



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS
GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO ABORDO DE SATÉLITES
CIENTÍFICOS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO**

**RELATÓRIO FINAL ATIVIDADES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

PROCESSO Nº 105417/2005-0

Josemar de Siqueira (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

E-mail: josemar@lacesm.ufsm.br

Cassio Espindola Antunes (UFSM, Bolsista Substituído)

E-mail: cassio@lacesm.ufsm.br

Dr. Nalin B. Trivedi (DGE/CEA/INPE – MCT, Orientador)

E-mail: trivedi@dge.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRSPE/INPE – MCT, Co-Orientador)

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Junho de 2006

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsista:

Josemar de Siqueira (substituto a partir de março de 2006)

Acadêmico de Física – Centro de Ciências Naturais e Exatas

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/MCT – UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Cassio Espindola Antunes (Bolsista substituído no Projeto em março de 2006)

Acadêmico de Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/MCT – UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Processo:

PIBIC/INPE – CNPq/MCT 105417/2005-0

Orientador:

Dr. Nalin B.Trivedi

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

Colaboradores:

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT

Eduardo Andrighetto

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

Sandro Bertagnolli

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM



Elias Fernando Berra

Acadêmico do Curso de Física – UFSM

Everton Frigo

Acadêmico do Curso de Física – UFSM

Fagner Rother

Acadêmico do Curso de Física – UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

- Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT
- Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM
- Projeto desenvolvido no âmbito da Parceria: INPE/MCT – UFSM, Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.



AGRADECIMENTOS+

Gostaria de agradecer aos meus Orientadores Dr.Nelson Jorge Schuch por todo o apoio e empenho que tem dedicado para o desenvolvimento pessoal e científico e à Dr.Nalin Babulau Trivedi por todo o auxílio dado ao longo do Projeto. Agradeço ao Dr.José Carlos Becceneri, Coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela Oportunidade de desenvolver o Projeto Iniciação Científica as Senhor Egídia, Angelita . Maria Célia funcionárias do INPE/MCT pelo envolvimento e apoio. Em especial a Professora Dr.Damaris K. Pinheiro, Diretora do LACESM/CT – UFSM pela dedicação e preocupação com o bem estar dos alunos bolsistas do Projeto.

Sou muito grato da mesma maneira a todos meus colegas de Laboratório que foram fundamentais para o desenvolvimento do Projeto e meu próprio crescimento pessoal: Eduardo Andrighetto, Everton Frigo, Elias Fernando Berra, Sandro Bertagnolli, Fagner Rother e em especial a meu grande companheiro e colega de Pesquisa Cassio Espindola Antunes que não mediu tempo e esforços par me auxiliar. Muito obrigado a todos.



ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	11
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	12
I.1 – OBJETIVOS DO PROJETO.....	14
I.2 – METODOLOGIA.....	14
I.3 – PLANO DE TRABALHO	15
I.4 – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	15
I.5 – RESULTADOS ESPERADOS.....	16
CAPÍTULO II – CONCEITOS GEOFÍSICOS.....	17
II.1 – CAMPO GEOMAGNÉTICO	17
II.2 – COMPONENTES MAGNÉTICAS.....	18
II.3 – DECLINAÇÃO E INCLINAÇÃO MAGNÉTICA	21
II.4 – UNIDADES DE MEDIDAS PARA O CAMPO MAGNÉTICO	24
II.5 – VENTO SOLAR.....	24
II.6 – MAGNETOSFERA	25
II.7 – CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN	27
II.8 – CAMPO PINCIPAL	28
II.9 – ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS).....	31
II.10 – TEMPESTADES E SUB-TEMPESTADES MAGNÉTICAS	31
II.11 – VARIAÇÕES DO CAMPO GEOMAGNÉTICO	33
II.11.1 – <i>Variações Seculares</i>	33
II.11.2 – <i>Variações Diurnas</i>	34
II.11.3 – <i>Pulsações Geomagnéticas</i>	34
II.11.4 – <i>Pulsações de Baixa Freqüência (1 – 10mHz)</i>	35
II.11.5 – <i>Pulsações de Média Freqüência (10 – 100mHz)</i>	35
II.11.6 – <i>Pulsações de Alta Freqüência – (0,1 – 10Hz)</i>	36
II.12 – CLASSIFICAÇÃO DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS	36
II.12.1 – <i>Pulsações Contínuas Pc1</i>	37
II.12.2 – <i>Pulsações Contínuas Pc2 e Pc3</i>	37



<i>II.12.3 – Pulsações Contínuas Pc4</i>	38
<i>II.12.4 – Pulsações Contínuas Pc5</i>	38
<i>II.12.5 – Pulsações Irregulares Pi1</i>	39
<i>II.12.6 – Pulsações Irregulares Pi2</i>	39

CAPÍTULO III – CONCEITOS FÍSICOS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS..... 40

III.1 – MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	40
III.2 – INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO.....	41
III.3 – DENSIDADE DE FLUXO E FLUXO MAGNÉTICO	43
III.4 – FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA	44
III.5 – PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	45
III.6 – FERROMAGNETISMO.....	46
III.7 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS.....	47
III.8 - HISTERESE.....	49

CAPÍTULO IV – SENSORES PARA DETECÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO..... 52

IV.1 – TIPOS DE MAGNETÔMETROS.....	52
IV.2 – MAGNETÔMETRO DE INDUÇÃO.....	52
IV.3 – MAGNETÔMETROS SUPERCONDUTORES.....	53
IV.4 – MAGNETÔMETROS DE EFEITO HALL.....	54
IV.5 – MAGNETÔMETROS DE FLUXO SATURADO – FLUXGATE MAGNETOMETER	54
<i>IV.5.1 – Geometria dos Sensores Fluxgate</i>	56
IV.5.1.1 – Núcleo Linear Simples.....	57
IV.5.1.2 – Núcleo Linear Duplo.....	59
IV.5.1.3 – Núcleo em Anel	60
<i>IV.5.2 – Métodos de Detecção e Análise do Sinal</i>	60
<i>IV.5.3 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado</i>	61
IV.5.3.1– O Sensor e a Bobina de Realimentação	62
<i>IV.5.4 – Fluxgate Curto Circuitado</i>	63
<i>IV.5.5 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado</i>	63
<i>IV.5.6 – Magnetômetro de Harmônicos Pares</i>	66

CAPÍTULO V – IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXGATE..... 67

V.1 – DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES	67
--	----



V.2 – CIRCUITO ELETRÔNICO	71
V.2.1 – <i>Circuito e Sinal de Excitação</i>	72
V.2.2 – <i>Comparação dos Sinais</i>	76
V.2.3 – <i>Circuito Integrador</i>	77
V.3 – CIRCUITO E PLACA.....	78
CAPÍTULO VI – RESULTADOS	81
VI.1 – RESULTADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO	81
VI.2 – TRABALHOS E PUBLICAÇÕES	84
VI.3. – PERSPECTIVAS PARA O PROJETO	86
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – ELEMENTOS DO VETOR MAGNÉTICO	19
FONTE: MARIA JOSÉ FARIA BARBOSA, 2003	
FIGURA 2.2 – DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	22
FONTE: HTTP://SWDCDB.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/IGRF/MAP/D-M.GIF	
FIGURA 2.3 – INCLINAÇÃO MAGNÉTICA.....	23
FONTE: HTTP://SWDCDB.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/IGRF/MAP/I-M.GIF	
FIGURA 2.4 – MAGNETOSFERA TERRESTRE.....	26
FONTE: SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL – ANO 2, Nº 23	
FIGURA 2.5 – CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VANALLEN.....	28
FONTE: HTTP://BR.GEOCITIES.COM/SALADEFISICA	
FIGURA 2.6 CARTA MAGNÉTICA – INTENSIDADE TOTAL DO CAMPO GEOMAGNÉTICO.....	30
FONTE: HTTP://SWDCDB.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/IGRF/MAP/T-M.GIF	
TABELA II.1 – CLASSIFICAÇÃO DA IAGA PARA PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS	37
FIGURA 3.1 – CAMPO MAGNÉTICO AO REDOR DE UM FIO.....	42
FONTE: HTTP://FISICANDO.BR.TRIPOD.COM/FISICA/ELETROMAG.HTM	
FIGURA 3.2 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS ALEATÓRIOS	47
FONTE: HTTP://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DOMINIO_MAGN%C3%A9TICO	
FIGURA 3.3 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DESLOCAMENTO DE FRONTEIRAS	48
FONTE: HTTP://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DOMINIO_MAGN%C3%A9TICO	
FIGURA 3.4 – ROTAÇÃO DE DOMÍNIOS.....	48
FONTE: HTTP://ES.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/DOMINIO_MAGN%C3%A9TICO	
FIGURA 3.5 – CURVA DE HISTERESE	50
FONTE: HTTP://WWW.BIBLIOTECA/ELETROTECNICA_CAP4.PDF	
FIGURA 4.1 – SATURAÇÃO DO NÚCLEO	55
FONTE: KABATA, W.; MAGNETÔMETROS FLUXGATE PARA SATÉLITES CIENTÍFICOS	
FIGURA 5.1 – SENSORES DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE	67
FONTE: LABORATÓRIO DE GEOMAGNETISMO – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.2 – NÚCLEO FERROMAGNÉTICO TOROIDAL.....	68
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.3 – ESQUEMA DO SENSOR MAGNÉTICO	69
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.4 – VISTA FRONTAL DO SECUNDÁRIO	69
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.5.A – MAGNETÔMETRO FLUXGATE	70



FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.5.B – MAGNETÔMETRO FLUXGATE	70
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.6 – CIRCUITO DE EXCITAÇÃO.....	73
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.7 – SINAL DE EXCITAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 16KHZ.....	74
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.8 – SINAL DE EXCITAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 4KHZ.....	75
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.9 – DISTORÇÃO DO SINAL DE EXCITAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 16 KHZ	75
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.10 – DISTORÇÃO DO SINAL DE EXCITAÇÃO COM FREQUÊNCIA DE 4 KHZ.....	76
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.11 – CIRCUITO INTEGRADO MULTIPLEXADOR.....	77
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.12 – CIRCUITO INTEGRADOR	78
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.13 – SCHEMATIC DO CIRCUITO DE EXCITAÇÃO E DETECÇÃO.....	79
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.14.A – PLACA IMPRESSA – LADO DOS COMPONENTES	80
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 5.14.B – PLACA IMPRESSA – DA SOLDA	80
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 6.1 – MONTAGEM DO CIRCUITO NAS PRONT-O-LABOR.....	81
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA 6.2 – FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO 16KHZ	82
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	
FIGURA: 6.3 – SINAL DE EXCITAÇÃO E TENSÃO DETECTADA	82
FONTE: LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS – CRSPE/INPE – MCT	



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	91
CIRCUITO COMPLETO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE DE NÚCLEO EM ANEL – BAIXO RUÍDO, EM DESENVOLVIMENTO NO LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS DO CRSPE/INPE – MCT, EM SANTA MARIA – RS.	
ANEXO B.....	93
PLACAS IMPRESSAS DO CIRCUITO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE EM ANEL, EM DESENVOLVIMENTO NO LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS DO CRSPE/INPE – MCT, EM SANTA MARIA – RS.	
ANEXO C.....	96
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EFETUADA PELO BOLSISTA SUBSTITUTO JOSEMAR DE SIQUEIRA	
ANEXO D.....	101
CERTIFICADOS DE TRABALHOS DE PARTICIPAÇÃO DO BOLSISTA SUBSTITUÍDO CASSIO ESPINDOLA ANTUNES NO PROJETO EM CONGRESSOS E EVENTOS	

RESUMO

A Terra possui um campo magnético de origem interna e com variação secular. As variações geomagnéticas mais rápidas de períodos menos que um ano até a fração do segundo são de origem externa – da atmosfera ionizada entre o Sol e Terra. O estudo das variações Geomagnéticas pode revelar importantes informações sobre fenômenos ocorridos na Magnetosfera, bem como eventos ocorridos na Ionosfera que podem gerar distúrbios em telecomunicações ou até mesmo no clima espacial. A coleta de dados sobre o Campo Magnético Terrestre tem grande importância para ampliar os conhecimentos a respeito dos fenômenos e do comportamento da magnetosfera terrestre

A instrumentação do magnetômetro de núcleo saturado está baseada nas propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética. Uma saturação magnética, em alta frequência, é criada em um núcleo ferromagnético por uma bobina de excitação, variando a permeabilidade magnética deste núcleo. A saturação magnética criada pela bobina de excitação na região não linear da curva de histerese $B \times H$, gera na saída de uma segunda bobina, enrolada sobre o núcleo, um sinal com alto conteúdo harmônico e com características variáveis de acordo com o campo externo que circunda o núcleo magnético.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Magnetômetros de núcleo saturado, ou “fluxgate magnetometer”, são equipamentos destinados à obtenção de dados sobre o comportamento de um determinado campo magnético. Existem vários modelos de magnetômetros disponíveis para pesquisa atualmente, cada um com suas peculiaridades. Para cada tipo de estudo ou pesquisa que se deseja realizar existem diversas técnicas, geometrias de sensores, diferentes circuitos eletrônicos, etc.

A instrumentação de magnetômetros fluxgate tem sua implementação baseada nas propriedades magnéticas de certos materiais ferromagnéticos que apresentam uma histerese com ponto de saturação elevado. A alta permeabilidade dos materiais utilizados na confecção dos núcleos é essencial para a detecção do campo magnético que se deseja mensurar. Entre os tipos de aplicações encontrasse naturalmente a observação de fenômenos Geomagnéticos e interações da Terra com o Espaço Exterior, mas, além disso, aplicações em biomedicina, prospecção mineral, operações militares, análise estrutural de materiais, etc.

A técnica utilizada nos fluxgate consiste em expor um núcleo ferromagnético a um campo de excitação H gerado por uma bobina ao redor deste núcleo. Nesta bobina são induzidos pulsos periódicos de corrente que são responsáveis pela variação do fluxo magnético do material até seu ponto de saturação. Nesse momento o fluxo deixa de se concentrar no núcleo, não importando a intensidade do campo ao qual ele estiver exposto. Quando o material deixa o estado de saturado a densidade de fluxo magnético varia, gerando assim uma força eletromotriz induzida numa segunda bobina – enrolamento secundário – existente ao redor do conjunto formado pelo núcleo e o primário.

O sinal de tensão gerado no secundário apresenta um conteúdo altamente harmônico que é diretamente influenciado pelo campo magnético. No caso do estudo de Geomagnetismo, os harmônicos pares do sinal detectado são os que mais sofrem com esta influência. Já o segundo harmônico do sinal é o que apresenta a maior linearidade com relação à variação do Campo Magnético Terrestre. Sendo assim, muitos são os modelos de fluxgate que analisam o segundo harmônico do sinal da bobina detectora para obter as variações do Campo Geomagnético.

Conhecidos também por magnetômetros de baixo ruído devido a não apresentarem níveis muito altos de interferências ou sinais indesejados na medida, os fluxgate com geometria de núcleo em anel, ou toroidal, destacam-se em certas áreas devido as suas características peculiares. Estes magnetômetros podem ser utilizados tanto em bases ou observatórios terrestres quanto em balões, satélites ou veículos espaciais devido a seu bom desempenho e facilidade de operação.

I.1 – OBJETIVOS DO PROJETO

Os principais objetivos deste Projeto são:

- Estudar técnicas de medição das variações de Campo Magnético Terrestre para realizar estudos na área de Geofísica Espacial;
- Efetuar estudos experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas abordo de satélites científicos, utilizando sistemas “fluxgate” de três componentes com sensor em anel;
- Participar na operação e análise de dados do magnetômetro “fluxgate” na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS;
- Realizar pesquisas utilizando os dados geomagnéticos coletados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, no âmbito da Parceria: INPE – UFSM.

I.2 – METODOLOGIA

- Operar a Estação Geomagnética do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRSPE/INPE – MCT, no seu Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra;
 - Estudar as diversas técnicas de medição do Campo Geomagnético e concentrar esforços no desenvolvimento e construção do magnetômetro do tipo “fluxgate” de baixo ruído com sensor em anel para aplicações espaciais abordo de satélites científicos;
 - Realizar pesquisa na área de Geomagnetismo utilizando os dados coletados Observatório Espacial do Sul - OES, em São Martinho da Serra.
-

I.3 – PLANO DE TRABALHO

- O Bolsista inicialmente participará na operação e análise de dados da Estação Geomagnética do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, no seu Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS;
- Após adquirir um conhecimento maior das técnicas experimentais, o Bolsista vai iniciar o trabalho de desenvolvimento e construção de um protótipo simplificado para medidas geomagnéticas na Órbita Terrestre – magnetômetro fluxgate de três componentes com sensores em anel. Após, realizar testes de medidas geomagnéticas terrestres no Observatório Espacial do Sul para verificar o funcionamento;
- Com os dados obtidos o Bolsista deverá realizar estudos para maior compreensão do comportamento do Campo Geomagnético.

I.4 – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

- Operação da Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra;
 - Estudar as técnicas experimentais de magnetometria;
 - Desenvolver Projeto Básico de construção do magnetômetro do tipo “fluxgate” de baixo ruído;
 - Iniciar a construção de um magnetômetro “fluxgate” de três componentes com baixo ruído utilizando sensores em anel para medidas geomagnéticas abordo de satélites;
 - Testar e operar o novo magnetômetro construído nos laboratórios do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, no âmbito da Parceria: INPE/MCT – UFSM.
-



I.5 – RESULTADOS ESPERADOS

- Maior conhecimento do comportamento do Campo Geomagnético através do estudo dos dados obtidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT;
 - Desenvolvimento de conhecimentos de Instrumentação Geomagnética através de construção e operação de magnetômetros de baixo ruído para pesquisas espaciais.
-

CAPÍTULO II

CONCEITOS GEOFÍSICOS

II.1 – CAMPO GEOMAGNÉTICO

A Terra está submersa em um grande campo magnético com importantes características. São diversos os fenômenos gerados devido a este campo, entre eles pode-se citar a orientação de uma bússola ao longo da superfície terrestre. Além disso o Campo Magnético da Terra controla o movimento de íons presentes no ambiente espacial em que o Planeta encontra-se, impedindo a incidência direta de partículas vindas com o Vento Solar. Outra característica importante é a forma com o Campo Magnético afeta a propagação de ondas eletromagnéticas na ionosfera, que torna o meio anisotrópico (condutividade ionosférica tensorial).

Acreditasse que os primeiros a fazerem uso prático de materiais como a magnetita foram os Chineses, utilizando-se de suas propriedades para construção de bússolas para orientação em suas viagens desde 215 a.C. Mas o início do interesse do homem pelo Geomagnetismo é provavelmente muito mais antigo que isso, possivelmente surgidas já no Século XII a.C. por notícias na Mitologia dos próprios Chineses sobre o comportamento e propriedades do Campo Magnético Terrestre.

Um modelo estático do Campo Geomagnético não poderia explicar as variações de longo período que ocorrem no Campo e nem a reversão da polaridade magnética, que ocorre em intervalos de milhares de anos. Também fica excluída a hipótese do Campo Geomagnético ser originado por materiais magnéticos presentes no interior da Terra, visto que a altas temperaturas (acima da *Temperatura de Curie*) os materiais perdem suas características magnéticas.

A explicação aceita para a origem de cerca de 99% do Campo Geomagnético é a de um processo de indução eletromagnética que ocorre no interior da Terra, devido a fortes correntes elétricas que fluem na parte líquida do núcleo da Terra. Este fenômeno é conhecido como Dínamo Hidromagnético. O restante do Campo é considerado fruto de correntes elétricas presentes nas regiões ionizadas ao redor da Terra.

O sistema de correntes no núcleo não parece ser estável e homogêneo. Comparado com o modelo dipolar este modelo mostra a presença de grandes anomalias ao longo da superfície Terrestre. Uma média aproximada pode ser dado por um campo de cerca de 30000 nT na Linha do Equador e 60000 nT nos pólos da Terra. Mas as anomalias apresentam milhares de quilômetros e podem apresentar dezenas de milhares de nanoteslas de variação. Além disso, a distribuição não uniforme de materiais magnéticos próximos a Crosta Terrestre também pode gerar anomalias em escalas bem menores, mas que podem alcançar dezenas de nanoteslas.

II.2 – COMPONENTES MAGNÉTICAS

A intensidade total do Campo Magnético Terrestre é comumente representada pela letra (F) e apresenta módulo, direção e sentido definidos. Dessa maneira podemos atribuir ao Campo Geomagnético um comportamento vetorial, observado facilmente pela orientação de materiais magnéticos numa determinada direção geográfica.

O modelo mais aceito atualmente para a caracterização do Campo é ilustrado pela Figura 1.1.

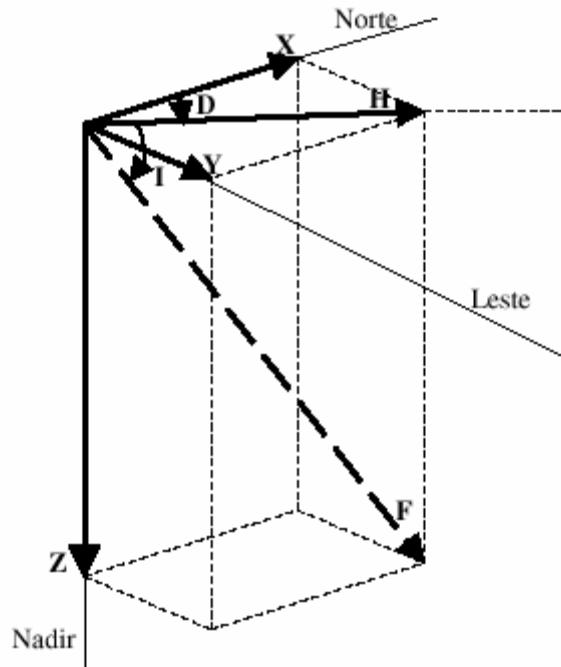


Figura 2.1 – Elementos do vetor magnético
Fonte: Maria José Faria Barbosa, 2003

Os elementos vetoriais da Figura 1.1 podem ser divididos em *lineares* e *angulares*:

Elementos lineares:

X – componente magnética norte (positiva no sentido do norte geográfico);

Y – componente magnética leste (positiva para leste);

Z – componente magnética vertical (positiva quando aponta para baixo);

H – componente magnética horizontal (define o norte magnético local);

F – intensidade total do campo magnético num determinado ponto.

Elementos angulares:

D – declinação magnética. É o ângulo entre o norte geográfico (X) e a componente horizontal do campo magnético (H), positivo quando medido do norte para o leste;

I – inclinação magnética. É o ângulo entre a componente magnética horizontal (H) e o vetor intensidade total do campo magnético (F), positivo quando medido do plano horizontal para baixo.

As variações D e I são dadas em nT assim como os demais elementos.

As componentes do Campo Geomagnético são relacionadas da seguinte maneira às direções geográficas:

$$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$X = H \cos(D) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$Y = H \sin(D) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$$Z = F \sin(I) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$H = F \cos(I) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$H^2 = X^2 + Y^2 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

O ângulo de declinação D e de inclinação I podem ser encontrados por:

$$D = \arctg(Y/X) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$I = \arctg(Z/H) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

II.3 – DECLINAÇÃO E INCLINAÇÃO MAGNÉTICA

Apesar de acreditar-se que a agulha de uma bússola aponta para o Sul Magnético da Terra, sabe-se agora que isso não é verdade para a maioria dos lugares onde esse teste for feito. A agulha da bússola magnética se ajusta às linhas do Campo Geomagnético local, ao contrario de muitos pensarem que ela aponte para o Norte Geográfico. Para indicar as direções Geográficas existem os chamados mapas de Declinação Magnética.

A direção do Campo Geomagnético em cada ponto da superfície do Globo, pode ser determinada em termos da declinação e inclinação magnética.

Um exemplo de carta da Declinação Magnética é apresentada na Figura 2.2:

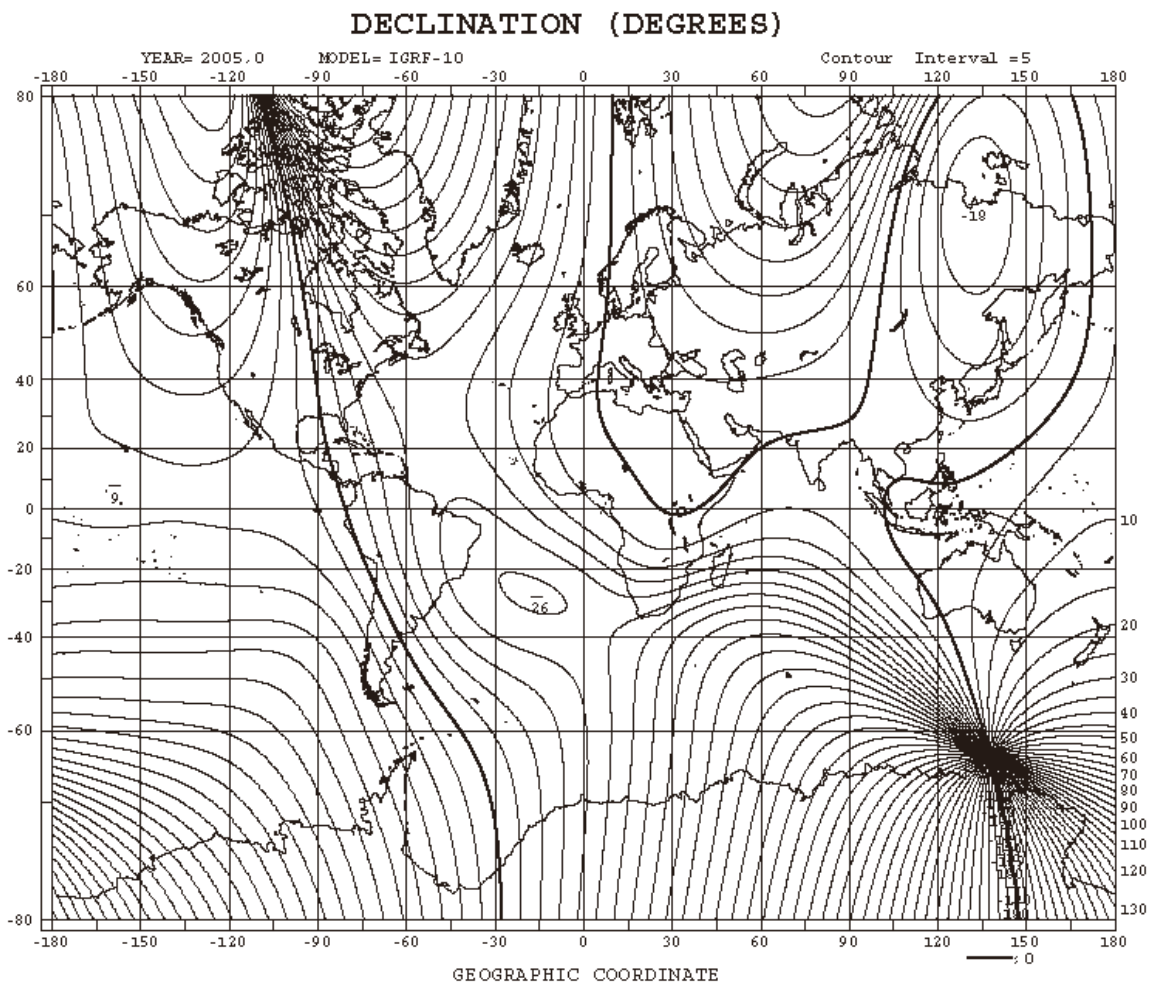


Figura 2.2 – Declinação Magnética

Fonte: <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/d-m.gif>

O Campo Magnético da Terra apresenta-se paralelo à superfície apenas sobre a linha do Equador. Isto devido a outra característica importante do Campo Geomagnético, a Inclinação Magnética. Nas demais regiões que não acima do Equador, o Campo Magnético apresenta uma inclinação em relação à superfície. Este ângulo que se forma entre a superfície e uma linha de campo é chamado ângulo de Inclinação.

A medida da inclinação Magnética pode ser feita com o uso de uma bússola de inclinação que tem uma agulha capaz de se inclinar verticalmente. Esta bússola

apresenta uma inclinação de 90 Graus nos Pólos Terrestres, aonde as linhas de campo são perpendiculares à superfície Terrestre.

Um exemplo de carta da Inclinação Magnética é apresentada na Figura 2.3:

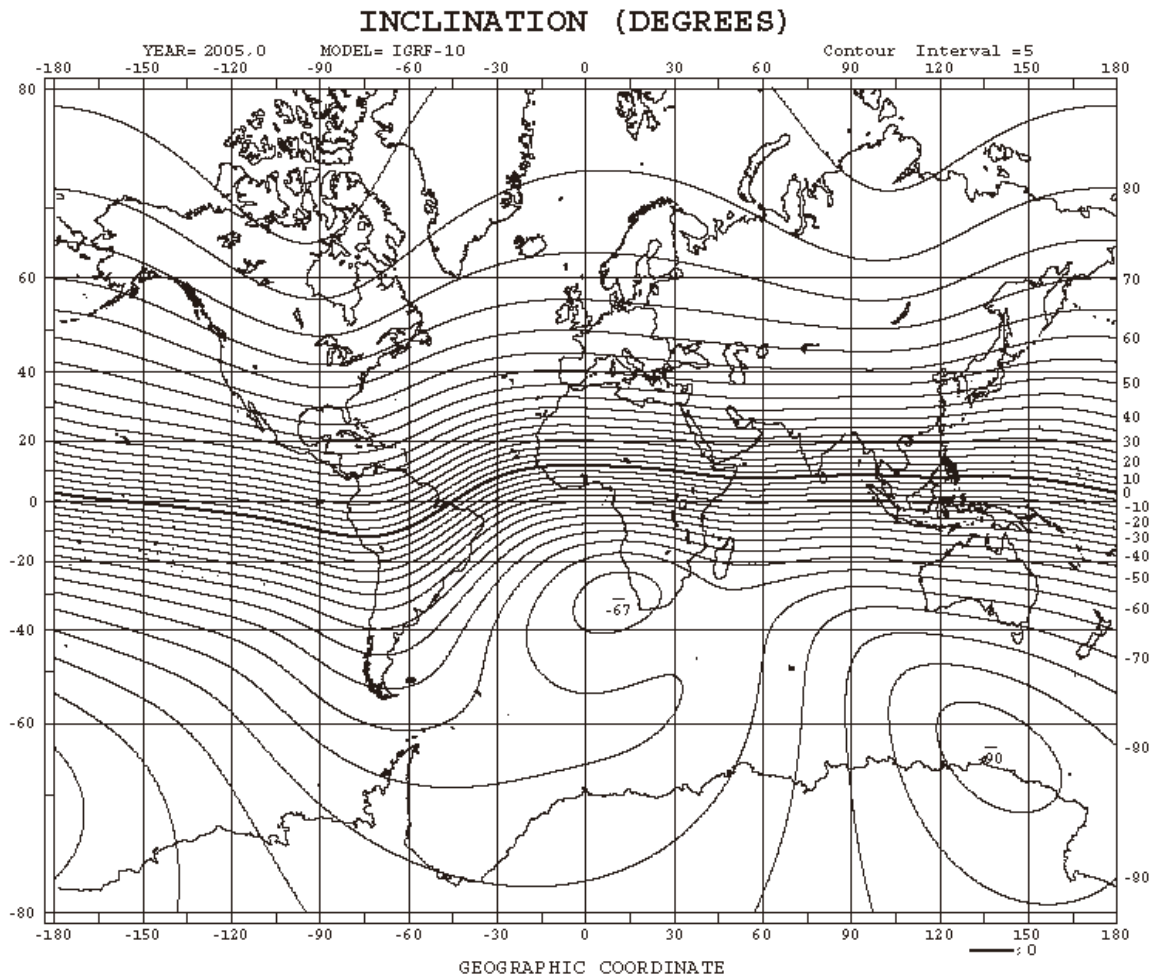


Figura 2.3 – Inclinação Magnética
Fonte: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/i-m.gif>

II.4 – UNIDADES DE MEDIDAS PARA O CAMPO MAGNÉTICO

Convencionou-se em 1973, na reunião realizada em Kyoto (Japão) pela *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA), que o campo magnético deveria ser expresso em termos do vetor indução magnética (**B**), adotando-se o nanotesla (nT no Sistema Internacional SI) como unidade de medida. A unidade gama (γ , do CGS-emu) também é utilizada ainda. Devido ao tesla ter uma unidade muito grande para expressar o Campo Geomagnético, geralmente se usa o seu submúltiplo nanotesla (nT).

$$1nT = 10^{-9}T = 10^{-5} Gauss(G) = 1gama(\gamma)$$

II.5 – VENTO SOLAR

Um plasma eletricamente neutro e magnetizado é lançado continuamente pelo Sol em direção radial. Esse gás ionizado consiste basicamente em íons de hidrogênio (prótons) e elétrons e é chamado de Vento Solar.

Nas proximidades da Terra que encontra-se a aproximadamente 150 milhões de quilômetros do Sol, o Vento Solar tem uma velocidade típica de 450Km/s, uma densidade de prótons de 6,6 e de elétrons de 7,1 partículas/cm³ e uma intensidade de campo magnético de cerca de 7 nT. A presença de um campo magnético no Vento Solar origina diversos fenômenos assim como os efeitos hidromagnéticos e inclusive aqueles relacionados com a interação Sol-Terra.

II.6 – MAGNETOSFERA

Em 1987 Jacobs citou Chapman e Ferraro (1931), que previram o dito confinamento do Campo Magnético da Terra dentro de uma enorme lacuna, durante tempestades magnéticas. Esta região é denominada magnetosfera e apresenta uma forma semelhante à extensa cauda de cometa. A região fronteira à magnetosfera é conhecida como magnetopausa.

A comparação com a forma de uma cauda de cometa é feita pois na parte frontal ou diurna, parte que está de frente para o Sol, a magnetosfera é achatada e dista aproximadamente 11 raios terrestres ($1R_t \cong 6371Km$) do centro da Terra. Já na parte lateral apresenta entre 12 a 15 R_t . A parte anti-solar estima-se que tenha cerca de 500 R_t ou até mais. Isto ocorre devido ao vento solar com seu continuo fluxo de plasma, que ao passar pela Terra, liga-se às linhas de Campo e as arrasta consigo, resultando em uma compressão da magnetosfera do lado frontal com o Sol e da mesma forma uma alongação na parte oposta. A variação dessas dimensões sofre influencia devido a atividade solar, mas comparado com a extensão da magnetosfera, essa influência pode ser comparada praticamente desprezível.

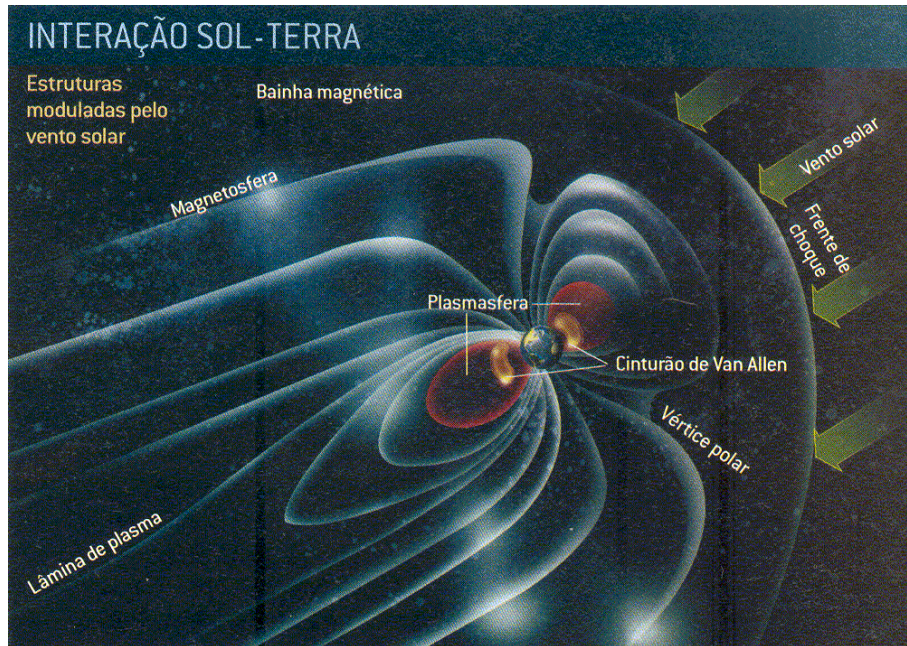


Figura 2.4 – Magnetosfera Terrestre
Fonte: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23

Vários processos físicos e naturais que ocorrem em grandes altitudes e até no espaço próximo a Terra, dentro da magnetosfera, são controlados pelo Campo Geomagnético. Fora do alcance da magnetopausa, esses processos são dominados pelo campo magnético interplanetário. Os gases ionizados e partículas elétricas são fortemente influenciadas pelo Campo Magnético Terrestre. Nas regiões mais internas da magnetosfera, entre 50 até alguns milhares de quilômetros da superfície terrestre, existe uma região chamada de ionosfera onde ocorrem diversos fenômenos também controlados pela magnetosfera. Até cerca de $4R_t$ o plasma terrestre gira junto com as linhas de campo magnético e esta região é a plasmasfera. A superfície da plasmasfera é delimitada pela plasmopausa.

II.7 – CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN

O chamado Cinturão de Van Allen consiste em uma região onde ocorrem diversos fenômenos atmosféricos devido à concentração de partículas. Descoberto em 1958 por James Van Allen. Esta região consiste em dois cinturões em forma de anéis com centro no equador. O primeiro situa-se entre 1000 e 5000 Km de altitude e apresenta sua intensidade máxima a cerca de 3000 Km da superfície da Terra. O segundo cinturão situa-se entre 15000 e 25000 Km de altitude.

O primeiro cinturão consiste praticamente de prótons altamente energéticos que tem origem do decaimento de nêutrons produzidos quando raios cósmicos vindos do espaço exterior se chocam contra átomos presentes na atmosfera terrestre. Parte dos nêutrons é arremessada para fora da atmosfera e se desintegra em prótons e elétrons ao cruzar a região do Cinturão. Essas partículas então se movem em trajetórias espirais ao longo das linhas de Campo Magnético da Terra. O segundo cinturão contém partículas eletricamente carregadas tanto de origem atmosférica quanto solar; são principalmente íons hélio trazidos no Vento Solar.

Durante períodos de atividade solar mais intensa, grande parte das partículas eletricamente carregadas trazidas pelo Vento Solar conseguem romper a barreira formada pelos Cinturões de Radiação de Van Allen, que ao atingirem a alta atmosfera produzem fenômenos como as auroras polares e as tempestades magnéticas.

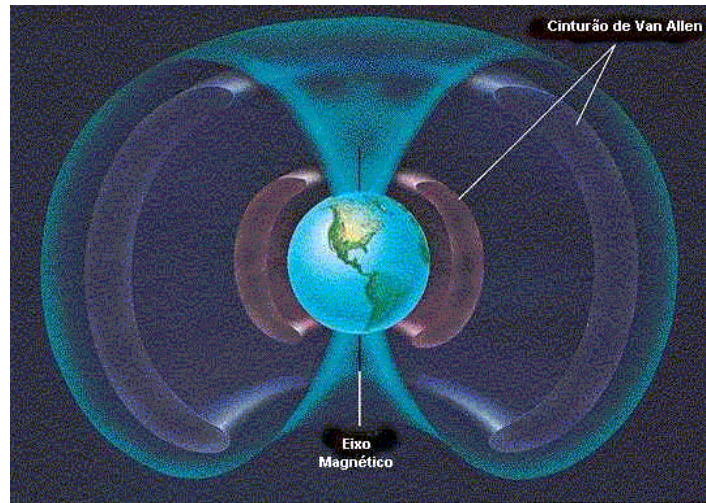


Figura 2.5 – Cinturão de Radiação de VanAllen.
 Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica>

II.8 – CAMPO PRINCIPAL

O Campo Magnético Terrestre pode ser expresso pelo gradiente de um escalar, $B = -\nabla\gamma$, onde γ é o potencial magnético escalar (nT). É válido lembrar que este gradiente pode ser utilizado em áreas livres de influencias de correntes e materiais magnéticos. Baseando-se na lei de fluxo magnético, $\nabla B = 0$, o potencial magnético escalar satisfaz a equação de Laplace $\nabla^2\gamma = 0$, cuja solução segue a forma adotada em Geomagnetismo (expansão em harmônicos esféricos):

$$\gamma(r, \theta, \varphi) = a \sum_{n=1}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] P_n^m \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$B_r(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (n+1) [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] P_n^m \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$B_{\theta}(r, \theta, \varphi) = - \sum_{n=1}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\varphi) + h_n^m \sin(m\varphi)] \frac{dP_n^m \cos(\theta)}{d\theta} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$B_{\varphi}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sin(\theta)} \sum_{n=1}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m [g_n^m \sin(m\varphi) - h_n^m \cos(m\varphi)] P_n^m \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Nestas equações para um campo magnético produzido por correntes, é adotado o sistema de coordenadas esféricas (r, θ, φ) , onde r é a distância radial (magnitude do vetor posição), θ é o ângulo polar e φ é o ângulo azimutal. O campo magnético está dado por suas componentes $B = (B_r, B_{\theta}, B_{\varphi})$, sendo a o raio médio da Terra (6.371,2 Km), g_n^m e h_n^m são os coeficientes de Gauss-Schmidt de grau n e ordem m e $P_n^m \cos(\theta)$ são os polinômios associados de Legendre (na forma quase normalizada de Schmidt). A variação temporal é dada por g_n^m e h_n^m . Neste modelo $N_{\max} = 10$.

O potencial magnético escalar é dado por:

$$\gamma = a \left(\frac{a}{r} \right)^2 [g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \varphi + h_1^1 \sin \varphi) \sin \theta] \quad (\text{Eq. 2.13})$$

onde,

$$(n = 1 \text{ e } m = 0 \text{ e } 1)$$

Logo, há um eixo de inclinação θ_0 do dipolo geomagnético em relação ao eixo de rotação da Terra e uma magnitude m (A.m^2) dadas por:

$$\text{tg } \theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{g_1^0} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$m = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2} = \frac{4\pi}{\mu_0} a^3 B_E \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Um exemplo de carta magnética que corresponde ao valor do campo total ao longo da superfície terrestre é apresentado na Figura 2.6:

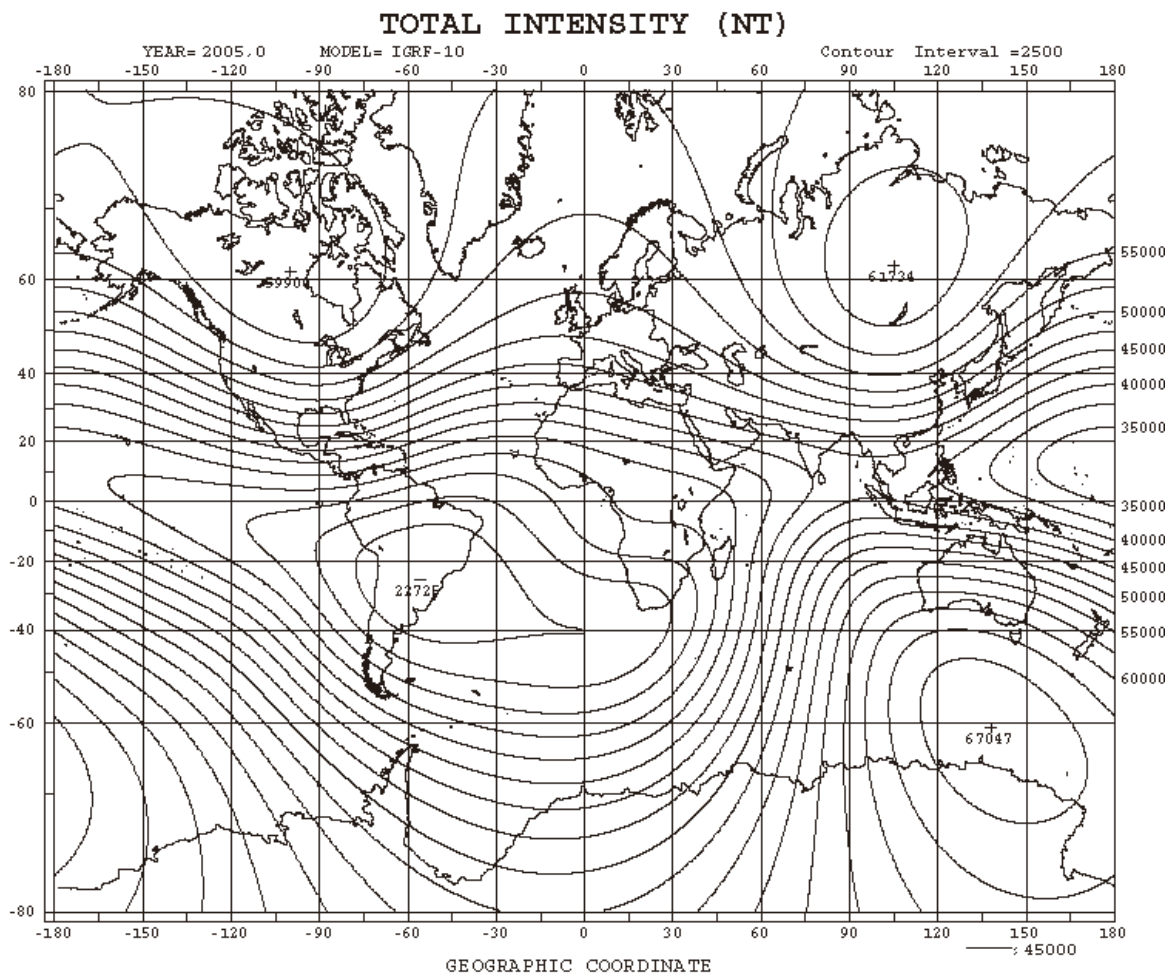


Figura 2.6 carta magnética – Intensidade Total do Campo Geomagnético
Fonte: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/t-m.gif>

II.9 – ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS)

Descoberta na década de 1950, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) localizava-se sobre o atlântico, por este motivo recebeu este nome. Esta região apresenta atualmente a área de menor intensidade do Campo Geomagnético ao longo da superfície terrestre. A atual localização do menor valor do Campo Magnético está hoje situada no sudeste brasileiro, cerca de 700 Km da costa do Atlântico.

Acredita-se que essa anomalia é causada pelo fato de seu centro magnético não se localizar no núcleo da Terra, gerando assim um campo mais fraco no local da anomalia. Da mesma maneira como nos pólos terrestres, na região do AMAS a precipitação de partículas eletricamente carregadas acontece com maior facilidade. As partículas podem atingir as camadas menos elevadas da atmosfera terrestre, fazendo dessa região, umas das mais vulneráveis ao efeito de precipitação de partículas energéticas e radiações.

II.10 – TEMPESTADES E SUB-TEMPESTADES MAGNÉTICAS

O vento solar flui constantemente no sentido Sol-Terra trazendo um fluxo de prótons e elétrons que esbarra no Campo Geomagnético, criando uma cavidade conhecida como magnetosfera. Dentro da magnetosfera o campo magnético e o campo elétrico (gerado pelo fluxo de cargas contidas no vento solar) controlam o movimento de íons na ionosfera. Estas correntes existentes na magnetosfera e na ionosfera são responsáveis pelas variações transientes temporárias existentes nos estudos feitos na magnetosfera em pontos da superfície terrestre ou em sua vizinhança.

Os efeitos mais severos estão associados com atividades solares irregulares, mais intensas, que emite raios-X, radiação ultravioleta e partículas de alta energia. Com a alteração do plasma solar, aumentam-se a densidade de partículas e com a configuração adequada do campo magnético interplanetário (apontando para o sul), assim como duração suficiente do fenômeno, o vento solar comprime o campo magnético da vizinhança da Terra e transfere grande parte de sua energia para a magnetosfera. Partículas carregadas acabam penetrando a magnetosfera e sendo empurradas e armazenadas na ionosfera equatorial, distribuindo-se a cerca de 2,5 a 5 raios terrestres do centro do planeta, chamada de corrente de anel, “ring current”. Quando estes eventos ocorrem na devida seqüência, tem-se origem as chamadas tempestades magnéticas, que ocorrem inesperadamente para o homem, sendo percebidas subitamente nos registros magnéticos obtidos diariamente, quando o índice Sq (variação *Solar Quiet*) é completamente perturbado. As tempestades magnéticas podem durar até 5 dias e alcançar variações, embora raramente, na ordem de milhares de nanoteslas.

Quando ocorrem tempestades magnéticas, uma serie de distúrbios na ionosfera se iniciam. Acredita-se que esses distúrbios tenham origem apenas na intensificação do vento colar, causador das tempestades magnéticas, embora os detalhes dos mecanismos não sejam totalmente conhecidos.

Sub-tempestades magnéticas são associadas às correntes do campo alinhadas, fluindo dentro e fora da região auroral. Elas são menos intensas que as tempestades, mas ocorrem com maior freqüência e duram apenas algumas horas. As sub-tempestades são desencadeadas quando o balanço dinâmico da energia destas correntes se torna instável. Tanto a freqüência das tempestades quanto das sub-tempestades magnéticas está associado ao ciclo solar de 11 anos.

II.11 – VARIAÇÕES DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

O Campo Magnético Terrestre não é estável ao longo do tempo e apresenta diversos tipos de variações temporais e espaciais que podem ser da ordem de frações de segundos, até milhares de anos. Os tipos de variações são comumente classificadas de acordo com seu período de ocorrência.

Podemos classificar as variações em:

- *Seculares* – períodos maiores do que 1 ano;
- *Diurnas* – ocorrem no período de um dia, 24 horas;
- *Distúrbios Geomagnéticos* – com períodos variáveis;
- *Pulsações* – período de 0,1 a 1000 segundos;
- *Atmosféricas* – com período menor que 1 segundo;
- *Produzidas pelo Homem* – mesmo período das Atmosféricas.

Apenas as variações seculares é que tem sua origem no interior da Terra, as demais são devido a interações da Terra com demais fenômenos espaciais.

II.11.1 – VARIAÇÕES SECULARES

A variação secular ocorre devido a mudanças nas correntes que fluem na periferia do núcleo terrestre. Este tipo de variação é muito lenta, chegando a escalas de milhares de anos e altera as características do campo principal terrestre. Sua quantificação é feita anualmente segundo a variação das componentes X, Y e Z (H., D, Z) do campo Geomagnético.

Associadas as características da variação secular estão a mudança no campo não-dipolar, as variações no momento do dipolo geomagnético e as variações na sua orientação. Elas apresentam-se tipicamente como um decréscimo no momento do dipolo, uma deriva para oeste do campo não-dipolar e a deriva do dipolo para o norte.

II.11.2 – VARIAÇÕES DIURNAS

Após vários experimentos e observações chegou-se a conclusão que a variação diurna está associada a correntes elétricas fluindo na atmosfera ou de origem externa. Schuster (1880) mostrou que realmente havia uma maior contribuição de origem externa nesse tipo de variação, mas que uma pequena parte vinha de fontes internas, esta era provinda de correntes secundárias induzidas no interior da Terra pelas correntes externas (primárias).

A variação diurna é causada principalmente pelas correntes fluindo na ionosfera, onde o movimento devido aos ventos e marés na atmosfera resulta na atuação do dínamo, criando campos e correntes na ionosfera. Estas variações apresentam relação com a estação do ano e com o ciclo solar de 11 anos. Em dias em que o Sol apresenta pouca atividade ela é chamada de variação *Sq* (Solar Quiet), que apresenta uma magnitude para o Campo Geomagnético na faixa desde algumas dezenas até várias centenas de nanoteslas.

II.11.3 – PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

Pulsões geomagnéticas são flutuações de curto período (Ultra Low Frequency – ULF) que ocorrem no Campo Magnético Terrestre. São variações temporárias de baixa amplitude, de 0,001 a 50 nT e frequências entre 0,2 segundos a 10

mim e não causam nenhum efeito permanente no campo principal. Assim como as tempestades magnéticas, as pulsações têm origem externa, devido à atividade solar. As pulsações são divididas em Pc, pulsações que apresentam um comportamento contínuo, e as Pi que apresentam comportamento irregular.

As pulsações geomagnéticas se relacionam com interações complexas entre o vento solar e o Campo Geomagnético. Estas interações são chamadas de eventos transientes e ocorrem da fronteira da região que constitui a magnetosfera e a magnetopausa.

II.11.4 – PULSAÇÕES DE BAIXA FREQUÊNCIA (1 – 10MHz)

As pulsações de baixa frequência são oscilações de plasma de comprimentos de onda com ordem de grandeza comparáveis as dimensões da magnetosfera. Estas pulsações geralmente tem sua amplitude máxima próximo às zonas aurais. As regiões de máxima intensidade ocorrem principalmente na oval auroral, exceto ao meio-dia quando os picos de amplitude podem ser levemente deslocados na direção dos pólos em relação a media oval auroral. Em médias latitudes não são evidentes e podem ocorrer com igual probabilidade em qualquer parte do dia.

II.11.5 – PULSAÇÕES DE MÉDIA FREQUÊNCIA (10 – 100MHz)

A maior parte das ondas de plasma de média frequência são geradas pelo vento solar na magnetopausa, ou geradas por instabilidades íon-ciclotônicas na região de fluxo contrário (*upstream*) ao vento solar. Estas ondas gerados por instabilidades são convectadas para baixo e se acoplam a magnetosfera, propagando-se no seu interior.

Essas pulsações são mais freqüentes no lado diurno da magnetosfera e têm amplitudes desde frações até vários nanoteslas.

II.11.6 – PULSAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA – (0,1 – 10Hz)

As pulsações de alta freqüência englobam as chamadas Pc1 e Pc2. Na superfície terrestre estas pulsações geralmente apresentam amplitudes entre 0,1 e 10 nT nas zonas aurorais, e com amplitudes menores nas zonas equatoriais.

Dados obtidos no solo mostram dois grupos distintos, pulsações com amplitude periodicamente modulada e outro que mostra mudanças graduais e algumas por acaso. As pulsações do primeiro grupo são conhecidas como pérolas, por apresentarem similaridade entre suas séries temporais e colares de pérolas. Já as do segundo grupo são chamadas de desestruturadas, devido a não existência de qualquer periodicidade aparente na sua modulação e amplitude.

II.12 – CLASSIFICAÇÃO DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

As pulsações apresentam-se divididas em dois tipos principais, classificadas segundo a suas características morfológicas:

- **PULSAÇÕES CONTÍNUAS:** oscilações regulares com uma periodicidade variando de 0,2 a 600 segundos e são subdivididas em grupos conforme o tamanho do período;
 - **PULSAÇÕES IRREGULARES:** oscilações irregulares de curto período, variando de 1 a 150 segundos. Apresentam ligação com distúrbios do Campo Geomagnético e são relacionadas com distúrbios da magnetosfera superior.
-

A classificação segundo o intervalo de frequência (f) e período (T) sugerida pela IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*) para as pulsações contínuas e irregulares são apresentadas na Tabela II.1:

P.Contínuas	Pc1	Pc2	Pc3	Pc4	Pc5
Frequência f	0,2-5 Hz	0,1-0,2 Hz	22-100 mHz	7-22 mHz	2-7 mHz
Período T	0,2-5 seg	5-10 seg	10-45 seg	45-150 seg	150-600 seg
P.Irregulares	Pi1	Pi2			
Frequência f	0,025-1 Hz	7-25 mHz			
Período T	1-40 seg	40-150 seg			

Tabela II.1 – Classificação da IAGA para Pulsações Geomagnéticas

II.12.1 – PULSAÇÕES CONTÍNUAS PC1

As Pc1 são pulsações regulares senoidais com períodos entre 0,2 a 5 segundos. Estas oscilações podem ser geradas em serie, na forma de rajadas, chegando a durar de 10 mim até algumas horas. Podem também ocorrer na forma de grupos consecutivos, tendo características de bruscas variações de frequência. Estudos indicam que este tipo de pulsação é mias freqüente em zonas aurorais e sub-aurorais.

II.12.2 – PULSAÇÕES CONTÍNUAS PC2 E PC3

De amplitude geralmente abaixo de 0,5 nT, as Pc2/3 apresentam períodos entre 5 a 30 segundos, apresentando variações tipicamente diurnas e seu máximo é alcançado ao meio-dia. A principal direção do vetor perturbado, embora tipicamente norte-sul, sofre uma variação diurna na maioria das latitudes e dessa forma ocorrem

diversos sentidos de polarização. A ocorrência destas pulsações é observada na fase inicial das tempestades magnéticas. A frequência de ocorrência da Pc3 não varia muito ao longo do ciclo solar, mas suas amplitudes decrescem repentinamente com a diminuição da atividade solar.

II.12.3 – PULSAÇÕES CONTÍNUAS Pc4

As pulsações Pc4 apresentam amplitudes de aproximadamente 5 a 20 nT em altas latitudes e 1 nT em baixas latitudes, durando normalmente de 10 min a várias horas. Estes sinais geralmente aumentam lentamente, mantendo-se num nível e em seguida decaem abruptamente. Em médias e baixas latitudes, o modelo de ocorrência diárias apresenta um máximo ao meio-dia.

A frequência de ocorrência das Pc4 aumenta quando conforme a atividade solar decai, contudo suas amplitudes permanecem praticamente constantes ao longo do ciclo solar. Devido à característica de manter suas amplitudes constantes durante a diminuição da atividade solar, as Pc4 são mais dominantes nesses períodos que as Pc3.

II.12.4 – PULSAÇÕES CONTÍNUAS Pc5

Este tipo de pulsação apresenta períodos mais longos, entre 3 a 9 minutos, assim como grandes amplitudes que podem alcançar centenas de nT. Apresenta uma forma senoidal, normalmente amortecida com algumas distorções, aparecendo com o aumento das atividades magnéticas.

II.12.5 – PULSAÇÕES IRREGULARES Pi1

As Pi1 apresentam formas irregulares e tem período normalmente menor que 15 segundos (6 a 10 s). Suas amplitudes atingem valores máximos nas zonas aurorais e sua intensidade diminui rapidamente junto com a latitude. São mais facilmente observadas no início da manhã e no final da noite. Devido aos lentos distúrbios do Campo Geomagnético, estas oscilações assemelham-se a microesculturas.

II.12.6 – PULSAÇÕES IRREGULARES Pi2

As Pi2 são pulsações com formas irregulares e períodos entre 40 e 150 segundos, apresentando amplitudes na ordem de 1 a 5 nT. Suas principais características são o pequeno intervalo de duração e a superposição com as Pi1, que ainda podem ser seguidas pelas pulsações contínuas Pc1.

CAPÍTULO III

CONCEITOS FÍSICOS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

III.1 – MATERIAIS MAGNÉTICOS

A origem de campo e fluxo magnético nos diversos materiais existentes são basicamente de três espécies: movimento orbital dos elétrons em torno do núcleo; spin dos elétrons e spin nuclear. O efeito de cada uma dessas três características, principalmente as duas primeiras, é a classificação dos materiais quanto a sua magnetização:

- *Diamagnéticos:* o campo criado pelo movimento orbital e spin dos elétrons se cancelam mutuamente a nível atômico, mas a presença de um campo magnético exterior cria um desequilíbrio no campo resultante. Estes materiais apresentam permeabilidade magnética relativa inferiores à unidade. Ex.: hidrogênio, hélio, cobre, ouro, germânio, grafite.
 - *Paramagnéticos:* nestes materiais não há um cancelamento a nível atômico do campo magnético, cada átomo apresenta um campo resultante não-nulo, mas o material apresenta um fluxo nulo devido à aleatoriedade da organização de cada campo atômico. Na presença de um campo magnético externo, os campos individuais dos átomos orientam-se no mesmo sentido, resultando em um aumento do fluxo magnético no interior do material. Ex.: potássio, oxigênio, tungstênio, etc.
 - *Ferromagnéticos:* nestes materiais as forças inter-atômicas conduzem a uma orientação dos campos magnéticos em quantidades relativamente extensas, designados por domínios magnéticos, mas que devido as respectivas orientações
-

aleatórias, somam um campo magnético resultante nulo. A aplicação de um campo externo leva a uma coordenação dos domínios constituintes do material, sendo responsável pelo acréscimo de campo magnético no interior do material. Contudo, quando o campo magnético aplicado é retirado, os domínios entram novamente em uma orientação aleatória, distinta das iniciais, podendo assim surgir um campo magnético remanescente diferente de zero. Este fenômeno é explicado pelo ciclo de Histerese, que será citado a diante. Ex.: ferro, níquel, cobalto, etc.

III.2 – INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO

A associação entre campo magnético e corrente elétrica foi descoberta por Hans Orsted em 1819, quando acidentalmente este descobriu que a agulha de uma bússola alterava sua orientação quando próxima a um fio com uma determinada corrente. O campo magnético (H) gerado por uma corrente (I) transitando em um fio gera linhas de campo concêntricas, que orientam a agulha da bússola.

Mais tarde foi formulada uma relação que determinava a proporção entre o campo magnético (H) e a corrente elétrica fluindo num fio e inversamente proporcional a distância do fio, dada por:

$$I = 2\pi \cdot r \cdot H \quad (\text{Eq.3.1})$$

A Lei de Ampère veio a seguir: “*Para qualquer caminho fechado c que contorne uma área S através da qual flua uma corrente I , a integral de linha da componente da intensidade magnética H ao redor deste caminho é igual a corrente I* ”.

$$\oint_c H \cdot dl = I = F_{mm} \quad [\text{A}] \quad (\text{Eq.3.2.a})$$

Na equação 3.2, F_{mm} é a chamada força magnetomotriz que é igual a corrente. Se o caminho de integração envolve um conjunto de espiras de fio, onde em cada espira flui uma corrente de mesmo sentido a relação é multiplicada pelo número de espiras.

$$\oint_c H \cdot dI = N \cdot I = F_{mm} \quad [A] \quad (\text{Eq.3.2.b})$$

onde:

N = número de espiras

I = corrente em cada espira

A corrente que flui em um fio gera ao redor deste um campo magnético radial orientado, originado no centro do fio. A figura a baixo mostra a orientação magnética ao redor de um fio linear com uma corrente I circulando pelo mesmo.

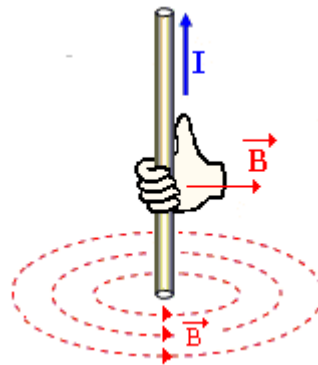


Figura 3.1 – Campo magnético ao redor de um fio
Fonte: <http://fisicando.br.tripod.com/fisica/eletromag.htm>

III.3 – DENSIDADE DE FLUXO E FLUXO MAGNÉTICO

A densidade de fluxo magnético \mathbf{B} é conceitualmente associada a força mecânica exercida sobre uma carga elétrica em movimento quando esta se encontra submersa em um campo. A existência dessa força pode indicar a presença do campo magnético, sua direção e magnitude.

Se um movimento de íons ou elétrons constitui uma corrente cuja densidade é \mathbf{J} , então a força \mathbf{F} exercida nos íons é dependente do ângulo entre \mathbf{J} e \mathbf{B} . A força é dada pelo produto vetorial do de:

$$\vec{F} = \vec{J} \otimes \vec{B} \quad (\text{Eq.3.3.a})$$

Sendo o módulo de \mathbf{F} :

$$F = J \cdot B \cdot \sin \theta \quad (\text{Eq.3.3.b})$$

No sistema SI a unidade de densidade de fluxo é dada por N/Am (Newton por Ampère –metro), que equivale ao Tesla (T). No sistema CGS é encontrada a unidade Gaus (G), sendo a relação dada por $1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$.

A densidade de fluxo magnético é também conhecida como “indução magnética” e se relaciona com a intensidade de campo magnético da seguinte forma:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad [\text{N/A.m} = \text{Tesla}] \quad (\text{Eq.3.4})$$

A densidade de fluxo define uma grandeza a qual a intensidade está diretamente ligada com o tipo e as características magnéticas do material que se encontra

imerso no campo, sobre tudo a sua permeabilidade as linhas de fluxo. A densidade de fluxo magnético é em geral expressa por:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (\text{Eq.3.5})$$

onde μ_r define uma constante chamada de permeabilidade relativa do material dada pela relação μ/μ_0 , sendo μ a permeabilidade do material.

O fluxo magnético através de uma determinada área é o produto desta área **A** pela componente **B** normal a esta área, ou seja, a quantidade de linhas de força que atravessam perpendicularmente uma dada superfície **S**.

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq.3.6})$$

sendo

ϕ = fluxo magnético que atravessa a área **A**;

B = módulo da densidade do fluxo magnético **B**;

α = ao ângulo formado pela reta perpendicular à área **A** e a direção de **B**.

A unidade de fluxo é dada por Newton-metro por Ampère (N.m/A), chamada de Weber (Wb) em homenagem ao físico alemão Wilhen Weber (1804 – 1891). Em termos desta unidade o Tesla, que é unidade de densidade de fluxo, equivale a 1Weber por metro quadrado ($1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$).

III.4 – FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA

Assim como se sabe que uma carga em movimento gera um campo magnético também sabe-se que uma alteração em um campo magnético deve dar origem a um campo elétrico. Este efeito é conhecido por indução eletromagnética, descoberto

por Michael Faraday (1791 – 1867). A diferença de potencial entre os extremos de um fio dobrado em forma de espira é igual a taxa de mudança do fluxo magnético através da espira.

$$fem = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Eq.3.7})$$

Fica clara pela derivada a cima que a indução de uma tensão em uma espira só ocorre no intervalo em que o fluxo magnético é variável no tempo.

III.5 – PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Campo magnético (**H**) e densidade de fluxo magnético (**B**) são grandezas distintas, que relacionam-se da seguinte forma no vácuo:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad [\text{N/A.m} = \text{Tesla}] \quad (\text{Eq.3.4})$$

Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (N/A}^2\text{)}$ é uma constante fundamental, denominada de permeabilidade magnética do vácuo. Apesar de a unidade de μ_0 possa ser escrita de diversas maneiras, a forma Newton por Ampère ao quadrado indica que a força magnética entre dois fios transportando corrente é proporcional ao produto das correntes de cada fio, daí o A^2 .

Para os meios materiais a relação entre **B** e **H** pode se tornar mais complicada, mas para diversos casos a simplificação a baixo pode ser utilizada:

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{N/Am} = \text{Tesla}) \quad (\text{Eq.3.8})$$

Onde μ é a permeabilidade magnética do material em questão.

Materiais com alta permeabilidade ($\mu \gg \mu_r$) são muito utilizados na construção de transformadores, sensores magnéticos e confecção de blindagens magnéticas. A característica imprescindível para esta larga utilização destes materiais é de conseguirem concentrar uma alta densidade de fluxo mesmo para um pequeno valor de campo **H**.

III.6 – FERROMAGNETISMO

Materiais ditos ferromagnéticos apresentam uma magnetização espontânea em pequenas regiões, resultante do alinhamento dos dipolos magnéticos em um determinado sentido, mesmo que não haja presença de um campo externo. Essa magnetização espontânea é variável com a temperatura, alcançando seu máximo no zero absoluto (0 K) e cai a zero a cima da chamada temperatura Curie, que é diferente para cada material. A cima da temperatura Curie (T_c) materiais ferromagnéticos passam a comportar-se como paramagnéticos. Alguns exemplos:

- Ferro: Temperatura de Curie: 770°C
 - Cobalto: Temperatura de Curie: 1075°C
 - Níquel: Temperatura de Curie: 365°C
 - Gadolínio: Temperatura de Curie: 15°C
-

III.7 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Um material ferromagnético não apresenta todo seu volume magnetizado numa mesma direção, mas sim alinhado em pequenas regiões chamadas de domínios magnéticos. Estes podem ser orientados ao acaso uns em relação aos outros, ocasionando assim uma magnetização nula a nível macroscópico do material. Por este fato é que a magnetização de um material ferromagnético só é observada se houver a presença de um campo magnético externo.

Pode se tomar como exemplo o ferro que em seu estado normal não magnetizado é constituído de diversos domínios magnéticos. Estes domínios são regiões microscópicas, nas quais o alinhamento dos dipolos magnéticos é quase perfeito, mas a orientação de cada domínio é diferente da orientação dos domínios da sua vizinhança. Assim, numa amostra macroscópica, há um número muito grande de domínios orientados em várias direções e sentidos, de modo que ela se apresenta macroscopicamente desmagnetizada.

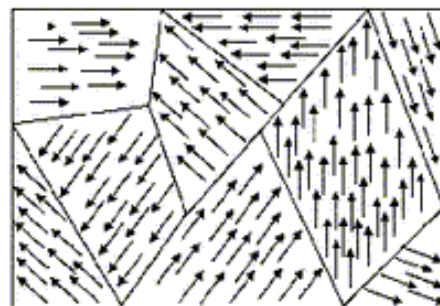


Figura 3.2 – Domínios magnéticos aleatórios

Fonte: http://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico

Quando esta amostra é magnetizada pela aplicação de um campo magnético externo, ocorrem dois efeitos. O primeiro deles é o crescimento do número de domínios alinhados ao campo, em detrimento e às custas dos domínios orientados de modo desfavorável. Diz-se que nesse caso ocorreu um deslocamento das fronteiras dos domínios.

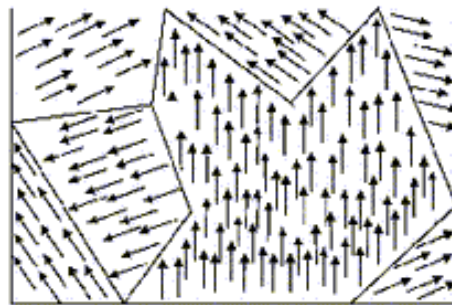


Figura 3.3 – Domínios magnéticos deslocamento de fronteiras
Fonte: http://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico

O segundo efeito ocorre para campo magnéticos intensos e corresponde a uma rotação da direção de magnetização dentro de um domínio, no sentido da direção do campo externo. Assim o corpo fica magnetizado pela rotação dos domínios cujas orientações são desfavoráveis ao campo. Este processo é irreversível. Isto ocorre para campos grande intensidade.

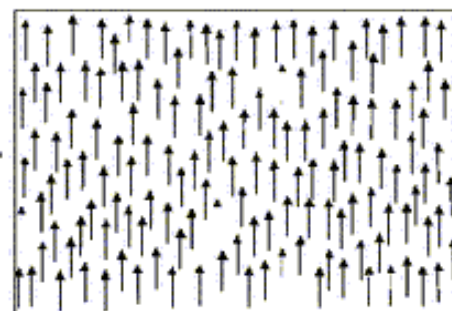


Figura 3.4 – Rotação de domínios
Fonte: http://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico

Quando aplicado pela primeira vez um campo magnético em um material ferromagnético e logo após este é removido, geralmente a magnetização do corpo não volta a zero. Isto ocorre por que os domínios não retornam totalmente as posições originais após a retirada do campo externo. Este fenômeno é conhecido por efeito de histerese. Embora os materiais ferromagnéticos apresentem este comportamento, para campos suficientemente fracos, onde o processo de magnetização é suave, este fenômeno pode ser reversível resultando na volta as posições originais de cada domínio quando cessa a atuação do campo externo.

III.8 - HISTERESE

O efeito de histerese pode ser entendido com base no comportamento dos domínios magnéticos quando expostos a campos externos. A movimentação e reorientação dos domínios não são totalmente reversíveis. A curva de magnetização de um material ferromagnético não se repete (não percorre o mesmo “caminho”) quando o campo magnético externo **H** aumenta até certo ponto e logo depois diminui até ao seu valor inicial.

Este efeito pode ser melhor entendido observando-se a magnetização de um núcleo ferromagnético dentro de uma solenóide enquanto se aumenta a corrente do enrolamento. O campo magnético efetivo **B**

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M \quad (\text{Eq.3.9})$$

existente no interior do solenóide, é normalmente muito maior que o campo **H**, gerado pela corrente no enrolamento, já que para o caso de materiais ferromagnéticos, a magnetização **M** é muito maior que **H**.

Analisando a curva de magnetização do material ferromagnético:

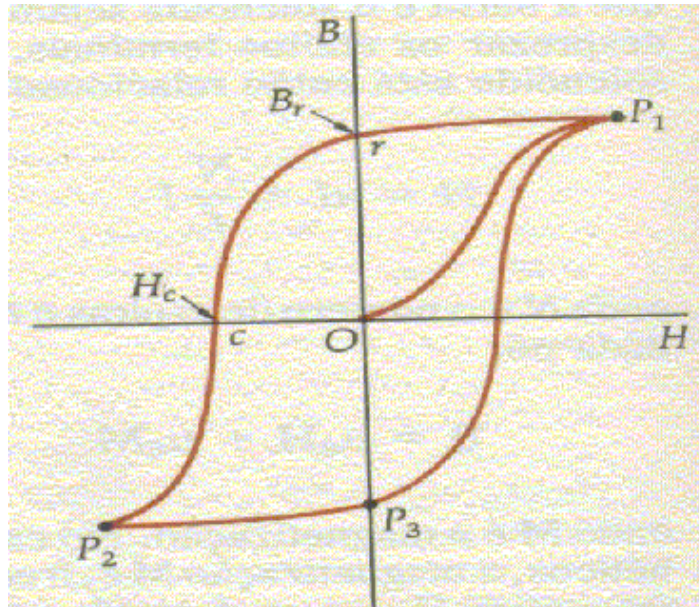


Figura 3.5 – Curva de histerese

Fonte: http://www.tonettinho.pop.com.br/biblioteca/Eleotecnica_cap4.pdf.pdf

sendo:

- **P_1 e P_2 , PONTO DE SATURAÇÃO:** É o ponto em que o material está com seus dipolos magnéticos totalmente orientados em um único sentido.
- **MAGNETISMO RESIDUAL (B_r):** É o magnetismo que permanece no corpo mesmo na ausência do campo indutor.
- **FORÇA COERSITIVA (H_c):** É a intensidade de campo magnético aplicada em sentido contrário para desfazer o magnetismo residual.

A partir do ponto **O**, no qual o material não está magnetizado, a medida que **H** aumenta, **B** aumenta seguindo o caminho **OP₁**. O fato da curva tender a horizontal próximo do ponto **P₁** indica que a magnetização está próxima do seu valor de saturação **M_s**, quando todos os dipolos atômicos estão alinhados. Reduzindo o campo até que **H** se anule, observa-se que a volta da curva não coincide com o caminho de “ida”. Quando **H**



é nulo, o valor do campo magnético efetivo é chamado de *campo residual* ou *remanência Br*. Invertendo o sentido da corrente no solenóide, o campo magnético efetivo **B** diminui até zero. O valor necessário de **H** para reduzir **B** até zero novamente é a **força coerciva Hc**.

CAPÍTULO IV

SENSORES PARA DETECÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

IV.1 – TIPOS DE MAGNETÔMETROS

Os magnetômetros podem ser divididos basicamente em dois grupos principais, os sensores de escalares e os vetoriais. Como os próprios nomes já supõem, os magnetômetros escalares informam somente a intensidade do campo medido, sendo que os vetoriais podem informar também a direção do campo total.

- Magnetômetros escalares: medem a intensidade do campo. Ex.: magnetômetros de indução, precisão de prótons, bombeamento óptico.
- Magnetômetros vetoriais: contém as componentes nas três direções, informando a intensidade e a direção do campo. Ex.: sensores de efeito Hall, SQUIDs, fluxgate (fluxo saturado).

IV.2 – MAGNETÔMETRO DE INDUÇÃO

Este é um dos tipos de magnetômetros mais simples, se não o mais simples utilizado para medição de campos magnéticos. Seu princípio de funcionamento está baseado na Lei de indução de Faraday, que determina o aparecimento de uma força eletromotriz induzida quando uma espira é exposta a variação de fluxo magnético.

Os magnetômetros de indução podem na verdade utilizar-se de duas técnicas para realizar a medição de um campo magnético. Em um tipo é utilizado o artifício de girar as espiras do sensor na presença do campo magnético, de forma a criar uma

variação do fluxo. Dessa forma é possível obter-se o valor absoluto do campo, mas as partes e peças giratórias do magnetômetro geram problemas de vibração e alto ruído nas medidas. Por estes motivos esse tipo de técnica é muito pouco utilizada.

Outro modo mais simples e robusto é a utilização de bobinas de indução, que são capazes de medir apenas as variações do Campo Geomagnético e não seu valor absoluto. A sensibilidade desses sensores é limitada por variações nas tensões ao longo do fio, causadas pela concentração local de elétrons em equilíbrio termodinâmico, conhecido por ruído de Nyquist. Estes magnetômetros também são usados para medição de Pulsões Geomagnéticas.

IV.3 – MAGNETÔMETROS SUPERCONDUTORES

Os chamados SQUID – *Superconducting Quantum Interference Device* – são equipamentos de alta sensibilidade usados para medição de campos extremamente pequenos. Seu princípio de funcionamento é baseado na supercondutividade, no efeito Josephson e na quantização do fluxo magnético.

O magnetômetro SQUID é formado por um anel supercondutor com duas junções Josephson. Uma corrente elétrica dc é então aplicada e se divide entre cada junção. A aproximação de um campo magnético externo faz com que a corrente crítica aumente ou diminua, passando por máximos e mínimos dependendo do acréscimo de quanta de fluxo. O mínimo da corrente deve corresponder a um acréscimo de meio quanta de fluxo. Essa variação de corrente se reflete no mesmo modo na tensão gerada nos terminais do SQUID.

Um magnetômetro SQUID normalmente utiliza dispositivos auxiliares, tais como transformadores de fluxo e gradiômetros fazendo aumentar sua sensibilidade. Este tipo de magnetômetro é bastante caro e exige resfriamento com nitrogênio líquido para

aplicação dos efeitos da supercondutividade, o que dificulta seu uso e manutenção, sendo pouco utilizados em pesquisas geomagnéticas.

IV.4 – MAGNETÔMETROS DE EFEITO HALL

Um condutor com uma certa corrente é imerso em um campo magnético, fazendo com que as cargas desse condutor sofram ação de uma força devido a esse campo. As cargas portadoras são defletidas para o lado de baixo do condutor, criando uma diferença de potencial no condutor. Os elétrons são forçados para baixo pela ação do campo magnético, tornando o topo do condutor positivo em relação a parte de baixo. Isto faz com que seja gerado um campo elétrico com sentido para baixo no condutor, criando uma força que atua nas cargas com sentido para cima, freando os elétrons. O equilíbrio é alcançado quando a força elétrica é igual à força magnética.

Magnetômetros de efeito Hall são pouco empregados em estudos para medição do Campo Geomagnético devido a sua baixa sensibilidade. Por outro lado esse tipo de sensor magnético é bastante usado para medidas de campos com alta intensidade devido a sua simplicidade e eficiência.

IV.5 – MAGNETÔMETROS DE FLUXO SATURADO – FLUXGATE MAGNETOMETER

Os magnetômetros do tipo fluxgate medem a magnitude e direção de campos magnéticos. Estes equipamentos têm seu funcionamento baseado no surgimento de uma força eletromotriz nos terminais de uma bobina detectora. Essa força tem origem devido a variação de fluxo magnético referente a um campo H_{ext} , o qual se deseja medir. No entanto, se não existe variação de fluxo magnético, nenhuma *fem* (força eletromotriz induzida) é gerada.

A variação do fluxo magnético pode ser espontânea se o campo externo for variável no tempo, ou provocada por variação da permeabilidade do meio, da área da bobina detectora ou rotação da mesma no campo. Para medidas do Campo Geomagnético geralmente não são usadas as técnicas de variação de área da bobina e nem a rotação do sensor, sendo a variação de permeabilidade do meio o método mais aplicado para estes tipos de medidas.

Os núcleos dos magnetômetros de fluxo saturado são feitos de certas ligas magnéticas moles com alta permeabilidade, fazendo com que as linhas de campo externo concentrem-se no seu interior. Dessa forma, o fluxo que atravessa a bobina detectora ao redor desse núcleo será muito grande. Se por alguma razão a permeabilidade do núcleo diminuir repentinamente, o campo deixará de se concentrar dentro da espira e o fluxo total diminuirá. Nesse instante, a variação do fluxo magnético induz uma força eletromotriz na bobina e uma conseqüente tensão induzida nos seus terminais, variação esta que é proporcional ao campo externo.

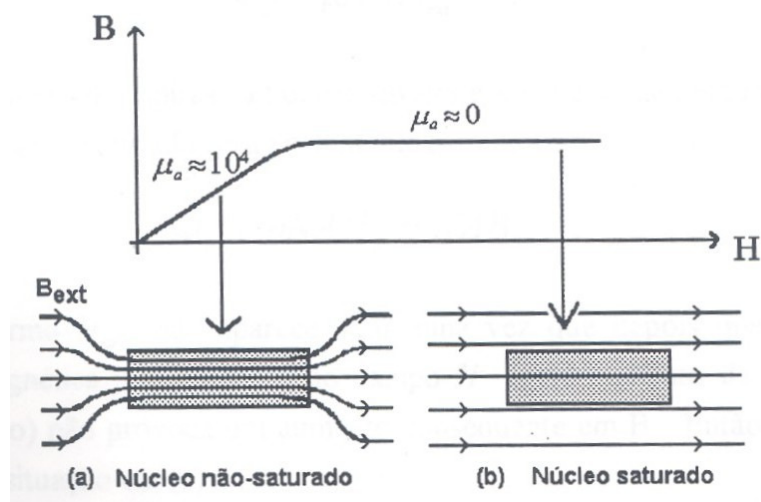


Figura 4.1 – Saturação do núcleo

Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos

O controle da permeabilidade do núcleo é feito através de um campo magnético adicional, denominado campo de excitação, gerado através de um enrolamento chamado enrolamento de excitação ou simplesmente enrolamento primário. Quando não há corrente passando pelo primário, a permeabilidade do núcleo é a própria permeabilidade do material, que pode ser de valores muito altos para alguns materiais ferromagnéticos. Se uma corrente suficientemente alta for aplicada no primário de tal forma a gerar um campo magnético maior que o campo de saturação do material, então a permeabilidade do núcleo decresce à valores próximos ao da permeabilidade do vácuo, como se o núcleo não estivesse mais no interior da bobina.

A bobina detectora, ou enrolamento secundário, é posta envolvendo o núcleo e a bobina de excitação. Dessa forma o secundário detecta a variação do fluxo magnético no momento em que a permeabilidade do núcleo muda. Cada vez que o núcleo passa da condição de saturado para não saturada ou vice-versa, as linhas de campo magnético que cortam as espiras da bobina detectora induzem pulsos. Desta forma, dois pulsos são gerados a cada ciclo, obtendo-se um sinal com frequência duas vezes maior que a frequência de excitação. A amplitude e a fase de cada harmônico do sinal presente no secundário, são proporcionais à magnitude e à polaridade do campo magnético externo presente ao longo do eixo do enrolamento secundário.

IV.5.1 – GEOMETRIA DOS SENSORES FLUXGATE

Todas as formas de detecção dos magnetômetros fluxgate fazem uso das propriedades não lineares de núcleos ferromagnéticos, obtendo variações de fluxo magnético pela variação da permeabilidade do material. Mesmo assim existem algumas peculiaridades que para explicar a operação e funcionamento dos magnetômetros fluxgate, e cada uma delas pode estar ligada a geometria do sensor, as formas de excitação do núcleo, as formas de detecção, etc.

IV.5.1.1 – NÚCLEO LINEAR SIMPLES

Os sensores com um único núcleo linear são os mais simples entre os magnetômetros fluxgate. São compostos por uma barra linear de material ferromagnético com duas bobinas enroladas sobre ele. Uma bobina é chamada de *enrolamento primário* ou *bobina de excitação* e a outra de *enrolamento secundário* ou *bobina de detecção*. O enrolamento primário é responsável por gerar o campo magnético adicional que leva o núcleo ao estado de saturação, e o enrolamento secundário detecta a variação de fluxo magnético no meio.

Para se medir um campo externo H_{ext} , basta fazer a análise dos instantes anteriores e posteriores da saturação do núcleo para se obter uma medida. O fluxo magnético detectado no enrolamento secundário no momento em que o núcleo não encontra-se saturado será dado pela seguinte equação:

$$\varphi_1 = uNAH_{ext} \quad (\text{Eq.4.1})$$

O fluxo magnético depende da permeabilidade do núcleo, do número de espiras do secundário, da área transversal da bobina e do campo magnético externo. Como temos a seguinte relação:

$$B_{ext} = uH_{ext} \quad (\text{Eq.4.2})$$

Logo:

$$\varphi_1 = NAB_{ext} \quad (\text{Eq.4.3})$$

Em um segundo momento, onde o núcleo está sendo saturado, temos dois campos atuando sobre ele. Agindo sobre o núcleo tem-se o campo provocado pela bobina primária H_s e mais o campo externo H_{ext} .

$$\varphi_2 = uNA(H_{ext} + H_s) = NAB_s \quad (\text{Eq.4.4})$$

Sabendo-se que, para a curva de histerese de um material ferromagnético, um aumento na intensidade do campo H_s não provoca aumento na densidade do campo saturado B_s , visto que está se trabalhando na região não linear da histerese. Sendo assim, aplicando H_s resulta B_s e logo se for aplicado $H_{ext}+H_s$, o resultado será B_s da mesma forma.

Finalmente, fazendo-se a diferença entre os fluxos nos dois instantes analisados obtém-se:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = NA(B_s - B_{ext}) \quad (\text{Eq.4.5.a})$$

ou

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = NA(B_s - uH_{ext}) \quad (\text{Eq.4.5.b})$$

Tendo-se em mão o valor da variação de fluxo, pode-se obter a força eletromotriz induzida na bobina de detecção.

IV.5.1.2 – NÚCLEO LINEAR DUPLO

O sensor com dois núcleos lineares segue a mesma análise feita anteriormente. As barras lineares são postas em antiparalelo, em sentido contrário.

O campo de saturação B_s deve ser idêntico ao campo de saturação gerado pelo outro em antiparalelo, menos pelo sinal. Uma bobina detectora que envolve os dois núcleos detectará um campo nulo em seu interior, uma vez que o campo de saturação nos núcleos é oposto e o campo resultante nulo.

Quando o núcleo do sensor encontra-se saturado, o fluxo se torna nulo:

$$\varphi_2 = uNA(-H_s + H_s) = 0 \quad (\text{Eq.4.6})$$

Assim a variação de fluxo total sofrida no núcleo será:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -uNAH_{ext} \quad (\text{Eq.4.7})$$

Pode-se dizer então que a variação do fluxo gerador da força eletromotriz induzida é dependente do campo externo H_{ext} a que se quer medir e a permeabilidade magnética do material. Quanto maior for a permeabilidade do núcleo maior será a variação de fluxo e portanto, maior será a sensibilidade do equipamento.

IV.5.1.3 – NÚCLEO EM ANEL

Os sensores em anel funcionam de maneira análoga ao sensor com dois núcleos lineares em antiparalelo, podendo ser considerado como duas semi-circunferências unidas. Devido a este tipo de geometria, os efeitos desmagnetizantes sofridos pelo núcleo são bastante reduzidos, visto que o caminho magnético é fechado, “circular”.

Além disso, existem outras vantagens em usarem-se os núcleo em anel:

- Tensões internas do material são uniformemente distribuídas;
- Permite o ajuste da assimetria do núcleo pela sua rotação no interior da bobina secundária;
- Não existem efeitos de borda, regiões que atuam como “antenas”, diminuindo assim o ruído;
- Maior facilidade de se obter a saturação do núcleo, visto que o circuito magnético de excitação é fechado;

IV.5.2 – MÉTODOS DE DETECÇÃO E ANÁLISE DO SINAL

Um dos métodos de detecção das componentes do Campo Geomagnético consiste em usar a diferença entre os valores de pulso positivo e negativo (Acuña and Pellerin, 1969). Pellen (Pellen, 1966) usa o pulso negativo e positivo de corrente saturando o núcleo, para achar a componente de campo axial. O método de detecção por pico baseia-se no fato da tensão de saída do sensor na presença de um campo magnético ter o valor de pico aumentado numa polaridade e diminuído na outra. A diferença entre os picos é zero para um sensor imerso num campo nulo. Dentro de uma banda estreita

escolhida para a operação, essa diferença entre picos depende linearmente do campo medido.

Outro método utilizado é o de atraso de fase, o qual parte do princípio da mudança na curva de magnetização por um campo magnético externo, fazendo com que a fase dos picos de tensão na saída do sensor sejam alteradas. Assim mede-se o atraso de fase de cada pico (em relação à excitação), e a diferença entre os atrasos nos instantes de magnetização positiva e negativa, é proporcional ao campo magnético externo medido.

IV.5.3 – MAGNETÔMETRO DE SEGUNDO HARMÔNICO REALIMENTADO

Este tipo de magnetômetro tem o sensor como um detector de campo nulo colocado dentro de uma bobina de cancelamento de campo. A vantagem desta técnica de balanceamento é que o nulo do sensor é muito mais estável do que o sensor com uma saída qualquer para algum campo axial não nulo.

Em sensores reais, o desacoplamento entre a bobina de excitação e a bobina sensora não é ideal, como resultado aparecem grandes componentes da frequência fundamental e seus harmônicos ímpares da corrente de excitação realimentada. Além disso é gerado um alto ripple na saída do detector de fase, podendo os harmônicos ímpares causarem, para altos ganhos, a saturação dos amplificadores e em outros casos gerar apenas uma tensão de offset. Por este motivo costuma-se introduzir um filtro banda passante sintonizado no segundo harmônico da frequência de excitação, antes do detector de fases. Dos harmônicos pares, o segundo harmônico é o que dá a maior sensibilidade.

IV.5.3.1– O SENSOR E A BOBINA DE REALIMENTAÇÃO

Embora seja possível utilizar a bobina detectora (secundário) para gerar o campo de realimentação, há uma série de vantagens em se fazer a realimentação por uma bobina separada, porque:

- A bobina de realimentação deve gerar um campo de nulo homogêneo, o que é dificultado pelo acoplamento próximo ao fluxo do núcleo. Uma realimentação não homogênea faz um sinal cossenoidal fora de fase aparecer na saída (Felch and Potter, 1953).
- A impedância de saída da fonte de corrente de realimentação carregará a bobina detectora e atenuará o sinal de saída. Necessita-se uma bobina que de um campo de realimentação DC altamente uniforme e que tenha um coeficiente de acoplamento muito baixo com o fluxo do núcleo do sensor.

Ao usar uma bobina detectora também como realimentação, o eixo magnético dependeria do eixo da bobina de realimentação e do eixo do núcleo. Um mau alinhamento entre os eixos introduziria sensibilidade a campos perpendiculares ao eixo da bobina de realimentação. Fortes campos perpendiculares não compensados podem afetar a estabilidade de zero do sensor.

Um modo de se superar estes problemas é colocar os sensores num sistema de campo nulo tri-axial [Anderson, 1974, Adams et al 1976]. Os sensores são postos em um campo nulo constante, evitando assim efeitos de magnetização de campos transversais pertencentes a outros sistemas de nulos com outros eixos.

IV.5.4 – FLUXGATE CURTO CIRCUITADO

Normalmente os fluxgate apresentam a saída da bobina detectora conectada a um amplificador com uma alta impedância de entrada de tal forma que a tensão induzida nessa bobina seja a tensão de saída do detector. Outro método de acoplamento foi desenvolvido por Prindahl et al. (1989). Eles curto circuitaram a bobina detectora com um conversor tensão-corrente com uma impedância muito baixa. A amplitude dos pulsos de corrente é linearmente dependente do campo medido e teoricamente independente dos parâmetros da excitação.

A baixa impedância de entrada acaba com problemas devido as capacitâncias parasitas da bobina e do cabo. Além disso o projeto de um amplificador de entrada com baixo ruído é bastante simplificado.

IV.5.5 – MAGNETÔMETRO DE SEGUNDO HARMÔNICO SINTONIZADO

São muitas as discussões e duvidas que surgiram ao longo do tempo a respeito das vantagens de sintonizar o sinal proveniente da bobina secundária, carregando-a capacitivamente. Dessa maneira se teria um circuito RLC ressonante, que seja capaz de aumentar o nível de tensão na saída do sensor.

Os sensores fluxgate são basicamente constituídos de um núcleo ferromagnético de alta permeabilidade com uma bobina de excitação, chamada de primário e uma bobina sensora, chamada de secundário. O núcleo é periodicamente levado à saturação magnética por uma corrente de excitação alternada, de tal forma que o material perde a maior parte de sua permeabilidade magnética duas vezes a cada ciclo da excitação. A geometria formada pelo núcleo e o secundário são abertas aos campos

magnéticos externos. Já o circuito primário de excitação é fechado e desacoplado do secundário.

Devido a frequência de excitação que é induzida na bobina primária, uma tensão alternada com segundo harmônico e também harmônicos pares de ordem mais alta (4f, 6f, 8f, etc.) é induzida no secundário do sensor. Isto ocorre devido ao efeito combinado da intensidade do campo magnético externo e da mudança periódica da permeabilidade do núcleo. As amplitudes dos harmônicos pares são proporcionais à magnitude do campo magnético externo e dependendo do sucesso no desacoplamento entre o campo de excitação e a bobina detectora, primário e secundário, respectivamente, uma pequena quantidade de excitação e seus harmônicos ímpares de ordem mais alta estarão presentes, pelo assim conhecido efeito de transformador.

O sensor não é capaz de distinguir um campo externo real de campos originários de correntes fluindo no secundário. Assim pode-se anular o campo externo, realimentando esse campo com uma conveniente corrente de compensação no secundário, fazendo com que o sensor trabalhe em campo nulo. Sendo o sensor sintonizado no segundo harmônico da frequência de excitação, por um capacitor em paralelo à saída do secundário, então a amplificação do sinal de segundo harmônico resulta em dependência das perdas do circuito e de cargas externas [Acuña and Pellerin, 1969].

A performance do sensor fluxgate sintonizado no segundo harmônico é inferior a performance do sensor não sintonizado, exceto para tensão de saída que é maior para o sensor sintonizado, devido a:

- Alterações na curva de magnetização do núcleo e no nível de excitação afetarão a amplificação paramétrica do sensor sintonizado de segundo harmônico resultando em mudanças de fase e amplitude do sinal. O sensor não sintonizado mostrará menor variação de tensão de saída e consideravelmente menor variação de fase.
 - A amplificação paramétrica no sensor sintonizado causa ruídos adicionais na saída do sinal. Como o ruído do sensor não sintonizado é de uma a duas ordens de grandeza maior do que o ruído de entrada de um filtro/amplificador, então a relação sinal/ruído de um sensor não sintonizado será superior a daquele do sensor sintonizado.
 - Em aplicações onde o ruído e a estabilidade não são fatores tão importantes, a amplificação paramétrica num sensor fluxgate sintonizado no segundo harmônico, é um meio simples de filtrar e deixar maior o sinal vindo do secundário.
-

IV.5.6 – MAGNETÔMETRO DE HARMÔNICOS PARES

Prindahl (Prindahl et al.,1989) utilizou uma configuração de um magnetômetro curto-circuitado para testar o método de detecção utilizando todos os harmônicos pares. O motivo para a realização desse teste parece bastante razoável, já que se usa toda a informação contida no sinal sobre o campo magnético externo e não somente a informação contida no segundo harmônico. Dessa maneira seria possível que este tipo de detecção apresentasse uma melhor razão entre sinal e ruído que a detecção de segundo harmônico.

Caso o ruído em cada harmônico fosse completamente aleatório o método de detecção por todos os harmônicos pares deveria ser melhor que o método de segundo harmônico. Se o ruído tiver alguma correlação de fase, a contribuição de cada harmônico para o aumento do sinal detectado deve crescer na mesma proporção que o ruído total. Ripka [Ripka, 1990], ao comparar os resultados entre ambas as técnicas, concluiu que os métodos clássicos de detecção não podem ser substituídos por qualquer outro método em magnetômetros de baixo ruído. Mesmo que todos os componentes dos harmônicos pares carreguem mais informação sobre o campo medido, demonstrou-se que o método de detecção de segundo harmônico tem melhor relação entre sinal e o ruído.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXGATE

V.1 – DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

O sensor escolhido para ser estudado e para o desenvolvimento desta pesquisa foi um magnetômetro fluxgate de três eixos com núcleo magnético em anel. Este tipo de sensor é composto por duas bobinas em cada eixo, uma de excitação e outra de detecção do Campo. Cada sensor é ortogonal entre si, formando um eixo coordenado que é ajustado as componentes **H**, **D** e **Z** do Campo Geomagnético.

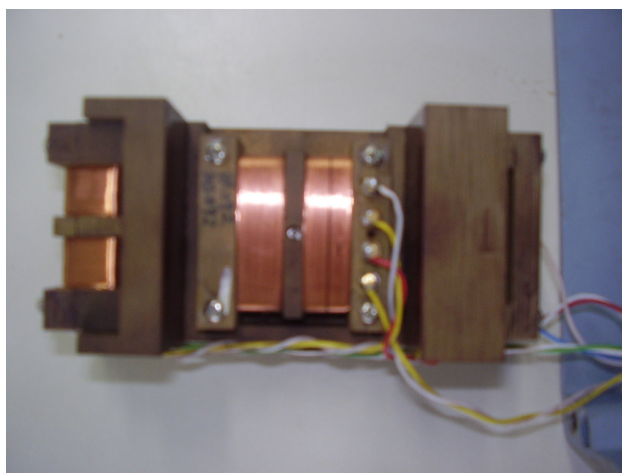


Figura 5.1 – Sensores do magnetômetro fluxgate
Fonte: Laboratório de Geomagnetismo – CRSPE/INPE – MCT

O núcleo ferromagnético utilizado neste magnetômetro é feito de uma liga metálica de Permalloy com alta permeabilidade magnética. Sua geometria toroidal garante que o caminho magnético percorrido pelo campo de excitação seja fechado, abrandando assim os efeitos de desmagnetização do núcleo e tornando a saturação do material mais fácil de ser alcançada.

Outra vantagem do núcleo em anel é que o ruído é reduzido pois não existem os efeitos de bordas, regiões que geralmente servem como “antenas” para ruídos externos.

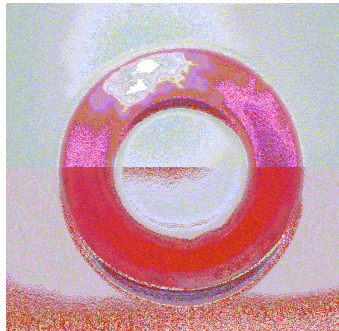


Figura 5.2 – Núcleo ferromagnético toroidal
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Este núcleo apresentado na figura 5.2 é industrializado pela companhia *Magnetics Div* e tem seu modelo com referencia 52106-1F. Apresenta um diâmetro de 3cm e uma altura de 6mm.

O sensor em si é formado pelo núcleo toroidal e por duas bobinas. O núcleo é enrolado pela bobina de excitação, ou primário, ao longo de toda sua circunferência, cobrindo toda área superficial possível. Ao redor do conjunto núcleo e bobina de excitação, fica enrolada num suporte não magnético a bobina de detecção. Esta é responsável por captar a variação de fluxo magnético gerada no núcleo do sensor.

Os enrolamentos primários estão ligados em série entre si para esta configuração do fluxgate, desta forma a mesma corrente de excitação que passa pelas três bobinas é a mesma.

O esquema geral de um sensor é apresentado na figura 5.3:

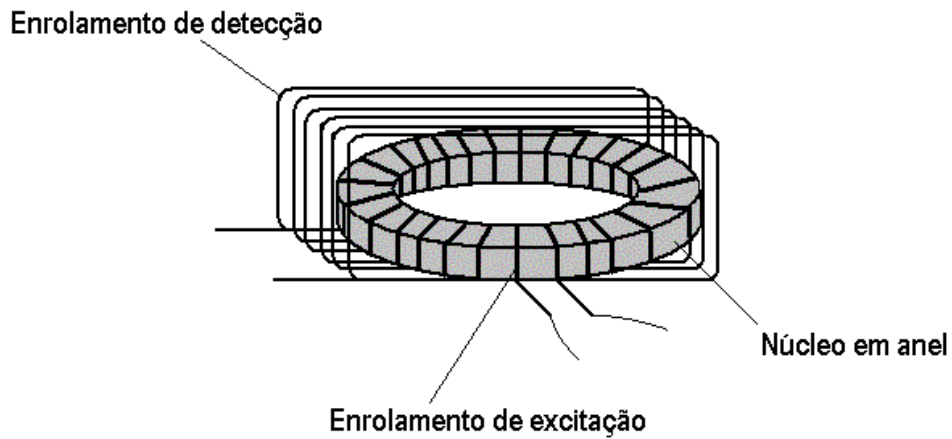


Figura 5.3 – Esquema do sensor magnético
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Vista frontal do sensor:

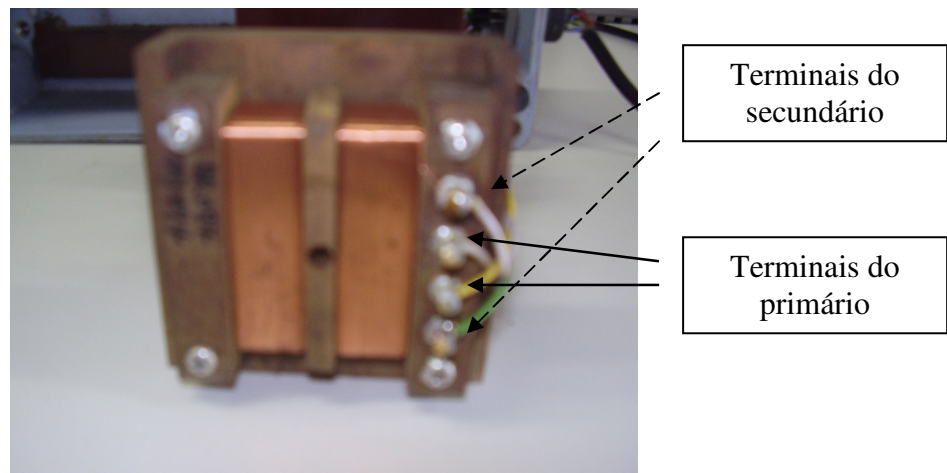


Figura 5.4 – Vista frontal do secundário
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Os três sensores ortogonais estão presos entre si por um suporte de material não ferromagnético de forma a não influir nas medidas. O suporte fica dentro de uma caixa blindada de dimensões 11,5x21,5x8,5 cm.

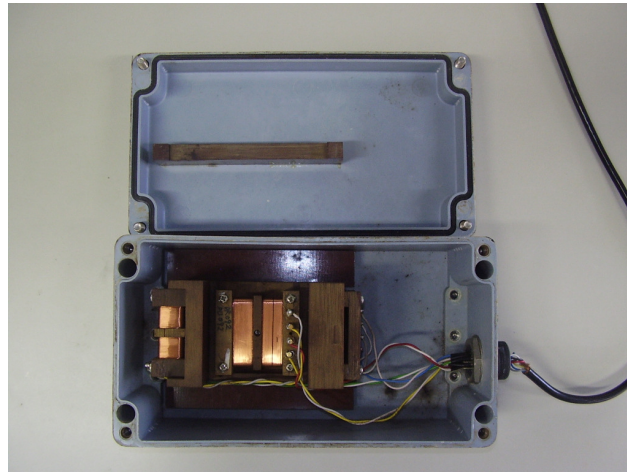


Figura 5.5.a – Magnetômetro Fluxgate

Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT



Figura 5.5.b – Magnetômetro Fluxgate

Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

V.2 – CIRCUITO ELETRÔNICO

O conjunto do circuito eletrônico utilizado para o protótipo do magnetômetro fluxgate de núcleo em anel tem basicamente três etapas. A primeira delas consiste na geração de um sinal periódico de frequência f que seja capaz de saturar o núcleo ferromagnético. Geralmente é utilizado sinal de tensão de forma quadrada para a excitação, pois esse formato de onda apresenta um melhor resultado na saturação do núcleo comparado a outros formatos de sinal. Como a tensão varia “instantaneamente” neste tipo de onda, pulsos de corrente são induzidos no primário, de forma a saturar o núcleo mais facilmente.

Utilizando um sinal de frequência f na saturação do núcleo, dois pulsos são gerados a cada ciclo de excitação em que o núcleo passa do estado de não-saturado a saturado. Portanto o sinal detectado no secundário será um sinal $2f$, com frequência dobrada em relação ao sinal de excitação f .

Na segunda etapa do circuito, onde se compara o sinal de excitação com o sinal detectado, se utiliza uma referência $2f$ retirada do circuito de excitação para ser feita a comparação do sinal. O circuito integrado 4053 que realiza essa comparação gera no seu par de saídas referente a cada sensor dois sinais em que a frequência destes corresponde ao segundo harmônico do sinal detectado. Como já foi visto, o segundo harmônico é o que mais sofre alteração devido à influência do Campo Magnético Terrestre, portanto utiliza-se a análise da variação do segundo harmônico para a detecção do Campo.

Após a comparação dos sinais, se faz a integração dos mesmos para obter-se uma tensão continua que tenha uma linearidade com a variação do sinal obtido no secundário. Na terceira etapa do circuito a diferença entre cada par do sinal obtido na saída do CI 4053 é integrada pelo circuito integrador, obtendo a relação de linearidade entre sinal detectado e variação do campo medido.

Após a obtenção do sinal contínuo na saída do circuito referente a cada eixo do sensor basta ser definida a relação de linearidade entre o sinal detectado e a variação do campo magnético. Definida esta relação pode ser utilizado um conversor analógico-digital ligado a um sistema de coleta para a gravação dos dados.

A descrição mais detalhada dos componentes utilizados e do funcionamento de cada parte do circuito será explicada e analisada nos próximos subtítulos.

V.2.1 – CIRCUITO E SINAL DE EXCITAÇÃO

O circuito de excitação consiste basicamente em um cristal oscilador e um circuito integrado divisor de frequência, no Projeto optou-se pelo CI 4060. O cristal fornece para o integrado uma certa frequência de oscilação para que seja gerado o sinal de excitação. Neste caso, foram utilizados tanto um cristal de 4 KHz quanto um de 16 KHz para serem realizados testes com o circuito.

O esquema de montagem dos componentes para o circuito de excitação é mostrado na Figura 5.6 abaixo:

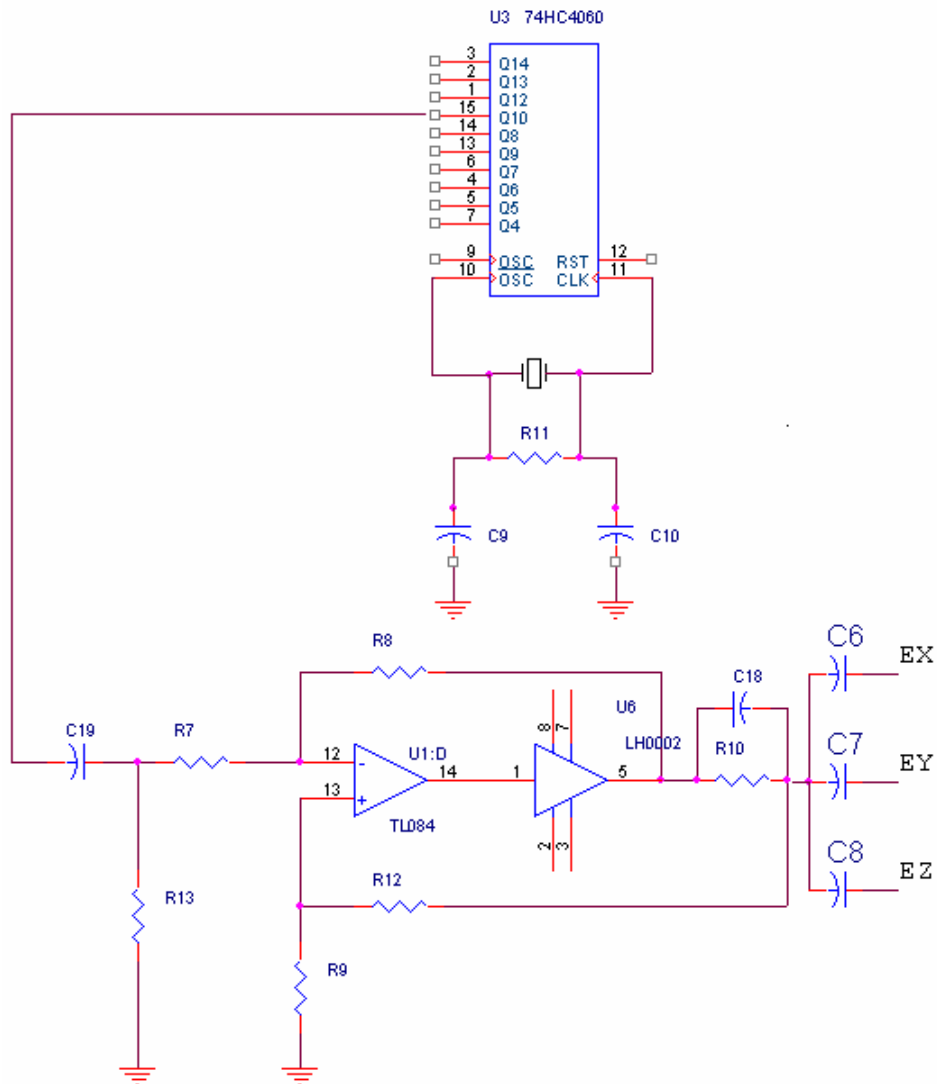


Figura 5.6 – Circuito de excitação

Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Onde EX, EY e EZ são as saídas do sinal de excitação para cada eixo do sensor.

A cada ciclo de saturação do núcleo são criados dois pulsos na bobina secundária, portanto é necessário que a comparação dos sinais seja feita com uma referencia com o dobro da frequência da excitação. O CI 4060 oferece duas frequências de saída, uma com sinal f que é a frequência fornecida pelo cristal oscilador e que será utilizado para a saturação do núcleo e uma com sinal $2f$ que vai então para o CI 74HC4053 onde será feita a comparação dos sinais detectados.

Abaixo temos a leitura por meio de um osciloscópio dos sinais de excitação utilizando-se um cristal de 16 KHz:

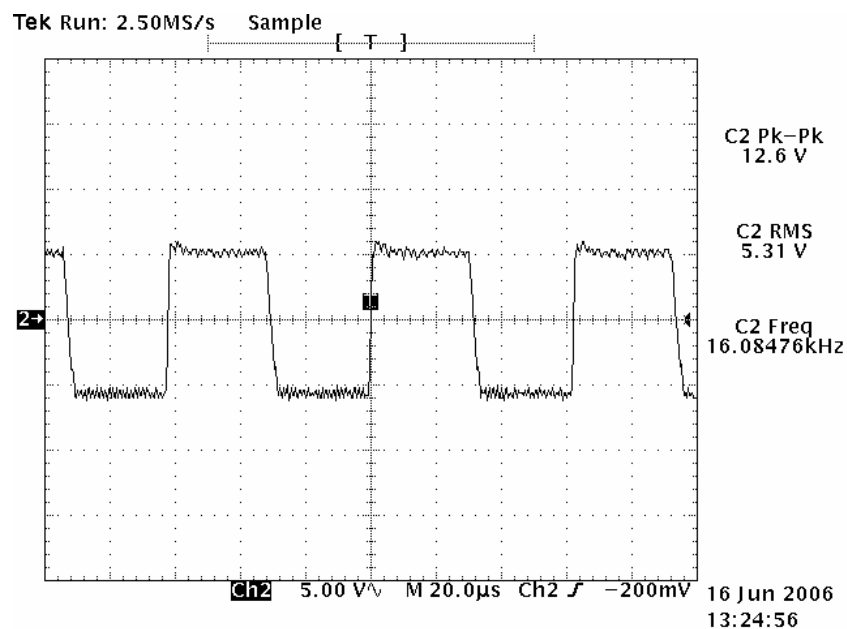


Figura 5.7 – Sinal de excitação com frequência de 16KHz
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Sinal de excitação utilizando um cristal de 4 KHz:

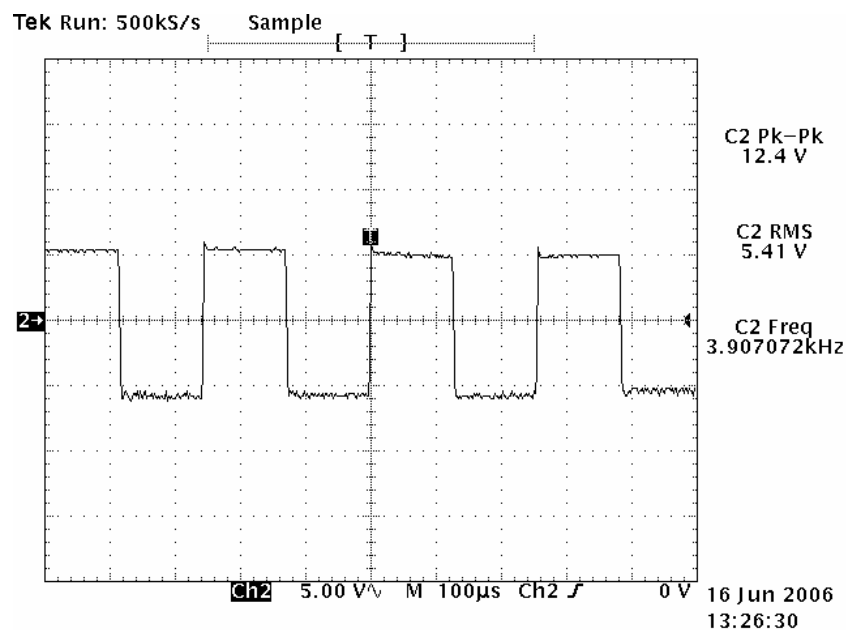


Figura 5.8 – Sinal de excitação com frequência de 4KHz
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Quando a excitação é conectada ao enrolamento primário há uma distorção do sinal quadrado devido à indutância da bobina de excitação. A figura 5.9 mostra a distorção do sinal de excitação para um cristal de 16 KHz

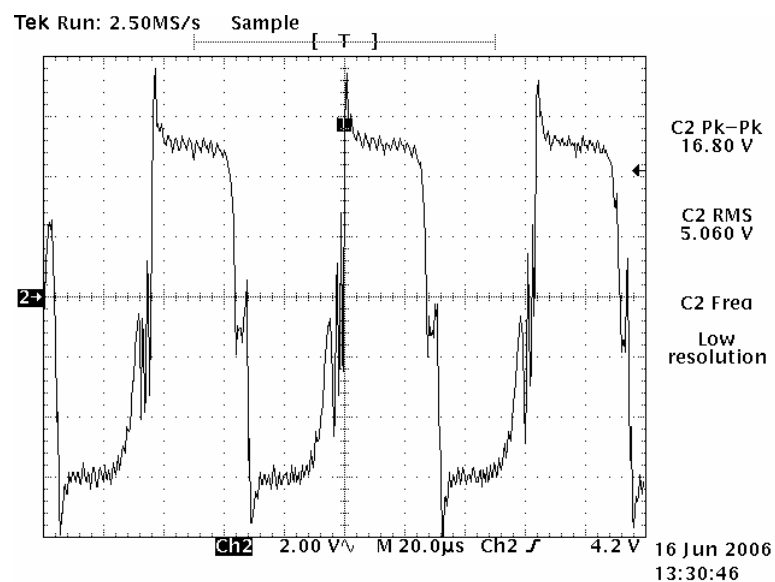


Figura 5.9 – Distorção do sinal de excitação com frequência de 16 kHz
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

A distorção do sinal de excitação para um cristal de 4 kHz é mostrada na Figura 5.10:

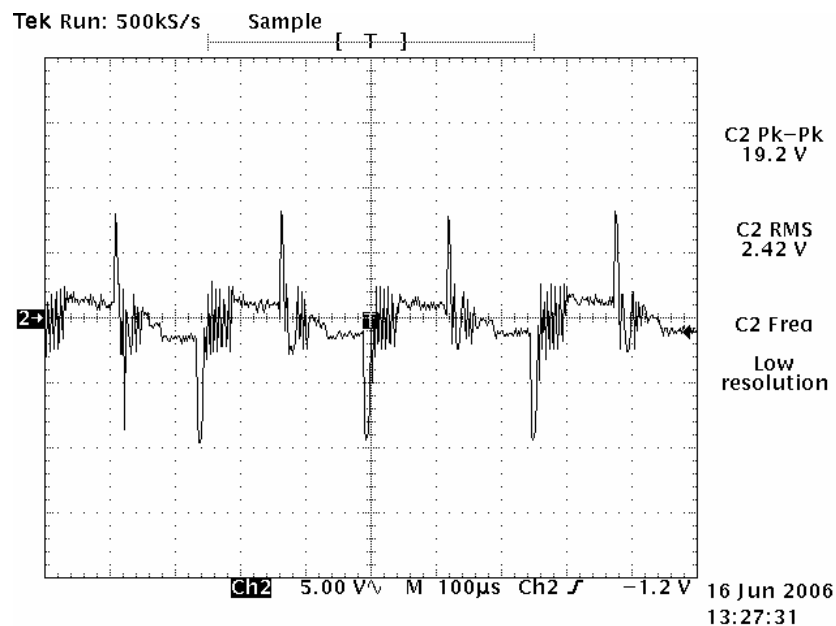


Figura 5.10 – Distorção do sinal de excitação com frequência de 4 KHz
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

V.2.2 – COMPARAÇÃO DOS SINAIS

Nesta etapa no circuito finalmente será analisado o sinal induzido na bobina detectora de cada sensor. Para esta configuração de arranjo dos sensores, utilizou-se um dos terminais do secundário ligado ao par de entrada do integrado e o outro ao terra virtual do circuito.

Para a análise dos sinais é utilizado um multiplexador analógico 74HC 4053 com três canais de entrada. Cada canal tem uma entrada para o sensor, uma entrada para a referência e um par de saídas. Como já se sabe o sinal induzido na bobina detectora apresenta uma frequência $2f$ em relação ao sinal de excitação. Uma vez que a frequência de excitação é conhecida, a referência $2f$ utilizada no 4053 é retirada do divisor de frequências 4060 que foi usado no circuito de excitação.

No par de saída do 4053 obtém-se dois sinais que apresentam uma relação entre a sua frequência e a frequência do segundo harmônico do sinal de entrada. Os sinais de saída embora apresentem a mesma frequência têm características distintas. O 4053 detecta a diferença das fases do segundo harmônico do sinal vindo do sensor e da referência. Este é um dos passos mais importantes no circuito eletrônico do magnetômetro.

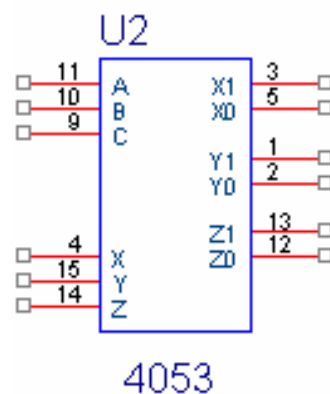


Figura 5.11 – Circuito integrado multiplexador
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Nos pinos 11, 10 e 9 é inserido o sinal $2f$ de referência. Os pinos 4, 15 e 14 são a entrada dos sinais vindo da bobina detectora. Os pares 3,5; 1,2 e 13,12 são os pares de saída.

V.2.3 – CIRCUITO INTEGRADOR

Após a obtenção dos sinais de saída do multiplexador analógico 74HC 4053, deseja-se obter um nível de tensão contínuo com base nestes sinais que carregam consigo as características do segundo harmônico. O objetivo é obter uma tensão de saída contínua que varie linearmente sua amplitude conforme as mudanças do Campo Magnético Terrestre. Dessa maneira essas variações podem ser mensuradas em termos da linearidade que existe entre a tensão de saída e a intensidade do Campo Magnético.

Para obter o sinal de tensão contínua é usado um circuito integrador que pode ser visto basicamente como a montagem inversora de um amplificador operacional. Apenas trocasse a resistência por um capacitor e tem-se o seguinte circuito:

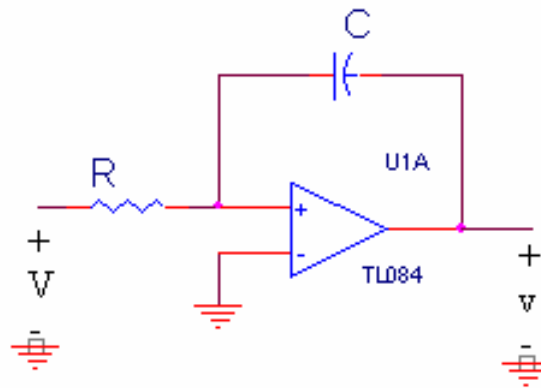


Figura 5.12 – Circuito Integrador
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Dessa forma a tensão de saída é proporcional a integral das tensões de entrada com.

V.3 – CIRCUITO E PLACA

Com a descrição de cada uma das etapas vitais a cima citadas para a implantação do circuito fluxgate, pode-se montar um layout completo do circuito. Para isso basta juntar os blocos de cada etapa entre si e adicionar eventuais filtros necessários entre cada bloco e outro.

Abaixo se tem o layout do circuito completo utilizado para a implementação do fluxgate de baixo ruído:

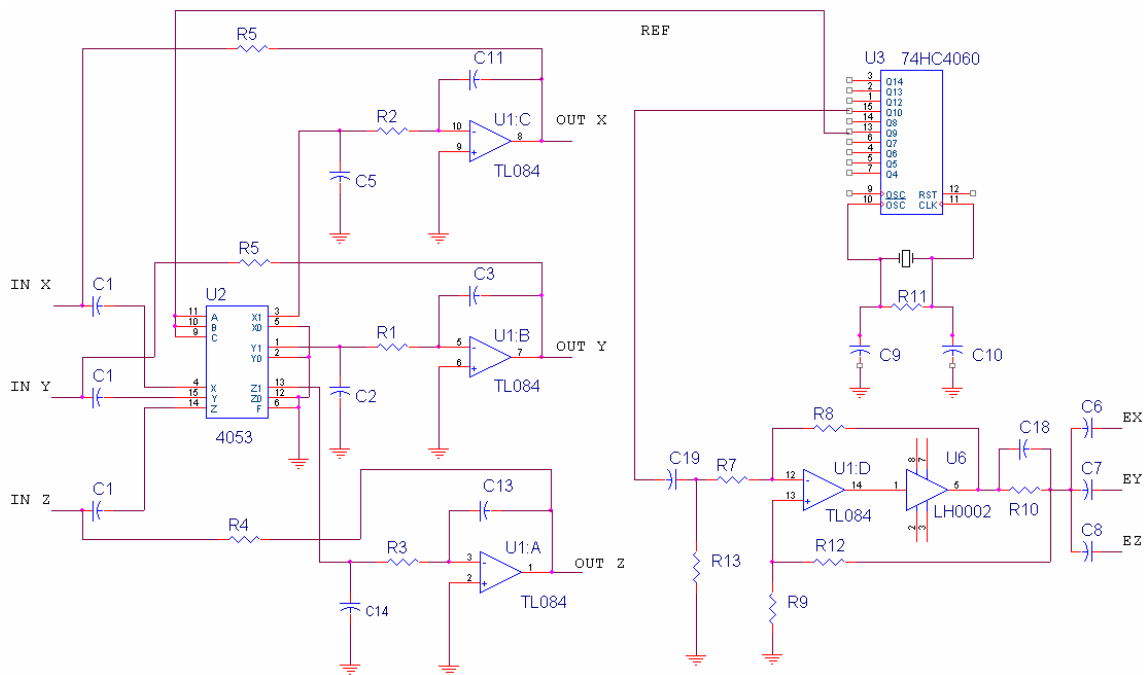


Figura 5.13 – Schematic do circuito de excitação e detecção
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Pode-se implementar este circuito em uma placa, utilizando um layout dupla face para que o circuito fique mais compacto.

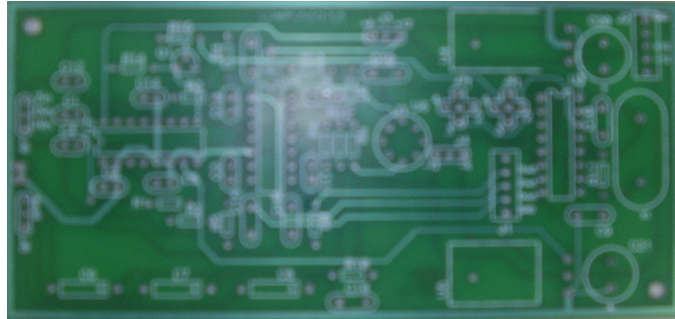


Figura 5.14.a – Placa impressa – lado dos componentes
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

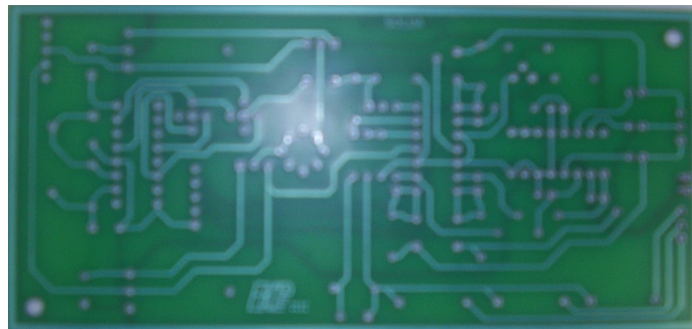


Figura 5.14.b – Placa impressa – da solda
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

No Anexo A serão apresentados novamente em maior escala a placa e o schematic do circuito.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

VI.1 – RESULTADOS OBTIDOS NO LABORATÓRIO

Inicialmente foram realizadas uma vasta pesquisa e revisão bibliográfica a respeito dos diversos tipos de magnetômetros e técnicas de detecção de campos magnéticos. Da mesma maneira foram estudados os fenômenos que envolvem todo o contexto físico e geofísico a respeito do Campo Magnético Terrestre. A partir da revisão bibliográfica foi possível o entendimento dos processos de detecção do Campo Geomagnético e então partir para o estudo da eletrônica empregada no Projeto.

Após a compreensão do funcionamento de cada parte do circuito eletrônico e do sensor fluxgate de núcleo em anel, teve começo a fase de montagem do circuito de excitação e detecção do magnetômetro. Foram utilizados dois pront-o-labor para a montagem dos componentes.

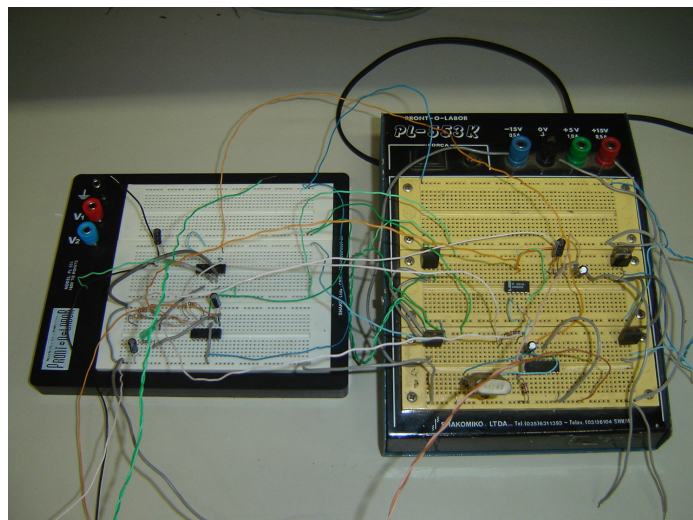


Figura 6.1 – Montagem do circuito nas pront-o-labor
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

O circuito de excitação montado teve respostas satisfatórias, demonstrando um melhor resultado com a frequência de excitação na faixa de 16 KHz.

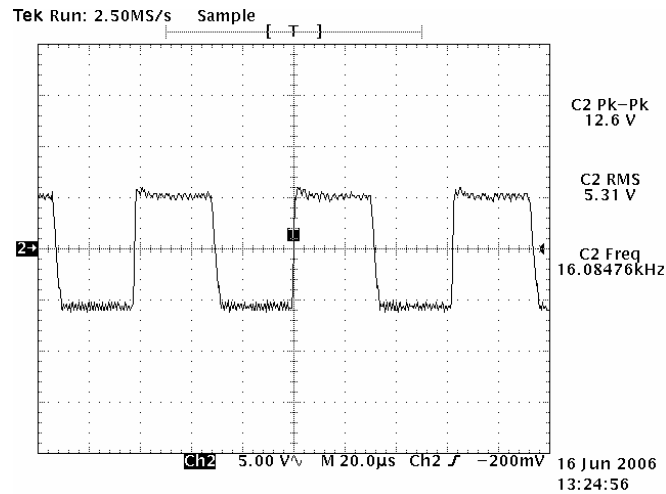


Figura 6.2 – Frequência de excitação 16KHz
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

Com esse sinal de excitação aplicado no sensor obteve-se uma resposta no secundário como apresenta o g:

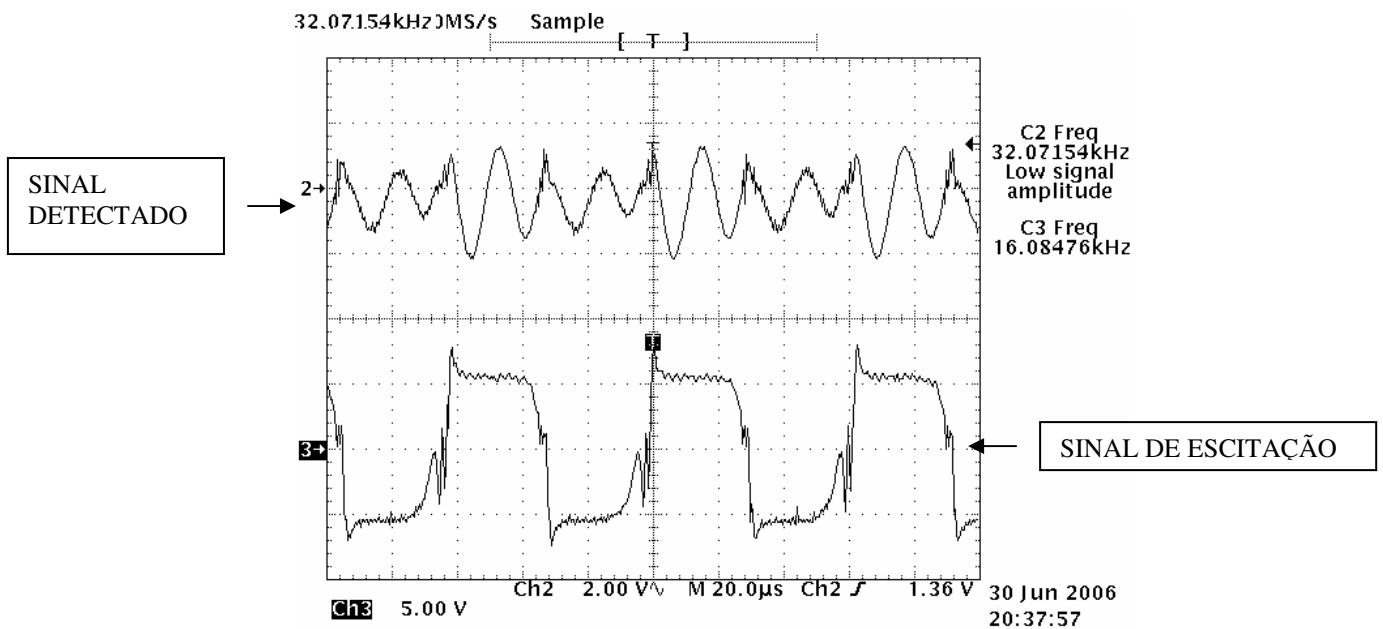


Figura: 6.3 – Sinal de excitação e tensão detectada
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRSPE/INPE – MCT

O gráfico da Figura 6.3 mostra no canal 3 do osciloscópio o sinal de excitação aplicado no sensor. Originalmente este sinal é uma onda quadrada como a apresentada na figura 6.2 que ao ser ligado na bobina de excitação acaba sendo distorcido devido a indutância da bobina. No anal 2 do osciloscópio é mostrada a aonde que foi detectada no enrolamento secundário.

O sinal detectado no secundário apresenta uma frequência de aproximadamente 32 KHz o que faz sentido já que o sinal de excitação utilizado é de aproximadamente 16 KHz. Como se sabe a frequência detectada tem o dobro da frequência do sinal de excitação.

Embora alguns resultados tenham sido positivos, estes testes mostraram um resultado inicial de baixa confiabilidade já que foram realizados na bancada do laboratório, local que apresenta muita interferência externa de redes elétricas e equipamentos. Contudo serviram como base para entendimento mais minucioso do circuito e para referenciais servirão à futuros testes.

A etapa final de processamento do sinal se mostrou com ruído muito elevado na saída, onde o nível de continuidade da tensão desejado após o circuito integrador não foi alcançado por completo.

É necessário ampliar os esforços para encontra os problemas técnicos que o circuito implementado apresentou. Embora o circuito de excitação tenha alcançado bons resultados, as etapas de comparação e análise do harmônico precisam ser revistas.

VI.2 – TRABALHOS E PUBLICAÇÕES

Com base nos conhecimentos adquiridos durante a realização do Projeto foi possível para o Bolsista Cassio Espindola Antunes participar em Eventos e Congressos Científicos submetendo Abstracts relacionados à instrumentação de magnetômetros e áreas co-relacionadas.

(1) - **“DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO ABORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO”.**

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE 2005 – Foz do Iguaçu, PR.

Autores: **Cassio E. Antunes**, Eduardo Andrighetto, Everton Frigo, Elias F. Berra, Nelson Jorge Schuch, Nalin Babulau Trivedi

(2) - **“INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS MAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO”**

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, Santa Maria, RS.

Autores: **Cassio E. Antunes**, Eduardo Andrighetto, Everton Frigo, Elias F. Berra, Nalin Babulau Trivedi, Nelson Jorge Schuch.

(3) - **“O ESPECTRO DE POTÊNCIA APLICADO NO ESTUDO DE VARIAÇÕES DA INTENSIDADE DO CAMPO GEMAGNÉTICO”**

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE 2005 – Foz do Iguaçu, PR.

Autores: Elias Fernando Berra, **Cassio E. Antunes**, Everton Frigo, Eduardo Andrighetto^{1,3}, Nalin B. Trivedi, Severino L.G. Dutra, Nelson Jorge Schuch.

(4) - “SISTEMA PARA DETECÇÃO DE CAMPO GEOMAGNÉTICO BASEADO EM SENSORES FLUXGATE PARA APLICAÇÕES EM SOLO NAS ESTAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE OBSERVATÓRIOS ESPACIAIS”

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE 2005 – Foz do Iguaçu, PR.

Autores: Eduardo Andrighetto, **Cassio E. Antunes**, Everton Frigo, Elias F. Berra, Nelson J. Schuch³, Nalin B. Trivedi

(5) - “SICINPE 2005 – ESTUDOS EXPERIMENTAIS VISANDO O DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO”

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, Santa Maria, RS.

Autores: Eduardo Andrighetto, **Cassio E. Antunes**, Everton Frigo, Elias F. Berra, Nalin B. Trivedi, Nelson J. Schuch

(6) - “SICINPE 2005 : PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS (1.0 – 10 MILIHERTZ) NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL”

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, Santa Maria, RS.

Autores: Elias Fernando Berra, Eduardo Andrighetto, Everton Frigo, **Cassio E. Antunes**, Nalin B. Trivedi, Severino Luiz Guimarães Dutra, Nelson J. Schuch.

Além dos trabalhos já apresentados nos Congressos a cima citados, até o vigente momento o Bolsista tem mais dois Abstracts aceitos em Eventos futuros o qual pretende participar.

(7) - “DESENVOLVIMENTO DE MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO COM NÚCLEO LINEAR PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS – FLUXGATE MAGNETOMETER”

Evento: 58ª Reunião Anual da SBPC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, Julho de 2006.

Autores: **Cassio E. Antunes**, Eduardo Andrighetto, Nalin B. Trivedi, Nelson J. Schuch.

(8) – “EQUIPMENT DEVELOPMENT FOR MAGNETIC MEASURE – LINEAR NUCLEUS FLUXGATE MAGNETOMETER”

Evento: 57th International Astronautical Congress 2006, Valencia – Spain; Outubro de 2006

Autores: **Cassio Espindola Antunes**, Eduardo Andrighetto, Severino L. Guimarães Dutra, Nalin Babulau Trivedi, Nelson Jorge Schuch

VI.3. – PERSPECTIVAS PARA O PROJETO

Acabada a etapa inicial do Projeto as perspectivas futuras são de refazer os testes com o circuito e descobrir os erros contidos na primeira tentativa tentando corrigi-los para se obter a resposta que desejada do circuito e do sensor. Após, obtendo um bom funcionamento do circuito, se almeja colocar o magnetômetro de baixo ruído em condições de pleno funcionamento e operação.



Após o completo funcionamento do magnetômetro, pretendesse realizar um longo período de testes com o sensor na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, obtendo dados de períodos magnéticos calmos e perturbadas para comprovar a linearidade, sensibilidade e confiabilidade do aparelho.

Comprovado o bom funcionamento do equipamento pode-se desenvolver um sistema de alimentação do equipamento, coleta e transmissão de dados auto-suficientes, como baterias químicas e painéis solares, para possíveis envios do protótipo em missões a bordo de balões ou satélites científicos.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

O desenvolvimento de instrumentação para sensores de campo magnético é uma ciência de grande importância para estudos aprofundados e maior compreensão de fenômenos que atingem diretamente a Terra. A importância de se ter conhecimento sobre esta área científica é a sua grande influência em diversos processos físicos químicos e biológicos.

Além disso, a Magnetometria tem um importante papel de investigação e auxílio no desenvolvimento de pesquisas sobre uma ampla gama de atividades tecnológicas e científicas de diversas áreas, não sendo aplicada somente para o Geomagnetismo.

O desenvolvimento de um protótipo de Magnetômetro de Baixo Ruído com núcleo em anel no Laboratório de Magnetosferas do CRSPE/INPE – MCT em Santa Maria traz grande benefício para o estudo da atividade Geomagnética na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), região de menor intensidade do Campo Magnético Terrestre. Com a localização do Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE – MCT bem ao centro do AMAS, futuramente o protótipo em desenvolvimento poderia ser lançado de balões atmosféricos para estudo de eventos que atingem esta região de menor intensidade do Campo, entre outros experimentos.

Com o desenvolvimento deste Projeto os Bolsistas puderam ampliar vastamente seus conhecimentos a respeito da Geofísica e Eletrônica, aprimorando cada vez mais suas habilidades técnico-científicas. Estes conhecimentos foram de grande valia para o desenvolvimento do Projeto assim como para o próprio crescimento dos Bolsistas.



Transcorrido o período inicial do Projeto até a conclusão desta primeira etapa, foram obtidos avanços satisfatórios sobretudo na pesquisa e desenvolvimento de instrumentação voltada para sensoriamento Geomagnético. Alguns resultados preliminares puderam ser alcançados, mostrando o andamento do Projeto. Embora o Projeto não se encontre em estágio finalizado, os avanços obtidos refletem um crescimento no desenvolvimento do protótipo do Magnetômetro de Baixo Ruído. Contudo, espera-se alcançar completamente os objetivos e metas estabelecidos no início do Projeto que será desenvolvido pelo Bolsista Josemar de Siqueira.

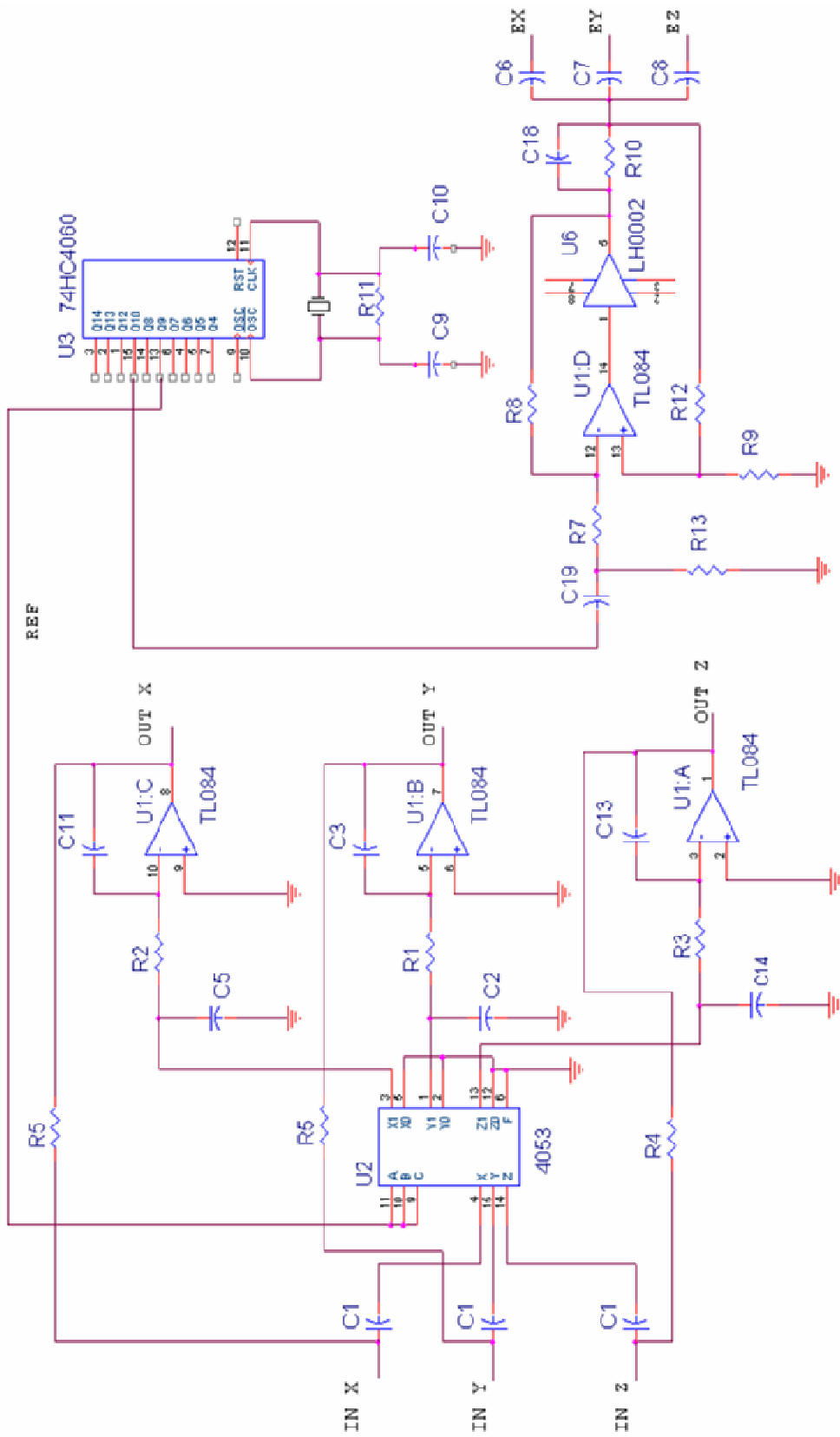
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [I]. **Campbell, W. H.** Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [II]. **Kabata, Wanderlí.** Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos. São José dos Campos, SP – 2000.
- [III]. **Amarante, J. A. A.** General Topics on Geomagnetism and Studies of the Occurrence of Micropulsations in São José dos Campos. Relatório interno do INPE / LAFE – 48, 1966.
- [IV]. **Barbosa, Maria José Faria.** Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas. São José dos Campos, SP – 2003.
- [V]. **Acuña, M. H. And Pellerin, J.** A Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer, IEEE Trans. On Geosci. Electronics, vol GE-7, p.252-260, 1969.
- [VI]. **Marrill, R.T.** – The Earth's Magnetic Field, (International geophysics series), 1983 Academic Press, London
- [VII]. **Sociedade Brasileira de Física** – Revista de Física Aplicada e Instrumentação, Vol. 12 e 13
- [VIII]. **Prindahl, F.,** Instrumentos Geomagnéticos, Publicações do Observatório Nacional, Publicação Especial, N^o 09, 1986.
- [IX]. **Felch, E. P. and Potter, J. L.,** Preliminary Development of a Magnetometer Current Standart, Tras. Am. Inst. Elect. Engrs, vol. 66, p.641-651, 1953.
- [X]. **Jankowski, J e C. Sucksdorff.** Guide for magnetic measurements and observatory practice, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder, 1996.
-



ANEXO A

Circuito completo do magnetômetro fluxgate de núcleo em anel – Baixo Ruído, em desenvolvimento no Laboratório de Magnetosferas do CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria – RS.

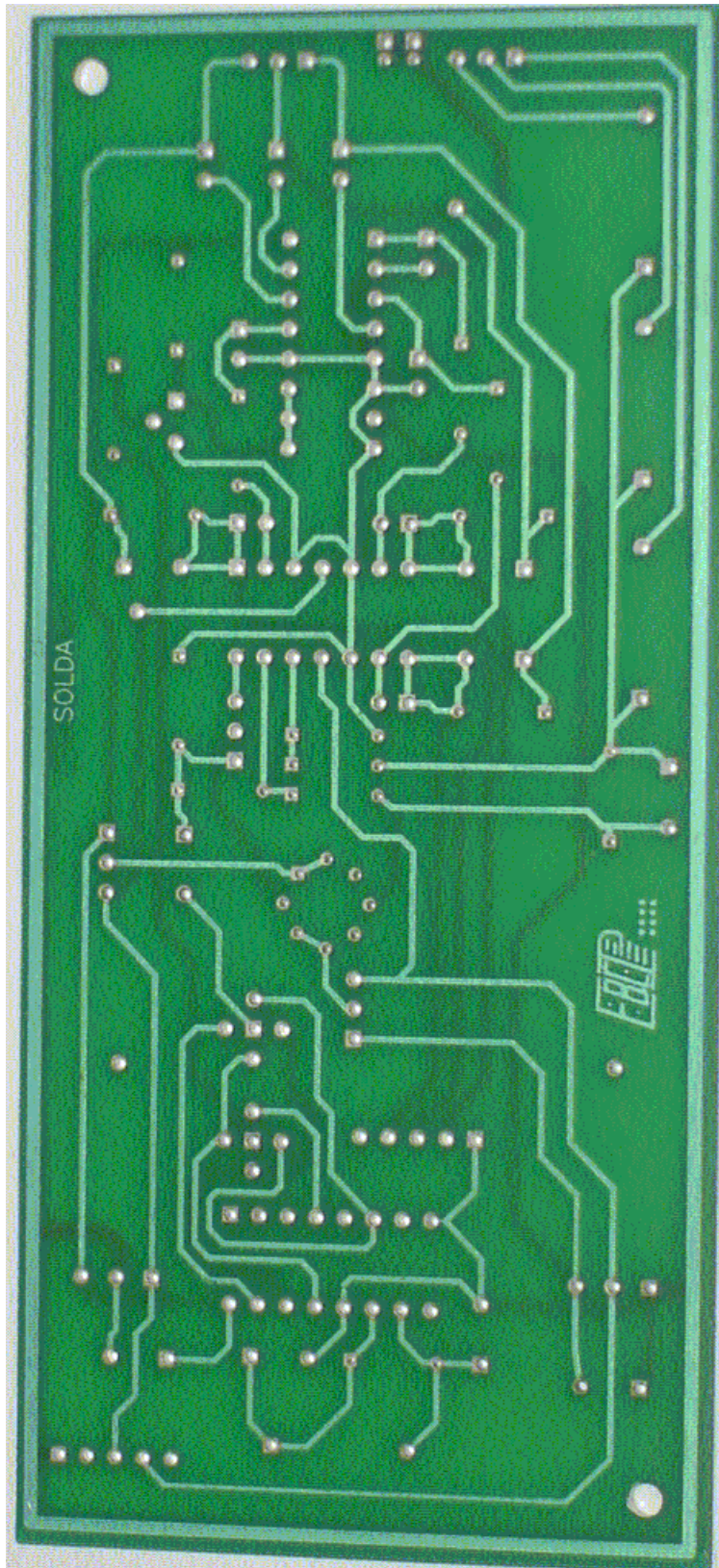




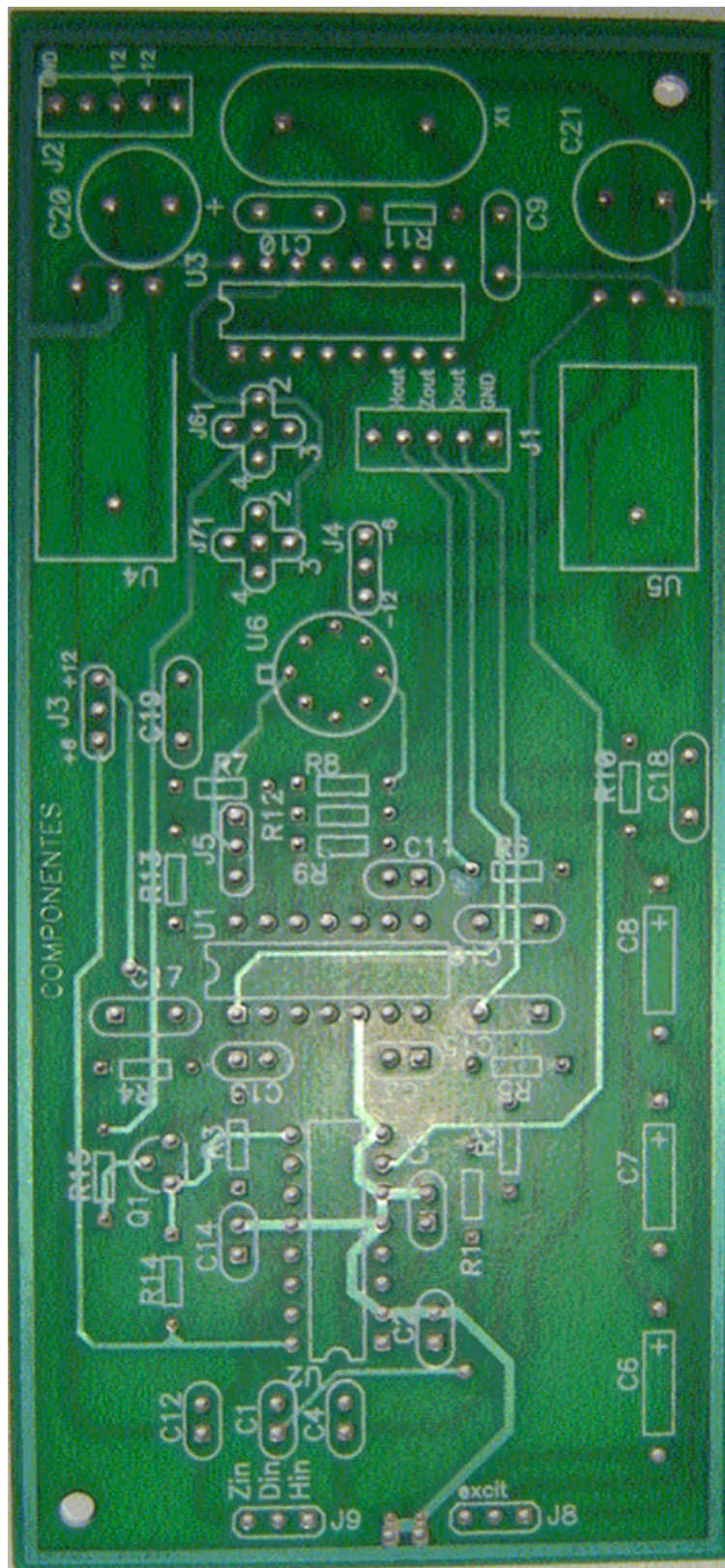
ANEXO B

Placas impressas do circuito do magnetômetro fluxgate em anel, em desenvolvimento no Laboratório de Magnetosferas do CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria – RS.

Frente da placa, lado da solda.



Verso da placa, lado dos componentes:





ANEXO C

Revisão Bibliográfica efetuada pelo Bolsista Substituto

Josemar de Siqueira

(substituição em Março de 2006)

ATIVIDADES TÉCNICAS CIENTÍFICAS DESENVOLVIDAS NO PROJETO PELO BOLSISTA SUBSTITUTO – JOSEMAR DE SIQUEIRA

Nesta Seção Anexo C serão abordadas algumas das atividades específicas realizadas pelo bolsista Josemar de Siqueira, desde o período que assumiu o Projeto. Será feita uma breve releitura, baseada nos estudos realizada pelo bolsista dos princípios de funcionamento do magnetômetro fluxgate com o núcleo em anel. Serão descritas as vantagens desse sensor em relação aos outros sensores utilizados para as medições do campo magnético.

REVISÃO TEÓRICA

A intensidade do campo magnético pode ser medida usando diferentes técnicas. Cada técnica possui propriedades únicas que a torna mais adequada a aplicações particulares. Estas aplicações podem variar desde a detecção da presença ou variação de campo até a medição precisa das propriedades vetoriais e escalar dos campos. Como ilustrado na Figura 1, os sensores de campo magnético podem ser classificados em: sensores de componente vetorial, vetoriais, e sensores de magnitude, escalares. Os vetoriais ainda podem ser divididos em sensores para medição de baixo-campo (<1 mT) e alto-campo (>1 mT). Instrumentos para medição de baixo-campo são comumente chamados de magnetômetros, e os para medição de alto-campo são gaussímetros.

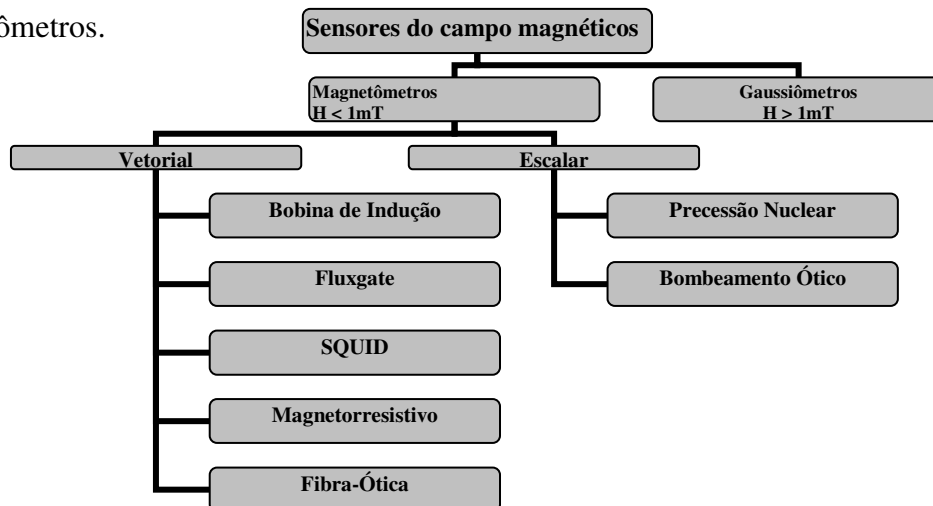


Figura C.1: Sensores de campo magnético classificados em duas categorias, baseadas em intensidade de campo e medição: magnetômetros medem baixo-campo e gaussímetros alto-campo.

Os Magnetômetros de fluxo saturado são os mais utilizados entre os sensores vetoriais, pois são seguros e relativamente de menor custo quando comparados a outros instrumentos de medição do campo geomagnéticos. São muito utilizados para obtenção destas medidas tanto em estações terrenas quanto em balões ou satélites na órbita terrestre. Segundo RIPKA (1982), núcleos em anel são os mais apropriados para sensores de baixo ruído, pois permitem correção da assimetria do núcleo pela rotação dentro da bobina sensora. As possíveis tensões dentro do material são uniformemente distribuídas e não existe os efeitos de borda, normalmente associados com regiões de aumento de ruído.

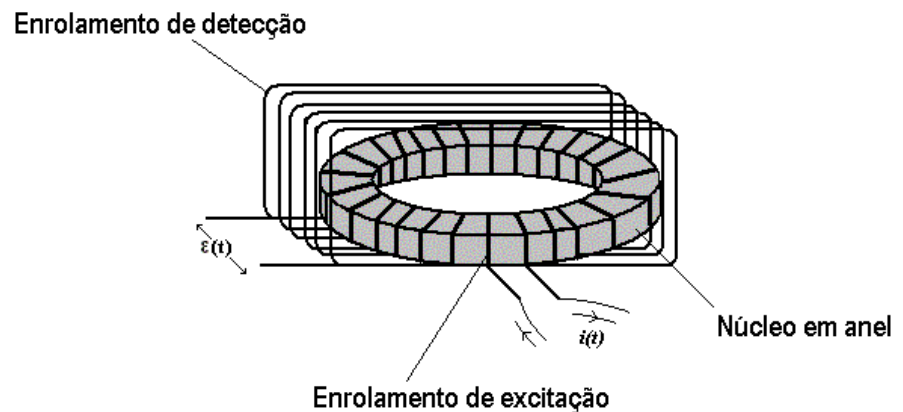
O princípio geral de funcionamento do *fluxgate* é uma aplicação da Lei de Indução de Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi(t)}{dt}$$

que prevê a indução de uma força eletromotriz ε nos terminais de uma bobina, se houver variação no fluxo magnético ϕ dentro dela. Descartando mudanças na geometria (número de espiras, área de secção reta, etc) pode-se provocar variações no fluxo através de mudanças na permeabilidade do material que constitua o núcleo dessa bobina.

Os “fluxgate” de núcleo em anel apresentam bons resultados, pois o seu funcionamento baseia-se nas propriedades de certos materiais ferromagnéticos. Este sensor é composto por um núcleo toroidal com alta permeabilidade, que é exposto a um campo de excitação H gerado pelo enrolamento de excitação (figura 2), onde é possível “controlar” a permeabilidade do núcleo. Conforme a permeabilidade do núcleo varia de um valor baixo para um valor alto, produzem-se pulsos de tensão na bobina de detecção que faz variar o fluxo magnético do material, com amplitude proporcional à magnitude do campo magnético externo e com fase indicando a direção do campo. Fazendo com que o fluxo magnético chegue ao seu ponto de saturação, a permeabilidade do núcleo decai para valores muito baixos próximos ao do vácuo, como se o toróide houvesse desaparecido do interior da bobina detectora, devido ao seu comportamento segundo a curva de histerese $B \times H$.

Figura C.2: Pode-se ver um arranjo que permite o chaveamento do núcleo. Uma corrente alternada $i(t)$ passando através da bobina primária gera um campo $H(t)$ que realiza todo ciclo de histerese.



Essa variação do fluxo magnético é detectada pelo enrolamento de detecção, que tem uma frequência f e é um sinal periódico qualquer (uma onda quadrada ou triangular, por exemplo). O sinal induzido deve apresentar componentes de frequência pares ($2f$, $4f$, $6f$, etc) em relação ao sinal de excitação. Componentes ímpares (f , $3f$, $5f$,...) podem aparecer como ruído, devido à não existência de uma simetria perfeita no arranjo. O sinal de saída da bobina sensora é enviado a um circuito de detecção. Um filtro atenua os harmônicos (pares e ímpares) e em seguida o sinal é amplificado. O método de detecção mais comumente utilizado é o de detecção por segundo harmônico discutido por Benyosef & Novak [3], pois apresentam uma melhor relação sinal/ruído, comparados aos outros harmônicos pares.

O sinal de saída da bobina sensora é enviado a um circuito de detecção. Dessa maneira pode-se implementar um circuito que faça a excitação do núcleo e logo após faça a comparação entre os sinais mencionados, obtendo-se os dados sobre o campo magnético. Com estes dados, podem ser realizadas diversas pesquisas e estudos aplicados para a área do Geomagnetismo, proporcionando maior conhecimento e aperfeiçoamento de técnicas para medições magnéticas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o trabalho na área de instrumentação para as medidas geomagnéticas, desenvolvida no Laboratório de Magnetosferas e no Observatório Espacial do sul – CRSPE/INPE – MCT, foi feita um estudo e discussões sobre os princípios de funcionamento do sensor “Fluxgate” com núcleo em anel e sua utilização em outras áreas. Este estudo teve como referência bibliográfica os seguintes textos:

- “Introduction to Geomagnetic Fields” – Wallace H. Campbell”;
- “Instrumentos Geomagnéticos” – Fritz Primdahl”;
- Dissertação de Mestrado com o título: “Projeto e construção de um magnetômetro de Fluxo Saturado (fluxgate) para uso em um laboratório de Biomagnetismo”, defendida por Paulo Loureiro de Sousa (fevereiro de 1995 – USP);
- Tese de Doutorado com o título: “Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos”, defendida por Wanderlí Kabata (outubro de 2000 – INPE/S.J. dos Campos).

Foi efetuado um estudo do relatório final de atividades com o título: “Estudo experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas – Magnetômetro de núcleo saturado”, desenvolvido pelo bolsista Eduardo Andrighetto (fevereiro de 2006 – UFSM), e de artigos, revistas e livros indicado pelo Orientador, Dr.Nalin B. Trivedi.

Foram realizadas visitas mensais ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para manutenção e coleta de dados dos equipamentos instalados. Converteu e organizou um banco de dados contendo a análise dos eventos geomagnéticos encontrado nas diversas Estações Geomagnéticas estudadas, para um bom monitoramento dos mesmos e como fonte de consulta permanente para os demais integrantes do grupo no Laboratório de Magnetosferas Interações Terra – Sol e Geomagnetismo do CRSPE/INPE – MCT.



ANEXO D

Certificados de trabalhos de participação do Bolsista substituído Cassio Espindola

Antunes no Projeto em Congressos e Eventos



Certificado



Certificamos que

CASSIO ESPINDOLA ANTUNES
NALIN BABULAL TRIVEDI
EDUARDO ANDRIGHETTO
ELIAS FERNANDO BERRA
EVERTON FRIGO
NELSON JORGE SCHUCH

Participou da XX Jornada Acadêmica Integrada da UFSM,
nos dias 8, 9 e 10 de março de 2006, com o trabalho

INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS MAGNÉTICAS DE
BAIXO RÚIDO

Comissão Executiva
Março de 2006



Certificado



Certificamos que

EDUARDO ANDRIGHETTO
NALIN BABULAL TRIVEDI
CASSIO ESPINDOLA ANTUNES
ELIAS FERNANDO BERRA
EVERTON FRIGO
NELSON JORGE SCHUCH

Participou da XX Jornada Acadêmica Integrada da UFSM,
nos dias 8, 9 e 10 de março de 2006, com o trabalho
SICINPE 2005 _ ESTUDOS EXPERIMENTAIS VISANDO O
DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA
MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS _ MAGNETÔMETRO DE
NÚCLEO SATURADO

Comissão Executiva
Março de 2006



Certificado



Certificamos que

ELIAS FERNANDO BERRA
SEVERINO LUIZ GUIMARÃES DUTRA
CASSIO ESPINDOLA ANTUNES
EDUARDO ANDRIGHETTO
EVERTON FRIGO
NELSON JORGE SCHUCH

Participou da XX Jornada Acadêmica Integrada da UFSM,
nos dias 8, 9 e 10 de março de 2006, com o trabalho
SICINPE 2005 : PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS
DE PERÍODOS LONGOS (1.0 _ 10 MILIHERTZ) NA
REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO
ATLÂNTICO SUL

Comissão Executiva
Março de 2006

