os valores em dado bruto gerado pela saída digital do magnetômetro durante os testes. Estes valores são mantidos em valor bruto sem correção de unidade, já que para o propósito de ajuste dos dados esta conversão é desnecessária e se torna fonte de possíveis erros adicionais. De qualquer forma o valor de temperatura em graus Celsius, a partir do valor bruto de resposta dado pela medição realizada pelo sensor interno do magnetômetro de teste, por ser estimado pela seguinte aproximação linear (ver tabela apresentada na figura 7.20):

$$T = 0.1 \cdot T_{raw} - 10 \quad (7.1)$$

Onde T_{raw} é o valor bruto (gerado pela saída digital do circuito de medição de temperatura do magnetômetro) correspondente à temperatura T em graus Celsius.

Este ajuste foi realizado comparando os dados brutos gerados pela saída digital do magnetômetro de teste com as medições de um termômetro padrão colocado próximo ao magnetômetro, conforme a tabela apresentada na figura (7.20), ou seja, os dados brutos são os valores correspondentes de temperatura na escala digital dados pela saída do conversor analógico/digital interno ao circuito do magnetômetro de teste, onde a correspondência é dada por esta tabela.

Este ajuste de temperatura (dado bruto x valor em graus Celsius) não tem compromisso com a qualidade final da medição, sendo apresentado apenas para melhor compreensão da faixa de operação durante os testes.

A partir destes dados, pode ser verificado que a variação de temperatura ao longo dos ciclos de calibração para os eixos X,Y e Z permaneceu abaixo de +1% em relação ao valor médio para cada um dos eixos.

7.3 Determinação dos Parâmetros de Calibração

A partir dos valores encontrados nos testes de caracterização para campo magnético mínimo e nos testes de caracterização para campo magnético variável os parâmetros de calibração podem ser estimados. Conforme descrito no capítulo 3, os parâmetros são estimados por regressão linear.

Temp_Reference (°C)	Temp_Raw
4.2	143
12.0	220
23.8	331
39.0	489

Figura 7.20: Relação de resposta do sensor interno de temperatura.

	X_Temp_Raw	Y_Temp_Raw	Z_Temp_Raw	X_Temp (°C)	Y_Temp (°C)	Z_Temp (°C)
Média	362	341	338	26.2	24.1	23.8
Máximo	363	343	340	26.3	24.3	24.0
Mínimo	360	340	337	26.0	24.0	23.7

Figura 7.21: Temperaturas média, máxima e mínima durante medição em campo nulo - valores em dado bruto não convertidos para °C.

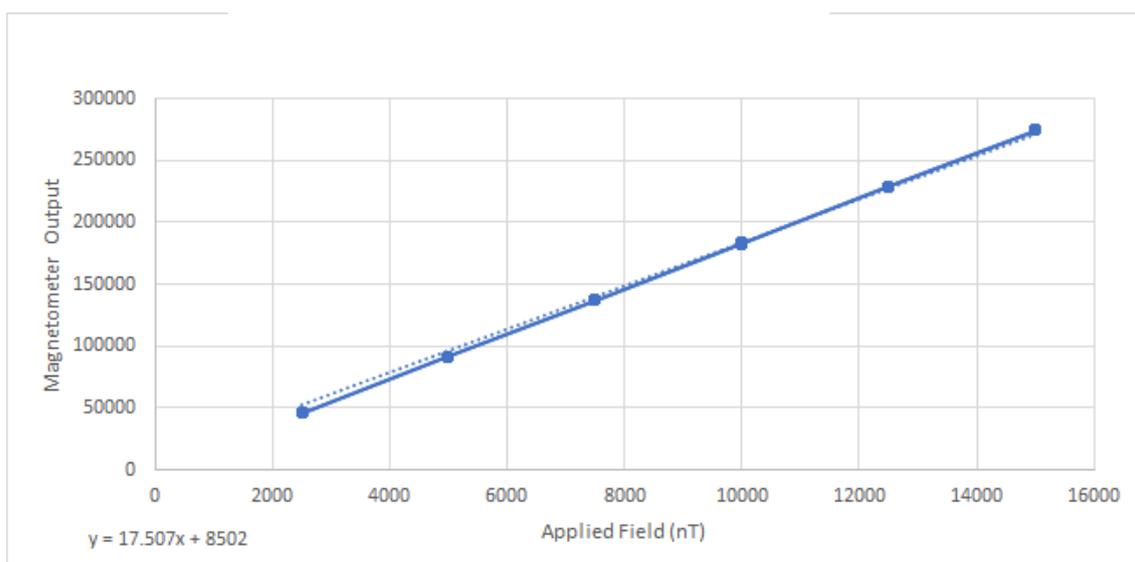


Figura 7.22: Eixo X - Curva de resposta do magnetômetro.

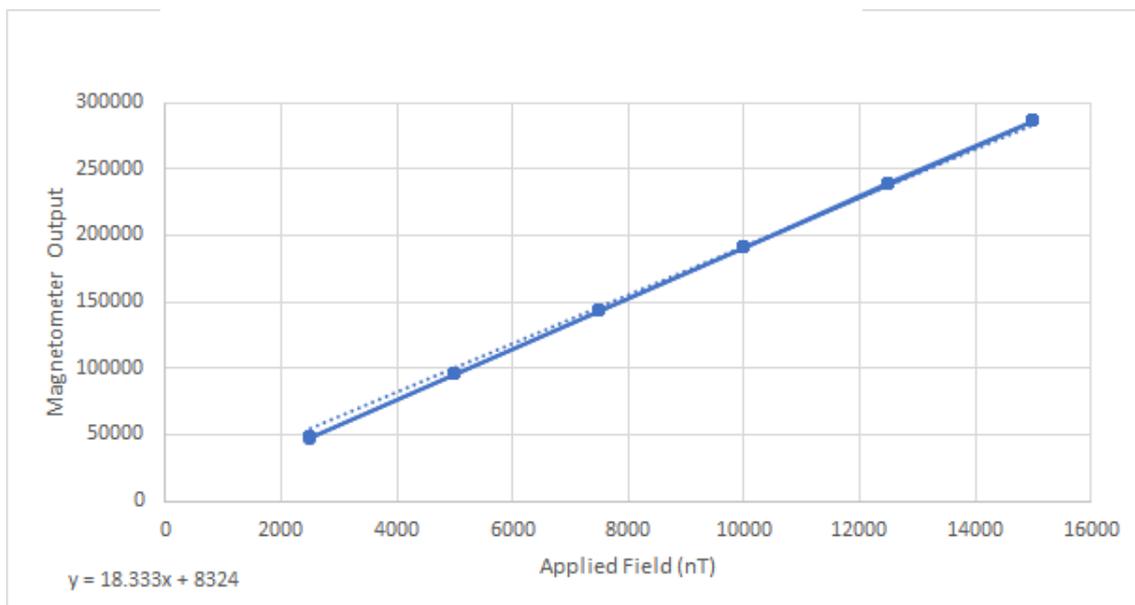


Figura 7.23: Eixo Y - Curva de resposta do magnetômetro.

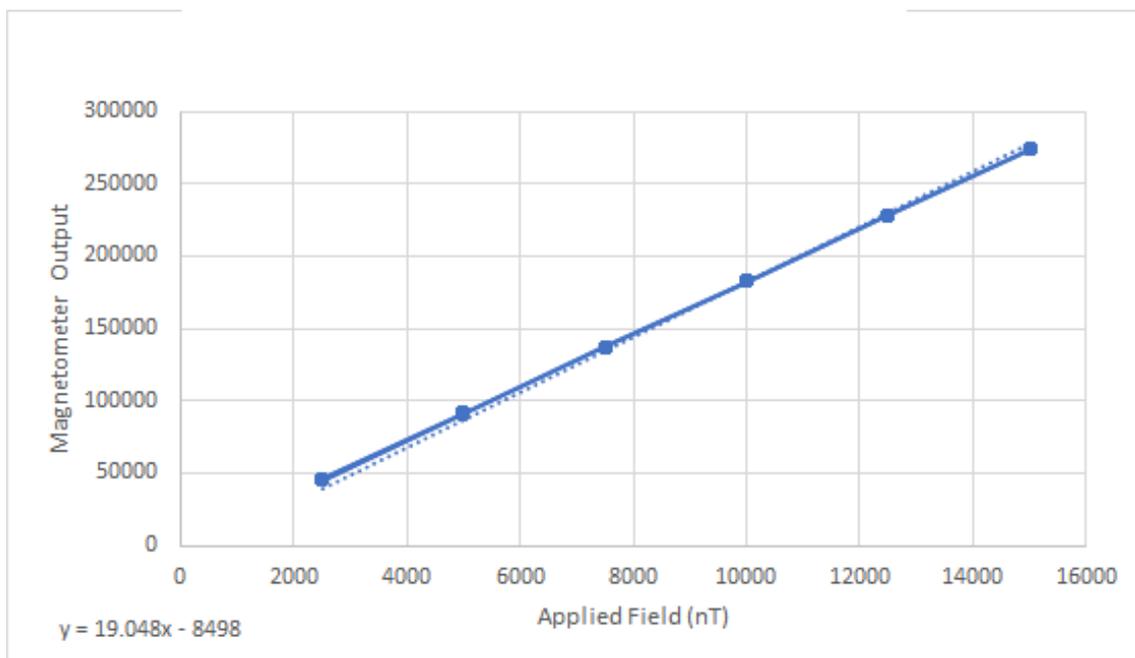


Figura 7.24: Eixo Z - Curva de resposta do magnetômetro.

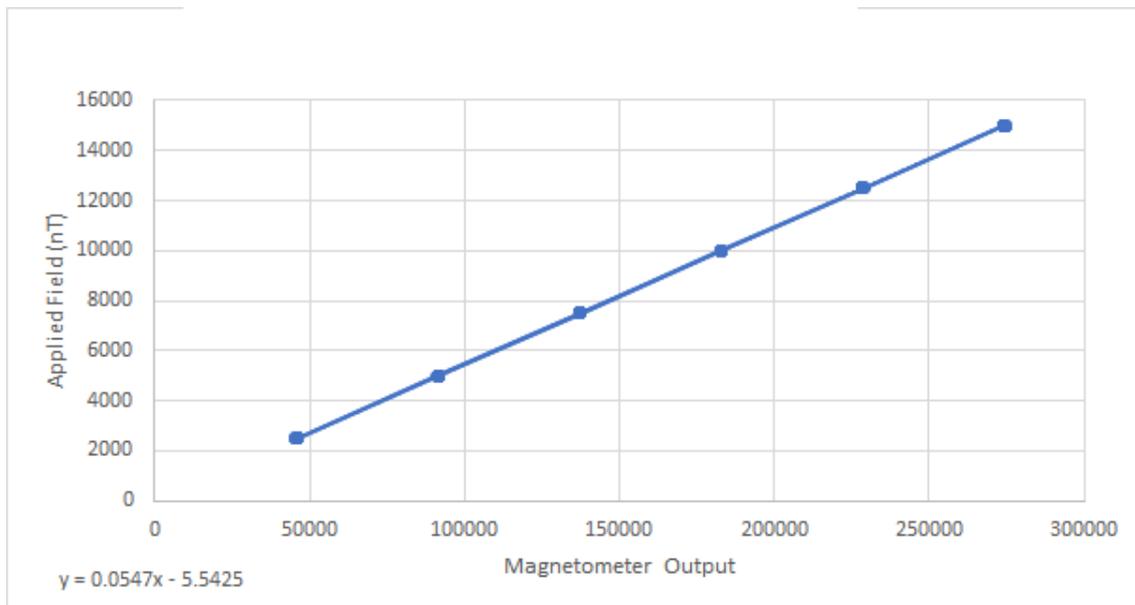


Figura 7.25: Eixo X - Curva de ajuste linear do magnetômetro.

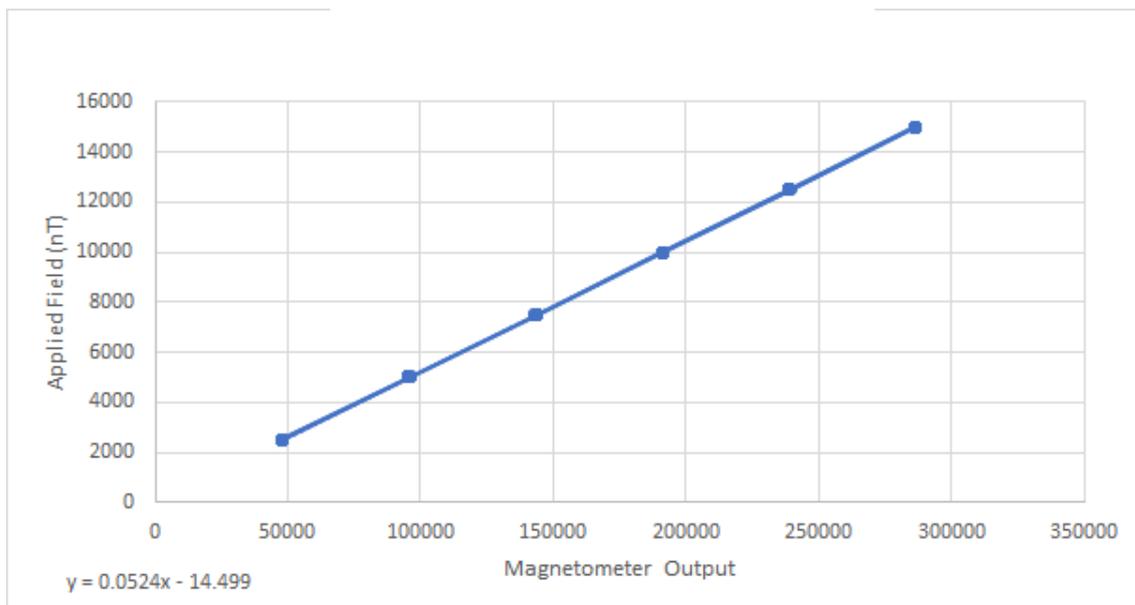


Figura 7.26: Eixo Y - Curva de ajuste linear do magnetômetro.

7.4 Testes de Longa Duração

Os testes de longa duração tem por objetivo avaliar o desempenho do magnetômetro ao longo de vários dias, submetido às condições reais de variação de temperatura e variação do campo geomagnético. Estes testes são comparativos, portanto as medições realizadas pelo magnetômetro de teste são comparadas com as medições de um magnetômetro de referência, calibrado e instalados próximos o suficiente para medirem aproximadamente a mesma intensidade de campo magnético total e distantes o suficiente para não causarem interferência mútua e em uma região preferencialmente com baixa anomalia magnética.

O Observatório Magnético de Vassouras destina-se ao estudo do campo magnético da Terra realizando, através do seus magnetômetros, medições contínuas do campo magnético terrestre. Este observatório faz parte da rede global de observatórios INTERMAGNET, que define os padrões de qualidade e orienta sobre instrumentação e aquisição de dados. Portanto este observatório é uma local ideal para testes comparativos entre magnetômetros, pela qualidade e confiabilidade das medições ininterruptas. Este mfoi portanto o local utilizado para os testes de longo período deste projeto. A Tabela 7.1 apresenta alguns dados do Observatório Magnético de Vassouras.

Tabela 7.1: Dados do sistema de referência INTERMAGNET para o Observatório Magnético de Vassouras.

ID da Estação	VSS
Localização	Vassouras
Co-latitude	112.4°
Longitude	316.35°
Elevação	457 m
Orientação	HDZF
Instrumento de Medição de Variação	Magnetômetro de Núcleo Saturado (Fluxgate)
Instrumento de Medição Absoluta	Magnetômetro de Precessão de Próton

O Intermagnet (International Real-time Magnetic Observatory Network - Rede Internacional de Observatório Magnético em Tempo Real) é um consórcio de institutos que operam magnetômetros terrestres que registram o campo geomagnético. Cada observatório magnético interligado à rede INTERMAGNET deve disponibilizar séries temporais de dados de resolução de 1 minuto. Dados brutos, não processados, são gerados em tempo-real e dados consolidados, que são representações precisas do campo geomagnético e sua dependência temporal, são gerados diariamente. Alguns observatórios, como é o caso do Observatório Magnético de Vassouras, são

capazes de gerar dados de resolução de 1 segundo.

Um observatório magnético INTERMAGNET fornece valores de campo magnético de um minuto medidos por um magnetômetro vetorial triaxial e um magnetômetro escalar, todos com uma resolução de 0.1 nT. As medições realizadas pelo magnetômetro vetorial devem ser ajustadas pela melhor linha de base disponível (ajuste de offset).

O Observatório Magnético de Vassouras, por ser um Observatório Magnético INTERMAGNET deve atender aos seguintes requisitos mínimos sumarizados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Requisitos para Magnetômetros Vetoriais do INTERMAGNET.

Resolução	0.1nT
Faixa Dinâmica	6000 nT (8000 nT para latitudes auroral e equatorial)
Banda Passante	contínuo a 0.1 Hz
Taxa de Amostragem	1 Hz (1 segundo)
Estabilidade Térmica	0.25 nT/°C
Estabilidade de Longo Período	5 nT/ano

Além das medições de referência realizadas pelos magnetômetros da rede INTERMAGNET, foram utilizadas as medições realizadas por outros magnetômetros comerciais como comparação: um magnetômetro vetorial triaxial CXM539, fabricado pela Crossbow, e um magnetômetro vetorial triaxial LEMI-417, fabricado pela LEMI sensors.

7.4.1 Instalação dos Magnetômetros no Observatório Magnético de Vassouras

As figuras 7.28, 7.30 e 7.29 apresentam respectivamente os magnetômetros CXM539, LEMI-417 e ON-LDSM (magnetômetro de teste) nos locais de teste no Observatório de Vassouras. Os magnetômetros CXM539 e LEMI-417 foram montados na mesma base em momentos distintos, portanto não há testes com ambos operando simultaneamente.

Os magnetômetros comerciais foram instalados ao lado do magnetômetro de teste e a uma distância maior, devido à maior criticidade em caso de interferência, do local dos magnetômetros da rede INTERMAGNET. A figura 7.31 apresenta a

posição aproximada dos instrumentos instalados na área do Observatório Magnético de Vassouras, além da posição da sala onde se encontram o computador de aquisição dos dados da rede INTERMAGNET e do computador instalado temporariamente para captura e transmissão dos dados do magnetômetro de teste e os demais magnetômetros para comparação.

Em função da dificuldade de alinhamento dos magnetômetros, instalados em distintas bases, em relação aos eixos X e Y, foram escolhidas como referência apenas medições com relação ao eixo Z, paralelo ao vetor gravitacional e portanto de mais fácil alinhamento. Tendo como premissa que os demais eixos do sensor em teste são suficientemente ortogonais, medições para os outros eixos podem também ser realizadas, sendo necessário para isto a devida rotação do sensor para alinhamento do eixo (X, Y ou Z) que se pretende medir com o eixo Z local.

7.4.2 Programas Computacionais para Captura e Armazenamento de Dados

Tanto o magnetômetro de teste quanto os magnetômetros comerciais, utilizados neste teste comparativo, são magnetômetros digitais com transmissão dos dados via comunicação serial. Estes magnetômetros foram interligados a um computador com conversores serial/USB e software capaz de armazenar os dados provenientes das leituras e transmiti-los via INTERNET para um servidor de dados com possibilidade de acesso remoto.

A figura 7.32 apresenta uma imagem das telas do programa utilizado para captura e armazenamento das medições dos magnetômetros via comunicação serial. A tela da esquerda mostra um trecho de captura de dados do magnetômetro de teste (ON-LDSM) e a tela da direita apresenta um trecho de captura da comunicação serial do magnetômetro CXM539. Como ambos os magnetômetros não possuem recursos de transmissão da informação da hora atual, os dados são armazenados utilizando-se o registro de data e hora gerado pelo programa de captura a partir da hora fornecida pelo computador onde o programa está em operação. Medições mais precisas, para melhor correlacionar os eventos no tempo, requerem outras referências de data e hora, tais como relógios de precisão interligados ao sistema ou atualização geradas a partir de data-hora fornecida por sistema GPS.

Os programas computacionais, utilizados neste teste comparativo, com o intuito específico de capturar via comunicação serial, armazenar e transmitir os dados de

medição dos magnetômetros via INTERNET são produtos comerciais que não foram desenvolvidos especialmente para este projeto. Todos os demais programas computacionais foram desenvolvidos especificamente para este projeto.

As medições realizadas pelos magnetômetros interligados ao computador de teste são capturadas via comunicação serial pelo software de aquisição de dados e as medições do magnetômetro de referência do Observatório Magnético de Vassouras obtidas via a rede INTERMAGNET.

7.4.3 Programa Computacional para Interpretação e Tratamento de Dados de Magnetômetros

Para que os dados obtidos dos magnetômetros interligados ao computador de teste e as medições do magnetômetro de referência do Observatório Magnético de Vassouras (INTERMAGNET) possam ser devidamente comparados, é necessário um conjunto de tratamentos que incluem interpretar as informações gravadas, filtrar onde for necessário e correlacionar os eventos no tempo. Tanto o formato dos arquivos, quanto a taxa de aquisição dos dados e a forma como os intervalos de dados são gravados são diferentes. Neste caso, para permitir lidar com este grande volume de dados foram criados programas computacionais específicos para este projeto

A figura 7.33 apresenta uma imagem do programa para interpretação e tratamento de dados de magnetômetros desenvolvido para este trabalho. Este programa permite realizar as seguintes atividades principais:

- Selecionar e ler os arquivos de registro dos diferentes tipos de magnetômetros (INTERMAGNET, LDSM, CXM539 e LEMI);
- Interpretar os diferentes arquivos de registro, interligá-los em uma sequência temporal e convertê-los em um formato comum para cada eixo de medição;
- Sincronizar os intervalos de medição, incluindo a correção de fuso horário do registro;
- Ajustar as diferentes taxas de aquisição de dados, compactando os dados quando necessário, para o formato de uma medição por segundo;
- Filtrar os dados de medição para remover dados espúrios e para tratamento do ruído;
- Opcionalmente calcular os parâmetros de calibração do magnetômetro de teste com relação ao magnetômetro de referência por meio de ajuste linear;

- Gravar os dados obtidos.

Um vez selecionados os arquivos de dados de referência e dados brutos dos magnetômetros a serem interpretados e tratados, o eixo de referência (X,Y ou Z) e o intervalo de tempo de interesse, o programa realiza a análise dos dados e gera dois tipos de arquivo como resultado. Um arquivo é gerado com os dados de medição, incluindo intensidade de campo magnético para o eixo selecionado de cada um dos magnetômetros e os dados de temperatura correspondentes para cada intervalo. Os dados deste arquivo são apresentados mantendo a taxa de aquisição de uma medição por segundo, ou seja, cada linha do arquivo apresenta a média das medições no intervalo de um segundo. Um outro arquivo é gerado com os coeficientes para cada um dos parâmetros do ajuste linear do eixo selecionado.

O ajuste linear utilizado leva em consideração também a variação de temperatura, portanto são estimados três coeficientes de regressão linear conforme o formato abaixo:

$$B = C_0 + B_{raw} * (T - T_0) * C_1 + B_{raw} * C_2 + (T - T_0) * C_3 \quad (7.2)$$

Onde T_0 é a temperatura da calibração realizada em laboratório.

7.4.4 Programa Computacional para Geração dos Gráficos Comparativos dos Magnetômetros

Como o processamento realizado pelo Programa Computacional para Interpretação e Tratamento de Dados de Magnetômetros é uma atividade que consome um tempo relativamente longo, especialmente para intervalos de medição estendidos, foi criado um programa computacional especialmente para ler os arquivos gerados pelo primeiro programa e apresenta-los graficamente. Além de ler os arquivos de medição selecionados, o programa também pode aplicar os coeficientes de ajuste linear do arquivo de parâmetros de calibração. O programa permite selecionar os parâmetros de calibração do mesmo teste, ou de um outro teste para comparação.

O programa também permite a gravação das imagens dos diversos gráficos gerados, para que possam ser utilizados posteriormente.

A figura 7.34 apresenta uma imagem do programa desenvolvido para geração dos gráficos comparativos dos magnetômetros aqui descrito.

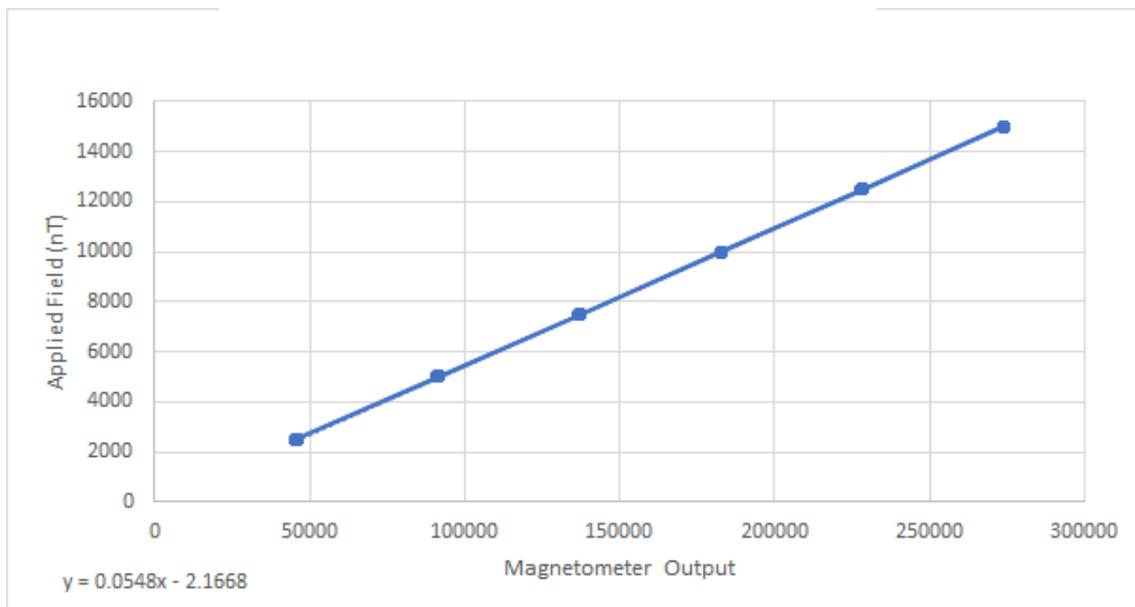


Figura 7.27: Eixo Z - Curva de ajuste linear do magnetômetro.



Figura 7.28: Magnetômetro CXM539.



Figura 7.29: Magnetômetro LEMI-417.



Figura 7.30: Magnetômetro ON LDSM.



Figura 7.31: Posição relativa dos locais de montagem dos instrumentos utilizados nas medições de longo período no Observatório Magnético de Vassouras.

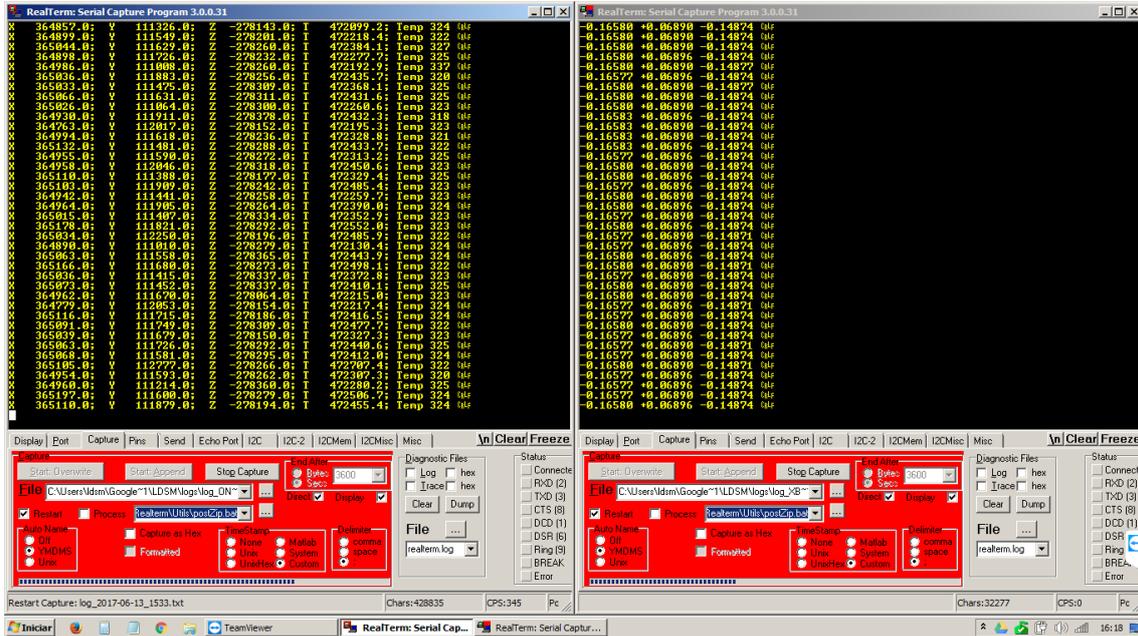


Figura 7.32: Programa utilizado para captura e armazenamento das medições dos magnetômetros via comunicação serial.

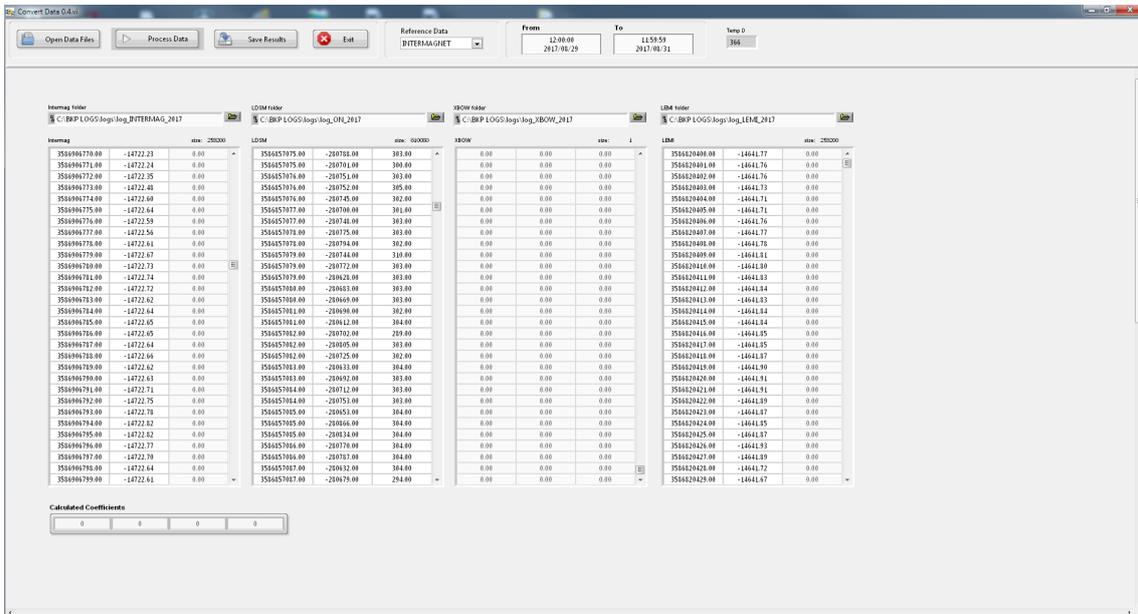


Figura 7.33: Programa para Interpretação e Tratamento de Dados de Magnetômetros.

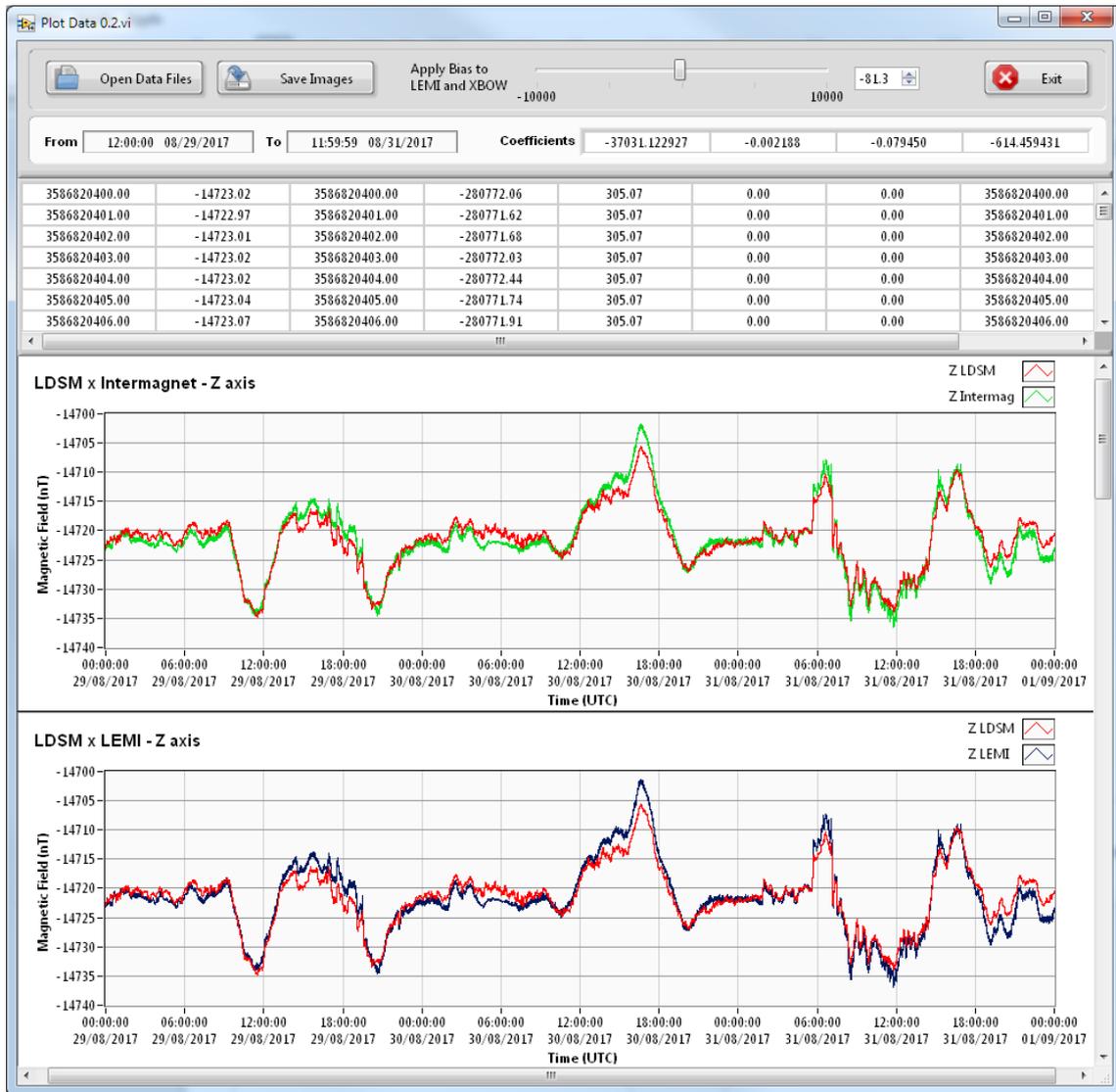


Figura 7.34: Programa para Geração dos Gráficos Comparativos dos Magnetômetros.

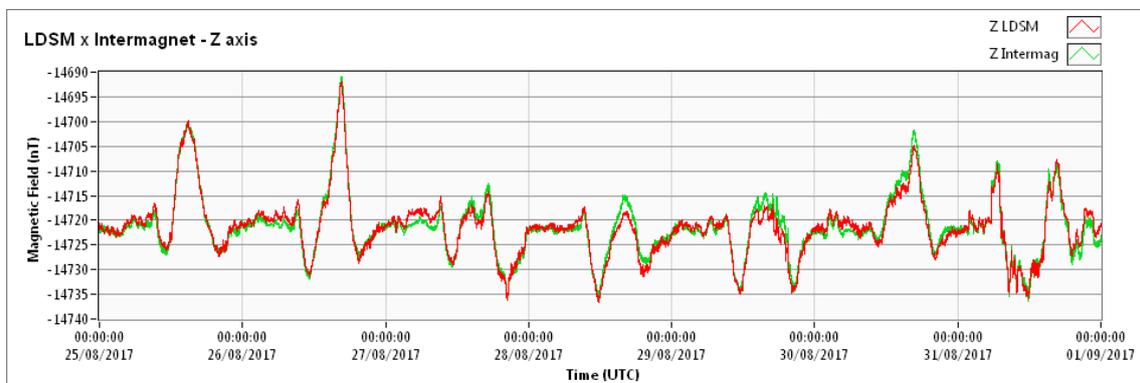


Figura 7.35: Exemplo de Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Desenvolvido no LDSM e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.

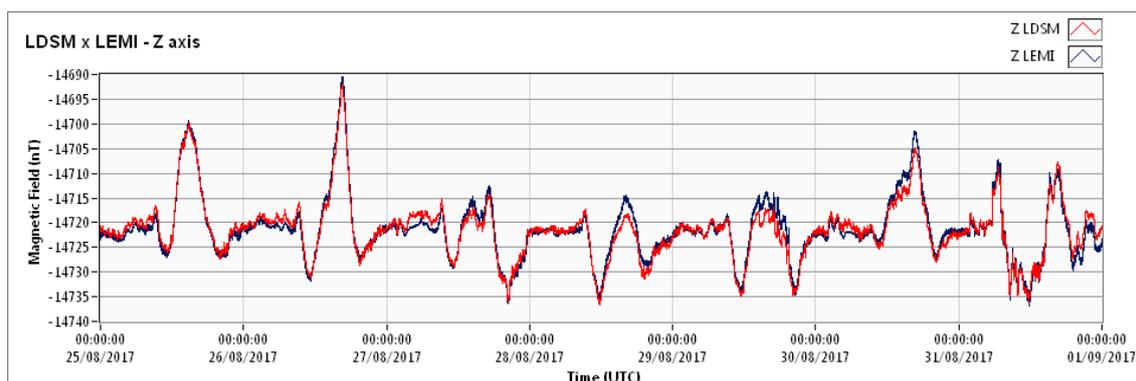


Figura 7.36: Exemplo de Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.

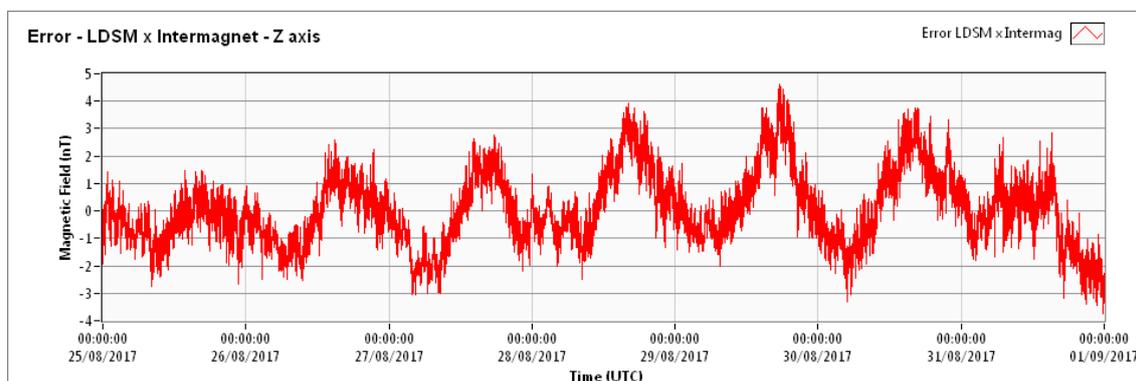


Figura 7.37: Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Desenvolvido no LDSM e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.

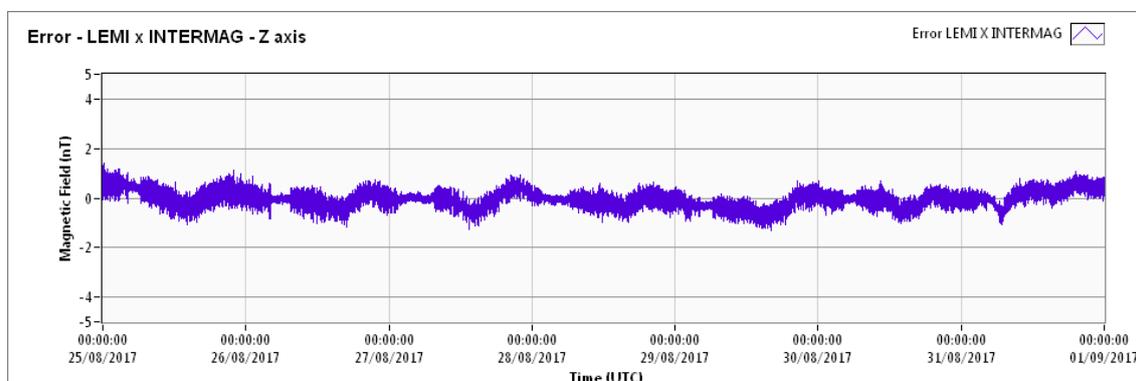


Figura 7.38: Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.

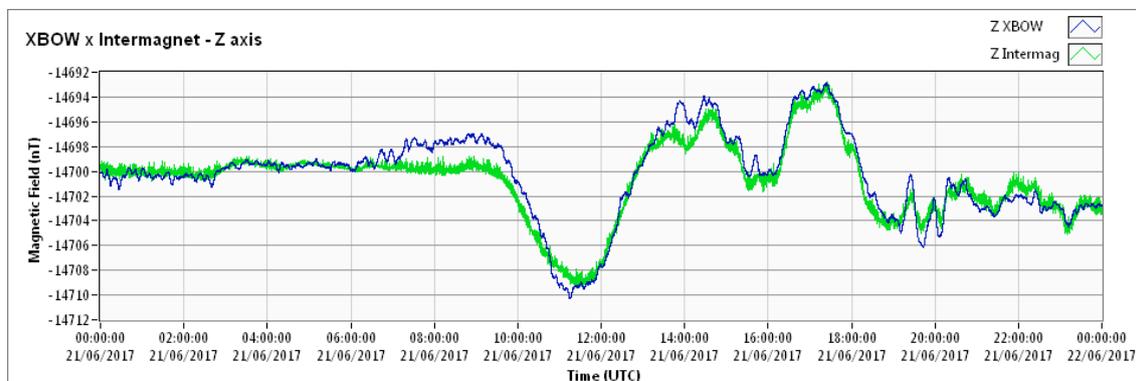


Figura 7.39: Exemplo de Gráfico da Diferença de Medição entre Magnetômetro Comercial CrossBow CXM539 e Magnetômetro de Referência INTERMAGNET.

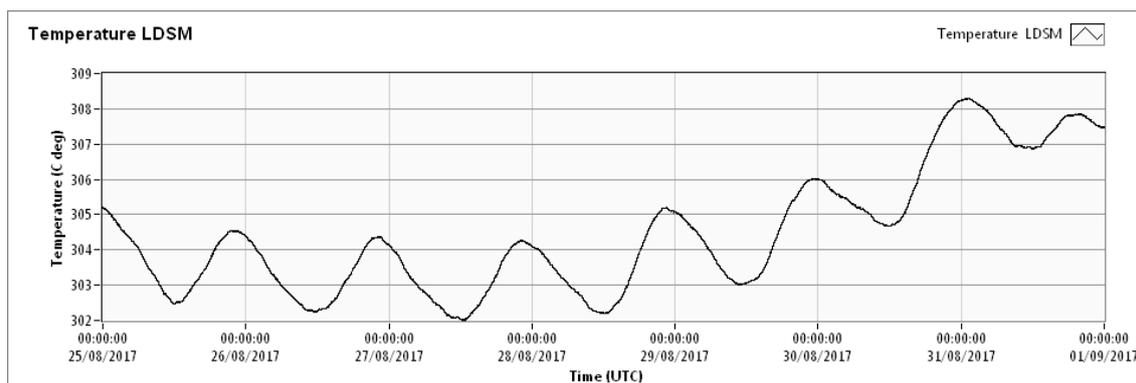


Figura 7.40: Gráfico da Variação de Temperatura Medida pelo Magnetômetro Desenvolvido pelo LDSM (Valores Brutos) Durante Teste de Longa Duração.

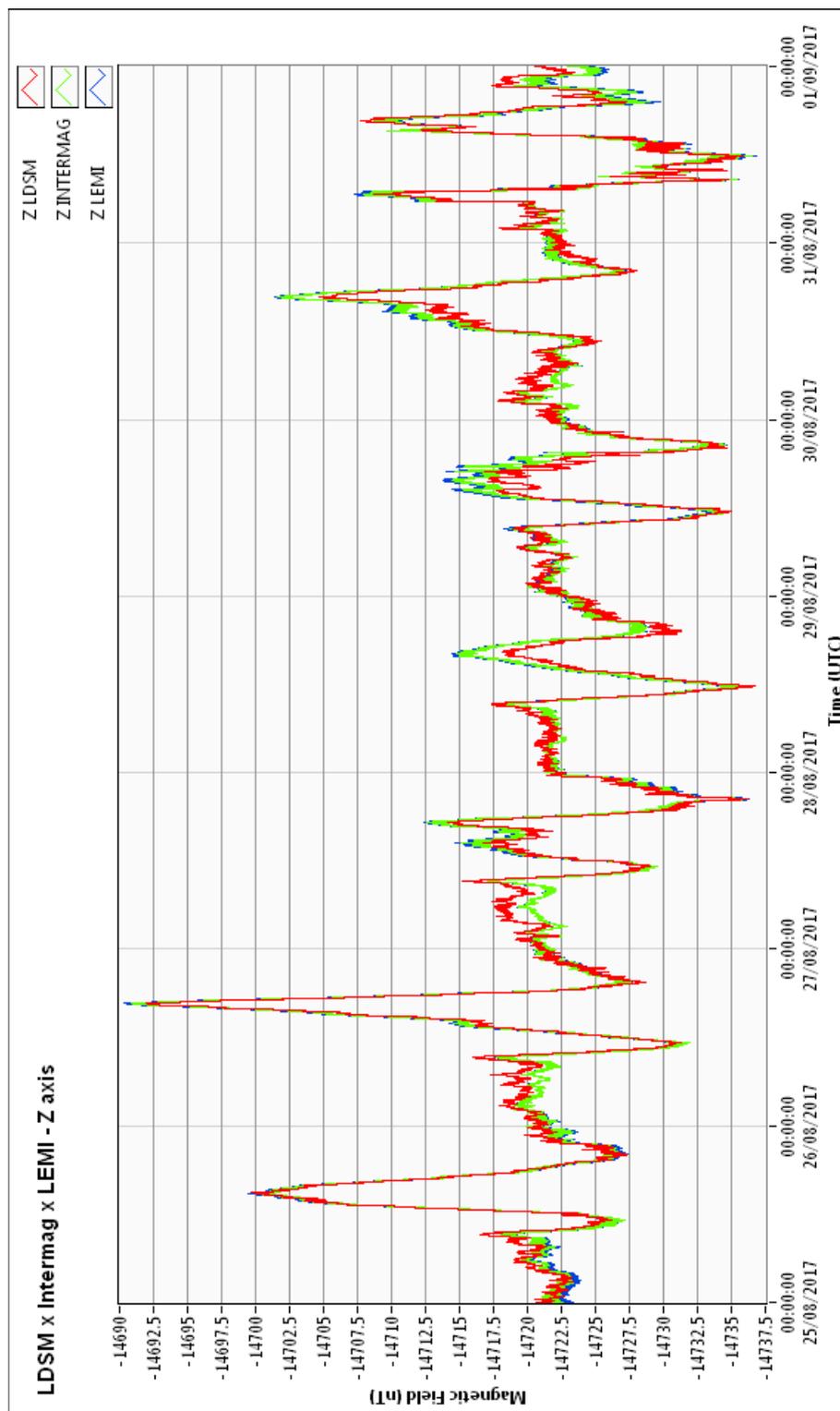


Figura 7.41: Gráfico Resultante da Medição de Longo Período Comparativa entre Magnetômetro Desenvolvido pelo LDSM, Magnetômetro Comercial LEMI-417 e Referência INTERMAGNET.

Capítulo 8

Conclusão

Neste trabalho foram desenvolvidos, construídos e testados um conjunto de novos procedimentos, sistemas eletrônicos e ferramentas computacionais que permitiu o teste e a calibração ativa de magnetômetros de núcleo saturado em condições de assimetria e não homogeneidades do campo magnético local e sob condições limitadas de interferência eletromagnética.

Além do benefício direto de ter sido desenvolvida uma sistemática própria que permitiu a calibração de diferentes tipos de magnetômetros de núcleo saturado, um dos maiores benefícios da aplicação do trabalho aqui desenvolvido é a capacidade de automatizar calibrações. Com esta automação, o sistema desenvolvido tende a apresentar resultados mais consistentes, já que elimina erros humanos que estão normalmente presentes nas atividades repetitivas de calibrações manuais.

Diferentes magnetômetros possuem saída digital ou analógica e com qualquer uma destas opções, o sistema desenvolvido permitiu a automação completa do processo de calibração. As calibrações puderam ser configuradas para testes com múltiplas medições de referência em laboratório e para realizar avaliações de longo período que normalmente demandariam um grande esforço humano e seriam ainda mais demoradas. Para os magnetômetros colocados em teste, a variação do campo magnético de referência e as correspondentes medições foram totalmente controladas pelo computador, não sendo necessária nenhuma manipulação neste intervalo.

Os programas computacionais desenvolvidos facilitaram significativamente o trabalho de calibração de magnetômetros de núcleo saturado e se mostraram uma importante ferramenta para identificação das diferenças entre distintos magnetômetros e seu comportamento em função da variação de temperatura.

O método aplicado permitiu o desenvolvimento de uma estrutura de caracte-

rização e calibração de magnetômetros em escala, utilizando instrumentos já existentes no LDSM e demonstrando a viabilidade de utilizar os sistemas desenvolvidos para a modernização de outros laboratórios.

Ruídos locais de alta intensidade, em geral de causas antropomórficas, como as encontradas no atual laboratório LDSM do Observatório Nacional, onde se encontram diversas fontes de interferência artificial, como a utilização de equipamentos eletromagnéticos e a passagem de veículos automotores nas proximidades, mostraram ainda ser um desafio a ser evitado.

Mesmo considerando que o sistema aqui desenvolvido tenha sido capaz de minimizar através de ajuste estatístico a influência dos erros causados por medições espúrias e ruidosas, já que fez uso do grande número de medições que o sistema automatizado permite, este esforço computacional se mostra infrutífero quando se há a possibilidade de simplesmente se realizar medições livres destas perturbações artificiais. Um local que se mostrou bastante propício para as medições é o Observatório Nacional de Vassouras, local utilizado para as medições de longa duração. Desta forma o sistema se mostrou bastante útil mesmo que não seja instalado no interior de um laboratório que possui paredes com blindagem magnética (blindagem esta similar aos dispositivos citados no capítulo 5.2).

Os testes de longa duração mostraram a importância das medições comparativas viabilizadas por um sistema automático. As diferenças entre os instrumentos foram bem evidentes e os dados obtidos podem ser fonte para diversos trabalhos futuros. Esta se mostrou talvez a principal ferramenta para aqueles que pretendem desenvolver magnetômetros de alta precisão, já que permitiria a comparação com instrumentos com qualidade similar a que se pretende alcançar.

Para viabilizar o LDSM como futuro local ideal para calibrações desta natureza, considerando as atuais fontes de interferência artificial causadas por diversas outras atividades realizadas nas proximidades, é recomendado o desenvolvimento e instalação de algum tipo de blindagem magnética apropriada.

8.1 Perspectivas Futuras

A partir desta dissertação, novos trabalhos e pesquisas poderão ser desenvolvidos em assuntos relacionados à calibração de magnetômetros de núcleo saturado e o desenvolvimento de novos laboratórios de calibração e verificação, através da utilização

direta do método e sistemas aqui apresentados.

As variações de sinal de medição em função da variação de temperatura e as discrepâncias encontradas nas medições dos diferentes magnetômetros utilizados nos testes de longa duração são excelente fonte de pesquisa futura para melhor compreensão dos fenômenos e características de cada instrumento.

A melhor compreensão das características destes magnetômetros permite naturalmente o desenvolvimento de magnetômetros cada vez melhores.

Além de contribuir para o desenvolvimento da cultura da calibração dos instrumentos geomagnéticos, este trabalho também se torna importante ao possibilitar uma melhor compreensão das limitações dos instrumentos utilizados em campo.

Referências Bibliográficas

- ACUÑA, M. H., 2002, “Space-based magnetometers”, *Review of Scientific Instruments*, v. 73, n. 11, pp. 3717. ISSN: 00346748. doi: 10.1063/1.1510570.
- BENYOSEF, L. C. D. C., 2008, “Optimization of the Magnetic Properties of Materials for Fluxgate”, *Materials Research*, v. 11, n. 2, pp. 145–149.
- BENYOSEF, L. C. C., WIERMANN, A., ROBERTO, J., et al., 2013, “MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO, DE ALTA RESOLUÇÃO, PARA APLICAÇÃO NAVAL SUBMERSA”, pp. 80–91.
- BRAUER, P., RISBO, T., MERAYO, J., et al., 2000, “Fluxgate sensor for the vector magnetometer onboard the ‘Astrid-2’ satellite”, *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 81, n. 1-3, pp. 184–188. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00084-9.
- CERMAN, A., KUNA, A., RIPKA, P., et al., 2005, “Digitalization of highly precise fluxgate magnetometers”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 121, n. 2, pp. 421–429. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/j.sna.2005.03.053.
- CSONTOS, A., HEGYMEGI, L., HEILIG, B., 2007, “Temperature Tests on Modern Magnetometers”, v. 99, n. 398.
- ENGELTER, A., 1986, “A fluxgate magnetometer with a metallic glass core”, *IEEE transactions on magnetics*, v. 22, n. 4, pp. 299–300.
- FORSTER, F., 1955, “A method for the measurement of DC field differences and its application to nondestructive testing”, *Nondestruct. Test*, v. 13, pp. 31.
- GERMAIN, C., 1963, “Bibliographical review of the methods of measuring magnetic fields”, *Nuclear Instruments and Methods*, v. 21, pp. 17–46.
- JANKOWSKI, J., SUCKSDORFF, C., 1996, “Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice”, p. 238.
- KELLY, J. M., 1951, “Magnetic field measurements with peaking strips”, *Review of Scientific Instruments*, v. 22, n. 4, pp. 256–258.

- KLIMOVICH, E., KOREPANOV, V., POSIO, P., et al., 2007, “Accredited Vector Magnetometer Calibration Facility”, v. 43, pp. 59–76.
- KOIKE, K., NAKAJIMA, S., SHIMIZU, Y., 1990, “On the Accuracy of Flux-Gate Magnetometers: Calibration Experiment”, *Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, v. 24, n. 1, pp. 1–13.
- MACHARET, D. G., PEREZ-IMAZ, H. I. A., REZECK, P. A. F., et al., 2016, “Autonomous Aeromagnetic Surveys Using a Fluxgate Magnetometer”, *Sensors*, v. 16, pp. 1–19. doi: 10.3390/s16122169.
- MATSUOKA, A., SHINOHARA, M., TANAKA, Y., et al., 2013, “Development of fluxgate magnetometers and applications Magnet Fields in the Space”, *An Introduction to Space Instrumentation*, , n. 5, pp. 217–225.
- MERAYO, J. M. G., PRIMDAHL, F., BRAUER, P., et al., 2001, “The orthogonalization of magnetic systems”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 89, n. 3, pp. 185–196. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/S0924-4247(00)00515-X.
- NACIONAL, O., 2017. “Observatório Nacional desenvolve equipamento de alta tecnologia para operação naval submersa”. Disponível em: <<http://on.br/index.php/pt-br/ultimas-noticias/>>.
- PEDERSEN, E. B., PRIMDAHL, F., PETERSEN, J. R., et al., “A new type of fluxgate magnetometer for low magnetic fields”, .
- PIIL-HENRIKSEN, J., MERAYO, J. M., NIELSEN, O. V., et al., 1996, “Digital Detection and feedback Fluxgate Magnetometer”, *Measurement Science and Technology*, v. 7, pp. 897–903. ISSN: 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/7/6/006.
- PRIMDAHL, F., 1979, “The fluxgate magnetometer”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 12, n. 4, pp. 241–253. ISSN: 0022-3735. doi: 10.1088/0022-3735/12/4/001. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0022-3735/12/i=4/a=001?key=crossref.7a075a0b465d1017a2a358d6f5437b30>>.
- PRIMDAHL, F., HERNANDO, B., PETERSEN, J. R., et al., 1999, “Digital detection of the flux-gate sensor output signal”, *Measurement Science and Technology*, v. 5, n. 4, pp. 359–362. ISSN: 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/5/4/006.

- PRIMDAHL, F., 1970, “Temperature Compensation of Fluxgate Magnetometers”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 6, n. 4, pp. 819–822. ISSN: 19410069. doi: 10.1109/TMAG.1970.1066971.
- RIPKA, P., 2003, “Advances in fluxgate sensors”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 106, n. 1-3, pp. 8–14. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/S0924-4247(03)00094-3.
- RIPKA, P., NAVRATIL, P., 1997, “Fluxgate sensor for magnetopneumometry”, *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 60, n. 1-3, pp. 76–79.
- SON, D., 1989, “A new type of fluxgate magnetometer for low magnetic fields”, *Physica Scripta*, v. 39, n. 4, pp. 535. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1402-4896/39/i=4/a=023>>.
- VACQUIER, V., SIMONS, R., HULL, A., 1947, “A magnetic airborne detector employing magnetically controlled gyroscopic stabilization”, *Review of Scientific Instruments*, v. 18, n. 7, pp. 483–487.
- VOPÁLENSKÝ, M., RIPKA, P., PLATIL, A., 2003, “Precise magnetic sensors”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 106, n. 1-3, pp. 38–42. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/S0924-4247(03)00129-8.