



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 - II**

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

PROCESSO Nº 105417/2005-7

Josemar de Siqueira (CRS/CIE/INPE - MCT,
Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)
E-mail: josemar@lacesm.ufsm.br

Dr. Nalin B. Trivedi (OMV/ON – MCT, Orientador)
E-mail: ntrivedi@on.br

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/CIE/INPE – MCT, Co-Orientador)
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Julho 2007.



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsista:

Josemar de Siqueira

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

Processo:

PIBIC/INPE – CNPq/MCT 105417/2005-0

Orientador:

Dr. Nalin B. Trivedi

Observatório Magnético de Vassouras – OMV/ON – MCT

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT

Colaboradores:

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra

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

Cassio E. Antunes

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

Sandro Bertagnolli

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

Fagner Rother

Acadêmico do Curso de Física – UFSM



Grupo de Pesquisa
Clima Espacial, Magnetosfera: Interação Terra-Sol

Identificação	Recursos Humanos	Linhas de Pesquisa	Indicadores do Grupo
---------------	------------------	--------------------	----------------------

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosfera: Interação Terra-Sol

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 08/06/2007 11:57

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - nelson.schuch@pq.cnpq.br

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

Este Grupo realiza pesquisas em conjunto com a Divisão de Geofísica Espacial do INPE de São José dos Campos, SP e com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

Recursos humanos

Pesquisadores

Total: 22

[Alan Prestes](#)

[Hisao Takahashi](#)

[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)

[Jean Carlo Santos](#)

[Alisson Dal Lago](#)

[Joao Paulo Minussi](#)

[Barclay Robert Clemesha](#)

[Mangalathayil Ali Abdu](#)

[Clezio Marcos De Nardin](#)

[Marcelo Barcellos da Rosa](#)

[Cristiano Max Wrasse](#)

[Nalin Babulal Trivedi](#)

[Delano Gobbi](#)

[Nelson Jorge Schuch](#)

[Eurico Rodrigues de Paula](#)

[Osmar Pinto Junior](#)

[Ezequiel Echer](#)

[Polinaya Muralikrishna](#)

[Fábio Augusto Vargas dos Santos](#)

[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

[Fernando Luis Guarnieri](#)

[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes

Total: 17

[Carlos Roberto Braga](#)

[Lilian Piecha Moor](#)

[Cassio Espindola Antunes](#)

[Marcelo dos Santos Zastawny](#)

[Cézar Augusto Daroit](#)

[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)

[Cristiano Sarzi Machado](#)

[Mateus Sabadi Schuh](#)

[Eduardo Ceretta Dalla Favera](#)

[Nikolas Kemmerich](#)

[Fagner Chagas Rother](#)

[Pablo Fernando Carlesso](#)

[Jose Fernando Thuorst](#)

[Samuel Martins da Silva](#)

[Josemar de Siqueira](#)

[Sandro Fettermann Bertagnoli](#)

[Juliano Moro](#)



Técnicos		Total: 4
Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica		
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação		
Kóiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas		
Roben Castagna Lunardi - Graduação - Técnico em Computação		
Linhas de pesquisa		Total: 5
<ul style="list-style-type: none"> • Aeronomia - Aeroluminescência • Aeronomia - Ionosfera • Clima Espacial • Geomagnetismo • NanoSatC-BR 		
Relações com o setor produtivo		Total: 0
Indicadores de recursos humanos do grupo		
Integrantes do grupo	Total	
Pesquisador(es)	22	
Estudante(s)	17	
Técnico(s)	4	



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



**Linha de Pesquisa
Geomagnetismo**

Linha de pesquisa
Geomagnetismo

Nome do grupo: [Clima Espacial, Magnetosfera: Interação Terra-Sol](#)

Palavras-chave: Descargas Elétricas; Desenvolvimento de Instrumentação Espacial; Eletrecidade Atmosférica; Física Magnetosferas, Física Solar e Heliosférica; Raios e Tempestades; Relâmpagos;

Pesquisadores:
[Alisson Dal Lago](#)
[Clezio Marcos De Nardin](#)
[Jean Carlo Santos](#)
[Joao Paulo Minussi](#)
[Mangalathayil Ali Abdu](#)
[Nalin Babulal Trivedi](#)
[Osmar Pinto Junior](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

Estudantes:
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Faoner Chagas Rother](#)
[Josemar de Siqueira](#)
[Marcelo dos Santos Zastawny](#)
[Sandro Fettermann Bertagnoli](#)

Árvore do conhecimento:
 Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica; Geofísica Aplicada;

Setores de aplicação:
 Produtos e serviços voltados para a defesa e proteção do meio ambiente, incluindo o desenvolvimento sustentado

Objetivo:



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa
NANOSATC-BR

Linha de pesquisa

NANOSATC-BR

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Palavras-chave: CubeSats; Desenvolvimento de Engenharias - Tecnologias; Miniaturização; Nanosatélites; Nanotecnologia; Pesquisa do Geoespaço;

Pesquisadores:

[Ademar Michels](#)
[Alicia Luisa Clua de Gonzalez](#)
[Alisson Dal Lago](#)
[Clezio Marcos De Nardin](#)
[Ezequiel Echer](#)
[Fernando Luis Guarnieri](#)
[Jean Pierre Raulin](#)
[Nalin Babulal Trivedi](#)
[Nafanael Rodrigues Gomes](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Otavio Santos Cupertino Durão](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Carlos Roberto Braga](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Cleomar Pereira da Silva](#)
[Jean Carlos Daroit](#)
[Josemar de Siqueira](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Marcelo dos Santos Zastawny](#)
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)
[Micael da Silva Bacellar](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Rafael Lopes Costa](#)
[Rodrigo Gerlach Silva](#)

[Samuel Martins da Silva](#)
[Sandro Fettermann Bertagnolli](#)
[Silvano Lucas Prochnow](#)
[Tiago Jaskulski](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;
Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

Pesquisas: Geoespaço e em Engenharias/Tecnologias: eletrônica, comunicações, mecânica e aeroespacial, lançamento de pequenos satélites científico universitário - iniciação científica: CubeSat (100g-1Kg, 10x10x10cm), Nanosatélite (1Kg-10Kg), Carga útil: magnetômetro e detector de partículas; Desenvolvimento: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração, sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, controle: atitude, térmico, Vice-Líder: Ademar Michels



AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Dr. Nelson Jorge Schuch, pela sua atenção, compreensão e motivação, e também por ter proporcionado condições necessárias para o desenvolvimento desse projeto. Ao meu orientador Dr. Nalin Babulal Trivedi pela paciente orientação e dedicação demonstradas em todos os momentos desse 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: Sandro Bertagnolli, Fagner Rother e em especial ao meu grande companheiro e colega de Pesquisa Cassio Espindola Antunes que não mediu tempo e esforços para me auxiliar. Gostaria de agradecer também aos amigos Eduardo Andrighetto e Everton Frigo pelas discussões e sugestões referente ao projeto.

Ao Programa de Iniciação Científica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – PIBIC/INPE – CNPQ/MCT, por ter permitido o desenvolvimento desse importante projeto de pesquisa e todo o aprendizado através dele adquirido. Muito obrigado a todos.



Sumário

RESUMO	1
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	2
1.1 – OBJETIVOS DO PROJETO	3
1.2 – METODOLOGIA.....	3
1.3 – PLANO DE TRABALHO	4
1.4 – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	4
1.5 – RESULTADOS ESPERADOS	4
CAPÍTULO 2. CAMPO GEOMAGNÉTICO.....	5
2.1. ASPECTOS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO	5
2.2. MAGNETOSFERA TERRESTRE.....	13
2.3. VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS	16
2.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS)	17
CAPÍTULO 3. INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA MEDIDA DO CAMPO MAGNÉTICO	18
3.1. MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO (FLUXGATE MAGNETOMETER)	20
<i>3.1.1. Geometria dos Sensores Fluxgate.....</i>	<i>22</i>
3.2. MÉTODOS DE DETECÇÃO E ANÁLISE DO SINAL.....	25
<i>3.2.1. Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado</i>	<i>26</i>
<i>3.2.2. O Sensor e a Bobina de Realimentação.....</i>	<i>26</i>
<i>3.2.3. Fluxgate Curto Circuitado.....</i>	<i>27</i>
<i>3.2.4. Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado.....</i>	<i>27</i>
<i>3.2.5. Magnetômetro de Harmônicos Pares</i>	<i>29</i>
CAPÍTULO 4. IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXGATE	30
4.1 – DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES.....	30
4.2 – CIRCUITO ELETRÔNICO.....	32
<i>4.2.1 – Circuito e Sinal de Excitação.....</i>	<i>33</i>
<i>4.2.2 – Comparação dos Sinais</i>	<i>36</i>
<i>4.2.3 – Circuito Integrador.....</i>	<i>37</i>
4.3 – CIRCUITO E PLACA	37
CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTIDOS.....	39
CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXOS	46
ANEXO A - CIRCUITO COMPLETO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE DE NÚCLEO EM ANEL	47
ANEXO B - PLACAS IMPRESSAS DO CIRCUITO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE EM ANEL	49
ANEXO C - TÍTULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS E OU SUBMETIDOS.....	51
ANEXO D - CERTIFICADOS DE TRABALHOS PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS E EVENTOS	61

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.....	5
Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol.	6
Figura 2.3 – Elementos do vetor campo geomagnético.....	6
Figura 2.4 - <i>Representação das coordenadas esféricas.</i>	9
Fonte: Hartmann, 2005.	9
Figura 2.5 - Estrutura interna da Terra	11
Fonte: http://www.winona.edu/geology/dynamicearth/Images/internal%20structur.jpg	
Figura 2.6 – Diagrama esquemático das correntes no núcleo da Terra que produzem o Campo Geomagnético.	11
Figura 2.9 – Composição da Magnetosfera.	14
Figura 2.10 - Cinturão de Radiação de Van Allen.	15
Figura 2.11 - Movimentos de carga elétrica na presença do Campo Magnético.....	15
Figura 3.1 – Classificação dos sensores magnéticos.	19
Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.	21
Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos	
Figura 3.3 – Saturação do núcleo	21
Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos	
Figura 3.4 – Núcleo linear.	23
Figura 3.5 – Dois núcleos em barra.	24
Figura 3.6 – Núcleo em anel.....	25
Figura 4.1 – Sensores do magnetômetro fluxgate.	30
Figura 4.2 – Núcleo ferromagnético toroidal	30
Figura 4.3 – Esquema do sensor magnético com o enrolamento de excitação e de detecção	31
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.4 – Vista frontal do secundário.	31
Figura 4.5a – Magnetômetro Fluxgate.	32
Figura 4.5b – Magnetômetro Fluxgate.	32
Figura 4.6 – Circuito de excitação.....	34
Figura 4.7 – Sinal de excitação com frequência 6,0KHz.	35
Figura 4.8 – Distorção do sinal de excitação com frequência de 6,0KHz.....	35
Figura 4.9 – Circuito integrado multiplexador.	36
Figura 4.10 – Circuito Integrador.	37
Figura 4.11 – Schematic do circuito de excitação e detecção.	38
Figura 4.12a – Vista superior (lado dos componentes).	38
Figura 4.12b – Vista inferior (lado da solda).	38
Figura 5.1 – Testes com os transistores 2N2222A e 2N2907A.	39
Figura 5.2 – Circuito implementado no CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria.....	40
Figura 5.3 – Sinais analisados Na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT.	40
Figura 5.4 – Sinal de excitação, o sinal do enrolamento de detecção e o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação.....	41
Figura 5.5 – Três medidas referente à saída do CI 4053 para cada sensor.....	42
Figura 5.6 – Sinais de excitação sem os transistores.....	42

Resumo

Esse projeto tem objetivo de realizar estudos experimentais e o desenvolvimento do circuito para um magnetômetro “fluxgate” de três componentes com sensor em anel.

O magnetômetro fluxgate implementado tem seu funcionamento baseado nas propriedades ferromagnético de alguns materiais, sendo composto por duas bobinas em cada eixo, uma de excitação e outra de detecção do campo. Cada sensor possui um núcleo toroidal com alta permeabilidade e ortogonais entre si, formando um eixo coordenado que é ajustado as componentes **H**, **D** e **Z** do campo geomagnético.

Esse núcleo toroidal é exposto a um campo de excitação H gerado por uma bobina envolta do anel, que faz variar o fluxo magnético do material segundo a curva de histerese $B \times H$. Quando o fluxo magnético chega ao seu ponto de saturação, a permeabilidade do núcleo decai para valores muito baixos próximos ao do vácuo, como se o toróide houvesse desaparecido. Quando o núcleo não está saturado, o campo magnético externo, o qual se quer medir, se concentra no toróide devido a sua alta permeabilidade.

O circuito eletrônico utilizado no o protótipo do magnetômetro tem basicamente três etapas. A primeira etapa consiste na geração de um sinal periódico de frequência f capaz de saturar o núcleo ferromagnético fazendo com que varie o fluxo magnético do material, segundo a curva de histerese $B \times H$. A segunda etapa do circuito é feita a comparação do sinal de excitação com o sinal detectado, utilizando uma referencia $2f$ retirada do circuito de excitação. Após a comparação dos sinais é feita a integração dos mesmos para obter-se uma tensão continua que tenha uma linearidade com a variação do sinal obtido na bobina de detecção. Na terceira etapa do circuito a diferença entre par do sinal obtido na saída do circuito integrado 4053 é integrada pelo circuito integrador, obtendo a relação de linearidade entre sinal detectado e variação do campo medido, assim obtendo-se os dados sobre o campo magnético.

Capítulo 1. 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 está 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.

1.1 – 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.

1.2 – 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.

1.3 – 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.

1.4 – 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.

1.5 – 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 2. Campo Geomagnético

2.1. Aspectos do Campo Geomagnético

O Campo Magnético da Terra para pontos próximos de sua superfície pode ser representado por um dipolo magnético (como uma barra imantada) localizado no centro da Terra. O campo magnético mostrado na Figura 2.1 é uma idealização sugerindo como o campo deveria ser se ele não fosse influenciado por fenômenos tais como o vento solar.

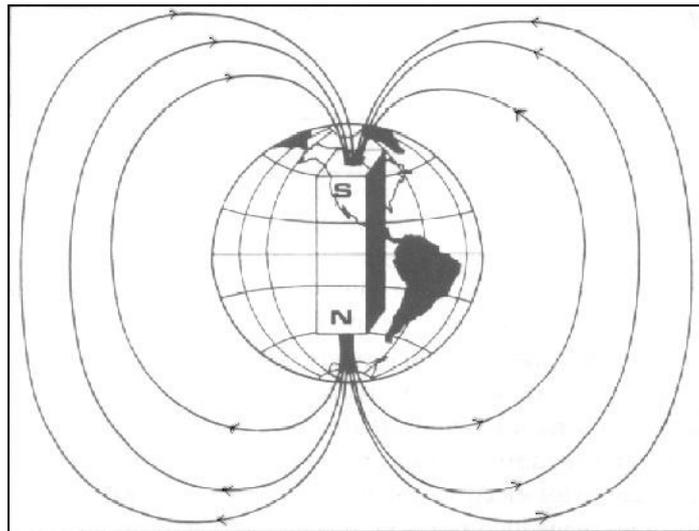


Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.

Fonte: http://centros5.pntic.mec.es/.../Rc-40/Lãs_auroras.html

Devido a interação do Campo Magnético Terrestre com o vento solar emitido continuamente pelo Sol, em todas as direções, a forma das linhas do Campo Geomagnético assemelha-se a cauda longa de um cometa, como mostra a Figura 2.2.

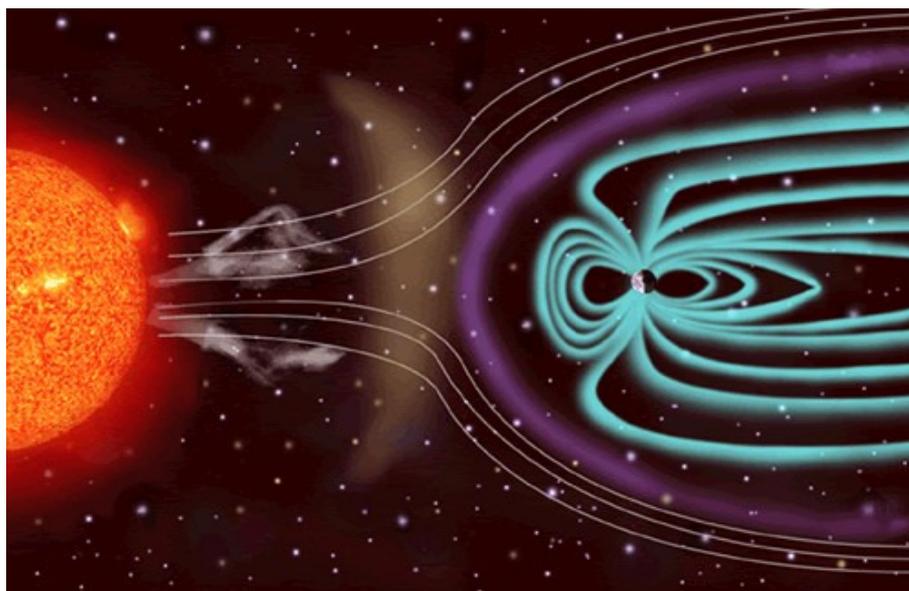


Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol.

Fonte: http://www.clas.ufl.edu/jur/200201/images/lamb_6.jpg

O Campo Geomagnético é um campo vetorial e, portanto possui magnitude ou intensidade, direção e sentido. A intensidade total do vetor magnético representado pela letra (**F**) é independente do sistema de coordenadas, mas é comum representá-lo em relação ao sistema de coordenadas geográficas.

A Figura 2.3 mostra o vetor Campo Geomagnético total (**F**) e suas três componentes **X**, **Y** e **Z**, para um local no hemisfério norte e os elementos lineares e angulares do vetor Campo Geomagnético.

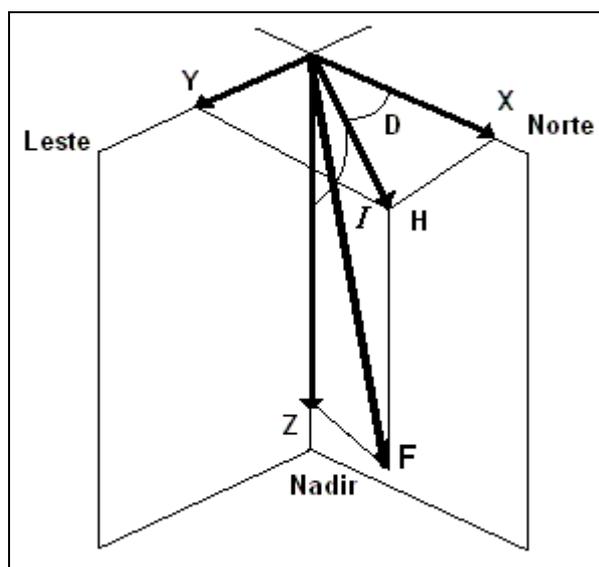


Figura 2.3 – Elementos do vetor campo geomagnético.

Os elementos lineares representados na Figura 2.3 são:

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.

Os elementos angulares são:

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

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

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

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

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

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

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

Os ângulos de declinação **D** e de inclinação **I** podem ser encontrados por:

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

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

O Campo Geomagnético, como um campo eletromagnético, é descrito pelas equações de Maxwell.

Lei de Ampère

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \left(J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Lei de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Lei de Gauss

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Condição solenoidal (Lei de Gauss para o campo magnético)

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

onde μ é a permeabilidade magnética no vácuo, $\partial \vec{D} / \partial t$ é a corrente de deslocamento, \vec{E} é o campo elétrico e ρ é a densidade de carga elétrica. Se forem desprezadas as correntes entre a superfície da Terra e a ionosfera, e as variações do campo externo, $\vec{B} \times \nabla = 0$ e o campo deriva de um potencial escalar. \vec{B} pode ser representado como gradiente de um potencial escalar V :

$$\vec{B} = -\nabla V \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Assim, pela equação (2.12) o divergente de \vec{B} é nulo e V satisfaz a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Para sua representação matemática, o campo geomagnético pode ser separado em três frações de origens diferentes.

$$B = B_j + B_e + B_i \quad (\text{Eq. 2.15})$$

onde B_i é o campo de origem estritamente interna da Terra; B_e é o campo de origem externa, cuja produção ocorre fora da região da ionosfera e B_j é o campo cuja produção ocorre dentro da ionosfera, então $B_i + B_e$ podem ser representados por um potencial escalar. Na prática, os dados usados para determinar V são selecionados para minimizar B_j e o V resultante assume uma boa representação de $B_i + B_e$.

Escrevendo o laplaciano em coordenadas esféricas (r, θ, λ), onde λ é a longitude e θ é a colatitude (latitude: $\varphi = \pi/2 - \theta$).

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0 \quad (\text{Eq. 2.16})$$

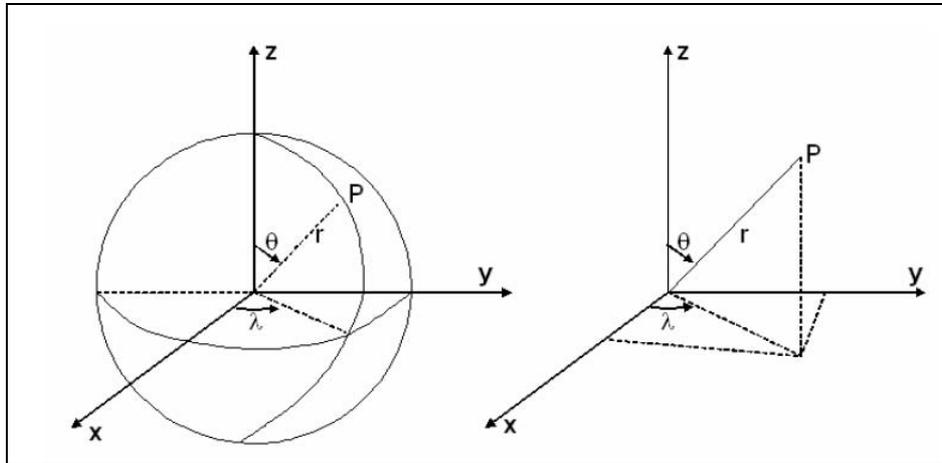


Figura 2.4 - Representação das coordenadas esféricas.
 Fonte: Hartmann, 2005.

Conhecendo-se a variação desta função potencial com as coordenadas (r, θ, λ) , representadas na Figura 2.4, pode-se determinar as componentes do campo, sobre ou acima da superfície da Terra, tomando-se os gradientes nas direções correspondentes. Para resolver a equação de Laplace, tentou-se uma separação de variáveis, isto é, fazendo-se.

$$V = R(r)\Theta(\theta)\Lambda(\lambda) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

Assim a solução geral da Equação de Laplace sobre uma esfera é:

$$V = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [C_n^m r^n + D_n^m r^{-(n+1)}] P_n^m [A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda] \quad (\text{Eq. 2.18})$$

é conveniente relacionar r com o raio da Terra a , para que os coeficientes sejam dimensionalmente uniformes. Se c e s forem as frações de $P_n^m \cos m\lambda$ e $P_n^m \sin m\lambda$ devidas a origem externa

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) \left\{ \begin{array}{l} \left[c_n^m \left(\frac{r}{a} \right)^n + \left(1 - c_n^m \right) \left(\frac{a}{r} \right)^{(n+1)} \right] A_n^m \cos(m\lambda) + \\ \left[s_n^m \left(\frac{r}{a} \right)^n + \left(1 - s_n^m \right) \left(\frac{a}{r} \right)^{(n+1)} \right] B_n^m \sin(m\lambda) \end{array} \right\} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

V não é diretamente observável, mas sim as componentes do campo, como X , Y e Z , que são medidas sobre a superfície da Terra ($r=a$)

$$X = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right)_{r=a} \quad Y = \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right)_{r=a} \quad Z = \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{r=a} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

$$X = \sum \sum \frac{dP_n^m}{d\theta} [A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda] \quad (\text{Eq. 2.21})$$

$$Y = \frac{1}{\sin \theta} \sum \sum P_n^m [mA_n^m \sin m\lambda - mB_n^m \cos m\lambda] \quad (\text{Eq. 2.22})$$

$$Z = \sum \sum P_n^m \left\{ \begin{array}{l} [nc_n^m - (1 - c_n^m)(n+1)A_n^m \cos m\lambda + \\ [ns_n^m - (1 - s_n^m)(n+1)B_n^m \sin m\lambda \end{array} \right\} \quad (\text{Eq. 2.23})$$

Ajustando-se as expressões de X e Y aos valores observados, obtêm-se os coeficientes A_n^m e B_n^m . Usa-se então a expressão de Z para determinar os c_n^m e s_n^m ou seja, as frações de cada harmônico correspondente a origem externa. Gauss utilizou este método pela primeira vez e concluiu que a origem do campo era toda interna e que o campo externo não existia. Sabemos hoje que o campo externo é da ordem de algumas dezenas de nT em dias calmos e muitas vezes isto durante tempestades magnéticas.

A observação do magnetismo associado às manchas solares levou Joseph Larmor, em 1919, à idéia de que o campo era produzido por fluidos condutores com movimentos convectivos em um processo de *dínamo auto-sustentado*. Segundo a hipótese do dínamo, o Campo Magnético Terrestre seria a manifestação do campo magnético gerado pela circulação de correntes na região entre o manto inferior e o núcleo externo da Terra (composto principalmente ferro e níquel) a aproximadamente 2900km de profundidade conforme mostra a Figura 2.5 da estrutura interna da Terra.

O Campo Geomagnético, em qualquer posição da superfície da Terra é a soma de três componentes com origens distintas: o campo interno, cuja produção ocorre no núcleo externo da Terra; o campo crustal, cujas fontes são os materiais magnetizados e induzidos encontrados na crosta e o campo externo, produzido na magnetosfera.

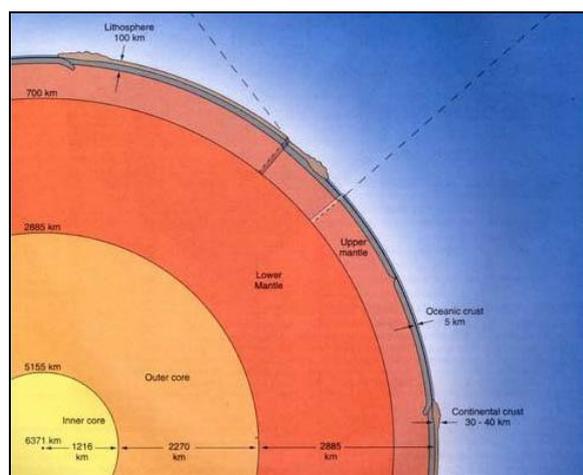


Figura 2.5 - Estrutura interna da Terra.

Fonte: <http://www.winona.edu/geology/dynamicearth/Images/internal%20structure.jpg>

O núcleo líquido, que é um fluido altamente viscoso, gira lentamente em relação ao manto sólido, que envolve esse núcleo, atuando como um gerador de correntes elétricas que giram ao redor, como mostra a Figura 2.6, tornando-se um eletromagneto. Esta rotação é responsável pela característica dipolar básica do Campo Magnético da Terra e tem um sentido de leste para oeste aproximadamente. Além dessas correntes, há também outros movimentos do núcleo, ou seja, outros sistemas estacionários de correntes (grandes vórtices no núcleo) responsáveis pela superposição de características não-dipolares ao Campo Magnético.

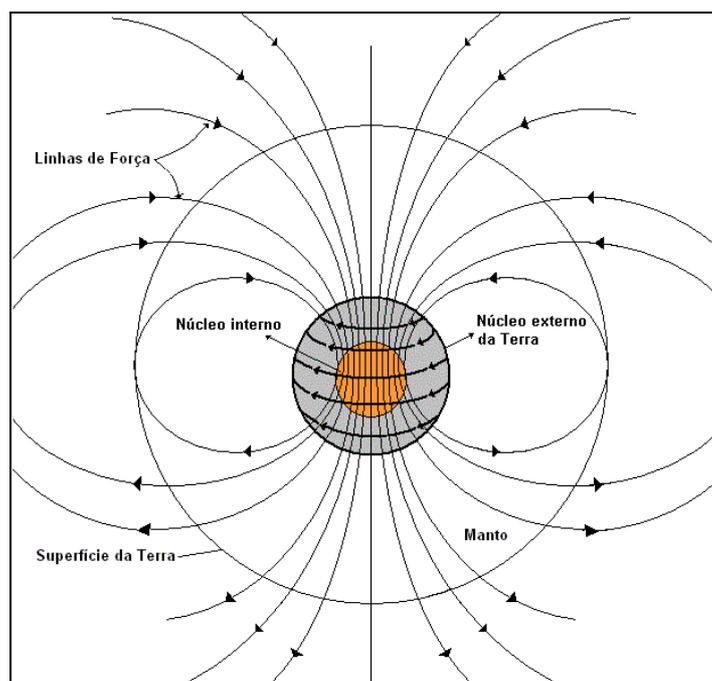


Figura 2.6 – Diagrama esquemático das correntes no núcleo da Terra que produzem o Campo Geomagnético.

Devido a sua alta complexidade, o Campo Magnético Terrestre é variável no tempo e no espaço, apresentando uma configuração predominantemente dipolar. O eixo do dipolo Geomagnético (dipolo que melhor se ajusta aos dados Geomagnéticos observados) está atualmente inclinado aproximadamente de $11,5^\circ$ em relação ao eixo de rotação da Terra. Se o campo tivesse a configuração exata de um dipolo inclinado, seria idêntico ao esquema da Figura 2.7. A linha que passa pelo centro da Terra junto ao eixo do dipolo, intercepta a superfície em dois pontos chamados de *pólos geomagnéticos*.

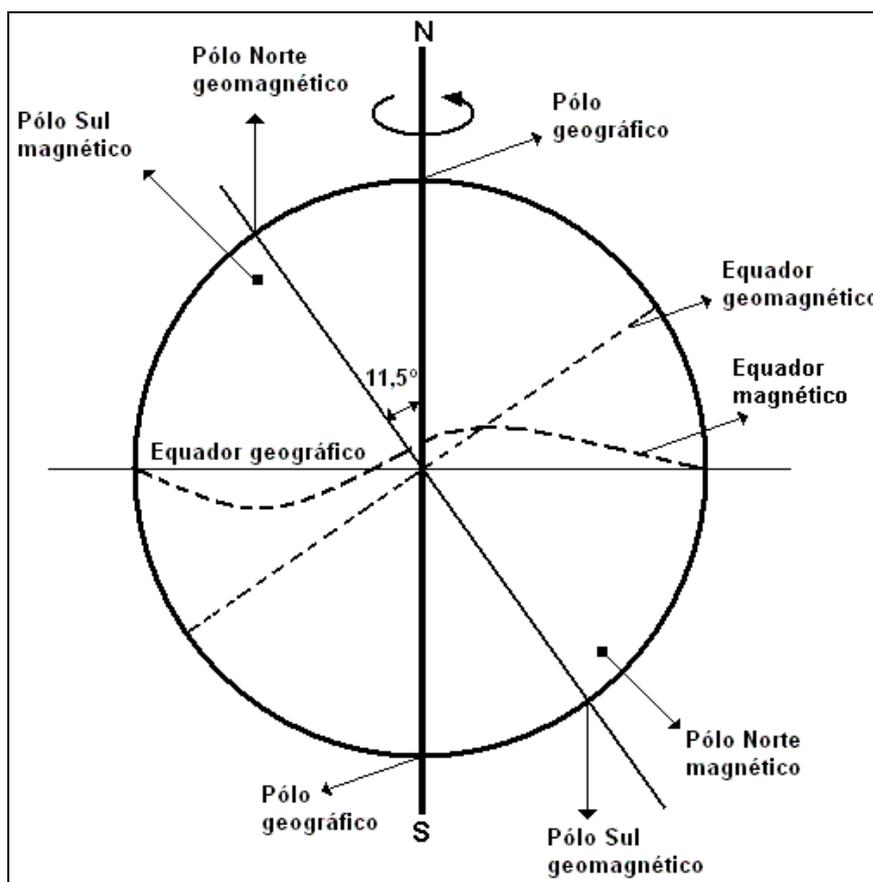


Figura 2.7 – Localização dos polos geográficos, geomagnéticos e magnéticos; do equador geográfico, geomagnético e equador magnético.

Estes polos diferem dos *polos magnéticos* de inclinação, que são os pontos médios das regiões sobre a superfície da Terra onde o campo é vertical. Os polos Geomagnéticos e os polos magnéticos deveriam coincidir se o campo fosse dipolar e geocêntrico. Mas este não é o caso e cerca de 10% a 20% (em média) do campo na superfície da Terra permanece depois que o campo dipolar de melhor ajuste é removido, este campo é chamado de *campo não-dipolar*. Assim, o *campo dipolar* pode responder por até 90% (em média) da intensidade total do campo terrestre.

As variações do Campo Geomagnético podem ser observadas a partir de cartas magnéticas construídas a partir de dados provenientes de estações Geomagnéticas fixas e moveis, utilizando um modelo de harmônicos esféricos.

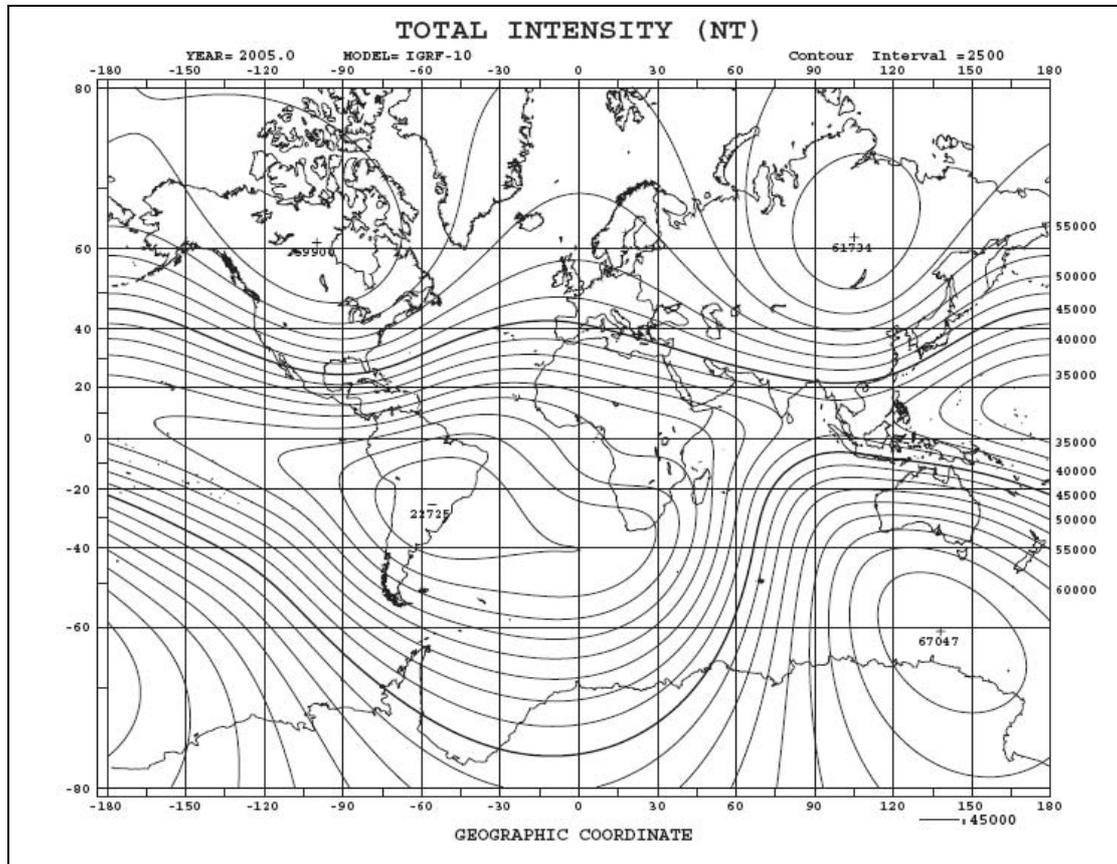


Figura 2.8 - Carta magnética de inclinação e de declinação e de intensidade total.

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

2.2. Magnetosfera Terrestre

A *Magnetosfera* é uma região em que o Campo Magnético domina o movimento do plasma, constituído principalmente de prótons e elétrons. A forma das linhas do campo magnético é tal que estas são achatadas de frente ao Sol, pela ação do vento solar, sendo alongadas do lado oposto [KIRCHHOFF, 1991].

Na Magnetosfera existem camadas ionizadas formando a *ionosfera*. A ionosfera é a região onde se movimentam partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo magnético resulta em modificações nas condições de transporte do meio ionizado. A ionosfera é dividida em três regiões: a região D: situada entre 50–90 km; região E: 90–120 km e; região F: 120–1500 km. E na parte superior, a magnetosfera

está limitada pela *magnetopausa*, depois da qual o Campo Geomagnético é nulo [AKASOFU e CHAPMAN, 1972].

As contribuições externas são geradas essencialmente pelos ventos solares e sua influência sobre a atmosfera da Terra, com variações temporais predominantemente de curto período. O fluxo contínuo de partículas ionizadas do vento solar confina o campo magnético na magnetosfera, deformando-a de maneira a existir uma cauda, como a de um cometa, que se estende por distâncias maiores do que a distância Terra-Lua, no sentido oposto ao Sol. A Figura 2.9 apresenta a composição da Magnetosfera, num plano meridiano meio-dia – meia-noite.

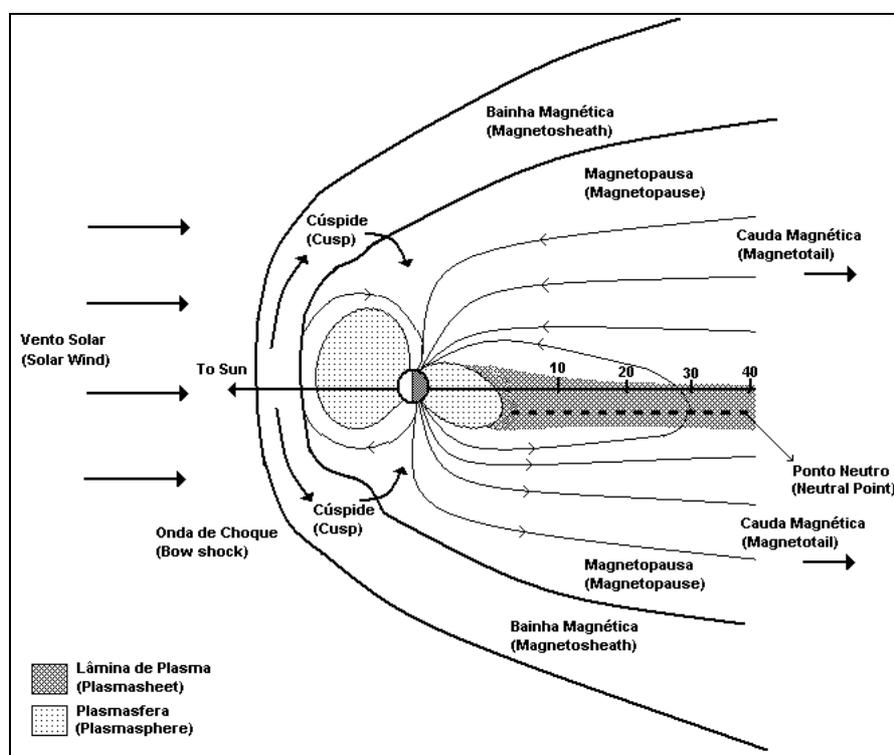


Figura 2.9 – Composição da Magnetosfera.

Um *arco de choque* (bow shock) é produzido na região onde o vento solar é freado pela interação com o campo terrestre, como mostra a figura 2.9. Grupos de partículas ionizadas são aprisionados em regiões conhecidas *cinturões de radiação de Van Allen* (figura 2.10), seguindo em trajetória espiral as linhas de campo polares (figura 2.11).

Mudanças no vento solar eventualmente fazem com que o fluxo de partículas na alta atmosfera aumente, produzindo as *Auroras Polares*. As mudanças da atividade

solar podem ser associadas com aumento do número de manchas solares e podem causar flutuações abruptas no Campo Geomagnético, chamadas de *tempestades magnéticas*. As tempestades magnéticas representam uma forte influência sobre o planeta, interferindo no clima e em várias atividades tecnológicas. Falhas em circuitos de satélites, interrupções em sistemas de comunicação via rádio, aumento da corrosão em oleodutos por corrente induzida na terra e falhas na distribuição de energia elétrica em longas distâncias, são alguns dos exemplos da ação das tempestades magnéticas.

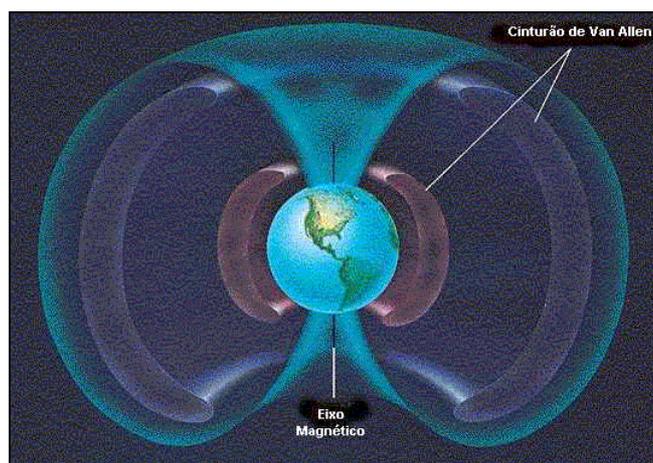


Figura 2.10 - Cinturão de Radiação de Van Allen.

Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica>

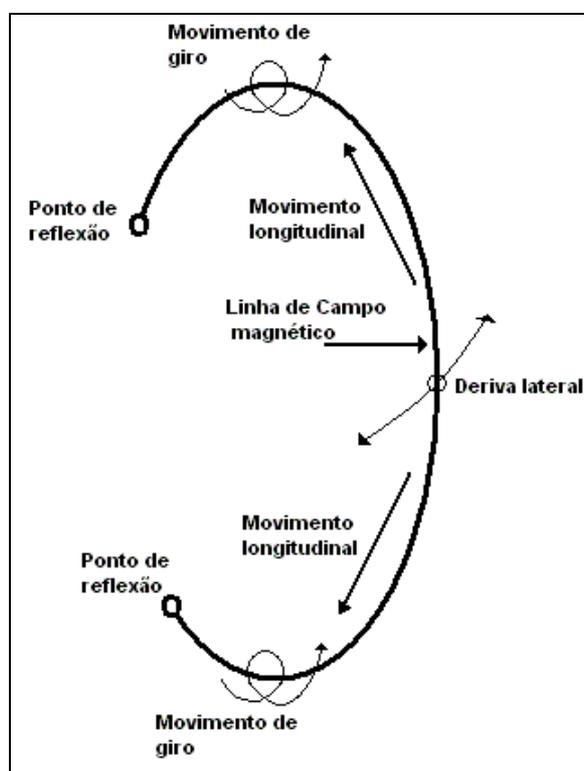


Figura 2.11 - Movimentos de carga elétrica na presença do Campo Magnético.

2.3. Variações Geomagnéticas

As funções de um observatório magnético é monitorar o Campo Geomagnético e suas variações nas três direções, componentes **X**, **Y** e **Z** ou **H**, **D** e **Z**.

As variações Geomagnéticas podem ser classificadas em seculares, diurnas (período de 24 horas), distúrbios (associados a tempestades magnéticas e com períodos bastante variáveis), pulsações (com períodos entre 0,2 e 1000s), atmosféricas (períodos inferiores a 1s) e produzidas pelo homem, sendo que as variações seculares são as únicas com origem interna á Terra.

Basicamente há dois tipos de variação magnética: as que correspondem a períodos magneticamente calmos, e as variações mais intensas associadas a tempestades magnéticas. As variações diurnas do primeiro tipo ou calmas são de dois tipos principais, a variação Sq, e uma mais fraca chamada variação L. A primeira é influenciada pela ação do Sol (S), em tempo calmo (q), e a segunda pela (L). As variações mais intensas, associadas às tempestades, são as variações perturbadas que é chamada SD (Solar Disturbed).

As variações Sq, por serem variações pequenas em torno de um valor médio, são expressas na unidade gama (γ) sendo $1\gamma = 10^{-9}$ T. As variações Sq, nas componentes **X**, **Y** e **Z** para o hemisfério Norte, equador e hemisfério Sul.

A fim de definir rapidamente o estado de atividade do campo magnético; foram criados vários índices, baseados nas variações de **F**, medidas pelos magnetômetros. O índice **K** é um índice local e é atribuído a cada três horas (intervalos 0-3,3-6,...21-24), fornecendo 8 valores diários. O objetivo deste índice é medir a atividade geomagnética causada pelas correntes elétricas produzidas ao redor da Terra (na ionosfera), pela radiação corpuscular. Com base neste índice **K** de atividade magnética, podemos classificar os dias em calmos, perturbados ou normais.

As tempestades magnéticas são consequência do aumento de correntes magnetoféricas e ionosféricas devido à interação entre o vento solar e o Campo Magnéticos Terrestre, e a incidência de raios X solares e radiação UV solar, aumentando os sistemas de correntes ionosféricas de tal maneira que o campo magnético experimenta fortes perturbações. Uma tempestade magnética típica pode ser dividida em uma fase inicial, com duração, e uma fase de recuperação, com duração de algumas horas a alguns dias, dependendo da intensidade da tempestade.

As pulsações Geomagnéticas e os eventos transientes relacionam-se com interações complexas entre o vento solar e as camadas de plasma que constituem a magnetosfera e a ionosfera Terrestre. São geradas por flutuações na velocidade e densidade do vento solar que, em contato com magnetosfera, originam ondas hidromagnéticas. Essas ondas chegam até a ionosfera guiadas pelas linhas de Campo Geomagnético, causam precipitação de partículas, intensificam as correntes ionosféricas e são modificadas nessa interação, transformando-se em ondas eletromagnéticas.

Samson (1991) dividiu as pulsações Geomagnéticas em dois tipos de pacotes de ondas:

- Pulsações Contínuas (Pc)
 - Pc 1, período 0,2 a 5 segundos;
 - Pc 2, período 5 a 10 s;
 - Pc 3, período 10 a 45 s;
 - Pc 4, período 45 a 150 s;
 - Pc 5, período 150 a 600 s;
 - Pc 6, período acima de 600 s
- Pulsações Irregulares (Pi)
 - Pi 1, período 1 a 40 segundos;
 - Pi 2, período 40 a 150 s;
 - Pi 3, período acima de 150 s.

No domínio da frequência, dividiu também os tipos de pulsações em três pulsações em três categorias:

- Baixa frequência (1 – 10mHz);
- Média frequência (10mHz – 0,1 Hz);
- Alta frequência (0,1 – 10Hz).

2.4. 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 da intensidade 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. Desta forma, observa-se que a região apresenta diversos fenômenos produzidos pela interação do fluxo de partículas com as linhas do campo. Alguns destes fenômenos causam problemas em equipamentos e satélites que orbitam a Terra. Vários destes fenômenos são estudados e bem documentados, fornecendo suporte ao estudo da AMAS.

Medidas efetuadas ao longo dos últimos quatro séculos indicam que numa escala de alguns milhares de anos, essa região de baixa intensidade magnética tende a mover-se ao redor do planeta, na direção leste-oeste. E observações astronômicas mostram que anomalias semelhantes a essa e geográfico da Terra – devem ocorrer em muitos outros planetas do sistema solar, idéia reforçada pela recente verificação do fenômeno em Júpiter [Pinto Júnior e Gonzalez, 1989].

Capítulo 3. Instrumentos Utilizados na Medida do Campo Magnético

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 3.1, os sensores de campo magnético podem ser classificados em: sensores de componente vetorial 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.

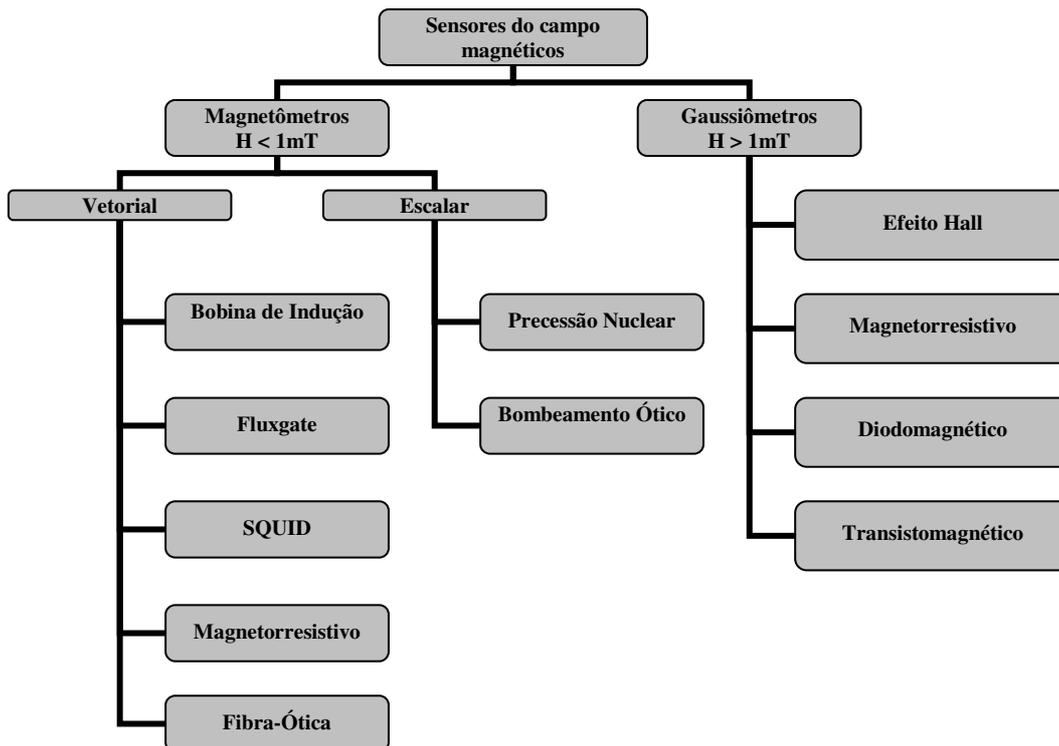


Figura 3.1 – Classificação dos sensores magnéticos.

Os magnetômetros escalares medem apenas a intensidade do campo magnético. Já os magnetômetros vetoriais, medem a intensidade do campo magnético em cada uma das três direções que formam o vetor campo geomagnético. Entre os magnetômetros escalares podemos citar os magnetômetros de indução, de precessão de prótons e os de bombeamento ótico. Entre os magnetômetros vetoriais, destacam-se os de efeito Hall, os SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device), e os fluxgates.

O princípio de funcionamento do **magnetômetro de indução** baseia-se na lei de indução de Faraday, que determina o aparecimento de uma força eletromotriz induzida quando há variação do fluxo magnético que passa por uma determinada seção. Esse magnetômetro utiliza o artifício de girar as espiras de forma criar variação do fluxo magnético, e com isso, conseguem medir o valor absoluto do campo. Porém as partes moveis causam problemas de vibração e maior ruído magnético [Kabata, 2000].

O magnetômetro de **precessão de prótons** (próton precession magnetometer) é o instrumento mais popular para medição escalar da intensidade de campo magnético. Sua principal aplicação está na exploração geológica e mapeamento aéreo do campo geomagnético. Como seu princípio de funcionamento é baseado em constantes atômicas, é utilizado também como padrão para calibração de magnetômetros. Este tipo

de magnetômetro possui baixa taxa de amostragem, na ordem de 1 a 3 amostras por segundo, logo não pode ser utilizado em medições com rápida variação de campo [Crasto, 2003]. O magnetômetro de **bombeamento ótico** (optically pumped magnetometer) opera com alta taxa de amostragem e capaz de maior sensibilidade que o magnetômetro de precessão de prótons, no entanto é de custo mais elevado.

Os magnetômetros que utilizam dispositivos supercondutores de **interferência quântica (SQUIDS)**, são os de maior sensibilidade entre todos os instrumentos de medição de campo magnético. Estes sensores operam em temperaturas próximas de zero absoluto e necessitam de um sistema de controle térmico especial, o que torna os magnetômetros SQUIDS menos robustos, menos confiáveis e de maior custo, para o uso em pesquisas geomagnéticas.

E os dispositivos de **Efeito Hall** são os mais antigos e comuns para medição vetorial de alto-campo. São especialmente utilizados em campos extremamente altos, maior que 1T. Os magnetômetros de efeito Hall são muito pouco utilizados nas medidas do campo geomagnético devido a sua baixa sensibilidade.

3.1. Magnetômetro 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, conforme a curva de histerese $B \times H$ mostrada na Figura 3.2. 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.

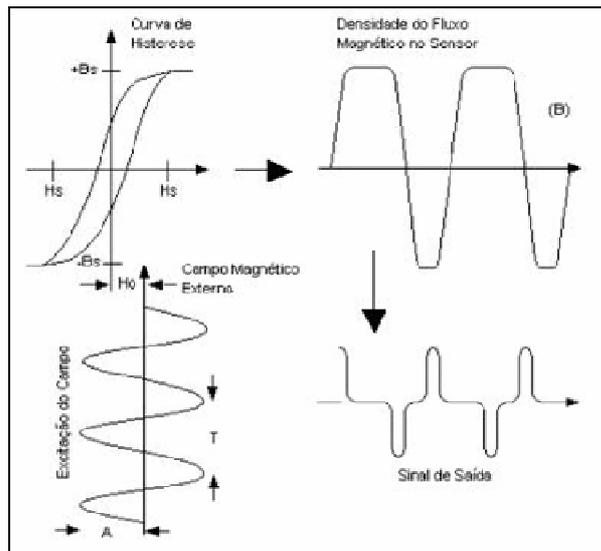


Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.
Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos

Para medidas do Campo Geomagnético geralmente não são usadas às 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, conforme mostra a Figura 3.3. 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.

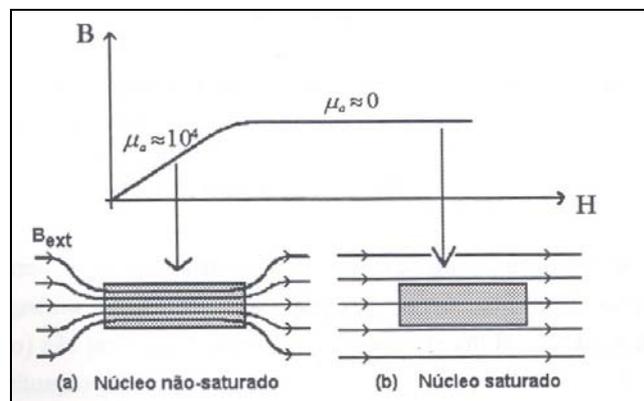


Figura 3.3 – Saturação do núcleo
Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos

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.

3.1.1. 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, linear ou toroidal, as formas de excitação do núcleo, as formas de detecção, etc.

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, como esta representado na figura 3.4. 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.

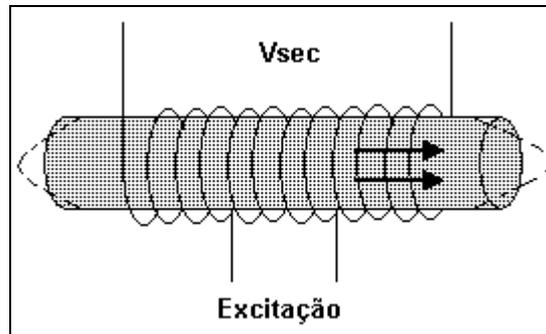


Figura 3.4 – Núcleo linear.

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:

$$\varphi_1 = uNAH_{ext} \quad (\text{Eq.3.1})$$

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:

$$B_{ext} = uH_{ext} \quad (\text{Eq.3.2})$$

Logo:

$$\varphi_1 = NAB_{ext} \quad (\text{Eq.3.3})$$

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} .

$$\varphi_2 = uNA(H_{ext} + H_s) = NAB_s \quad (\text{Eq.3.4})$$

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:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = NA(B_s - B_{ext}) \quad (\text{Eq.3.5.a})$$

ou

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = NA(B_s - uH_{ext}) \quad (\text{Eq.3.5.b})$$

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

O sensor com **dois núcleos lineares** segue a mesma análise feita anteriormente. As barras lineares são postas em antiparalelo, em sentido contrário, como mostra a Figura 3.5.

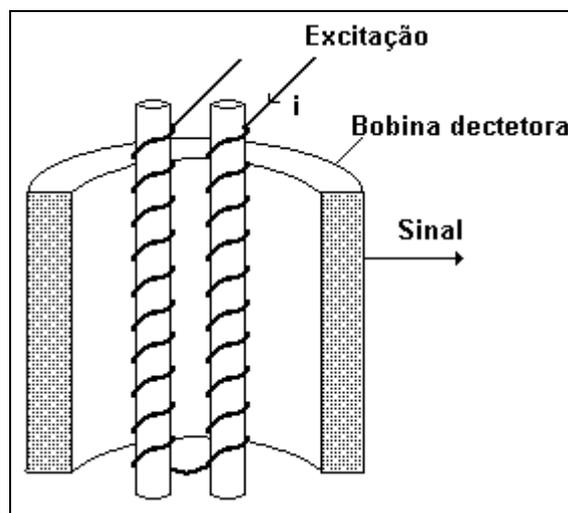


Figura 3.5 – Dois núcleos em barra.

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.

Os **sensores em anel** ou **toroidais** funcionam de maneira análoga ao sensor com dois núcleos lineares em antiparalelo, podendo ser considerado como duas semi-circunferências unidas, como esta representado na Figura 3.6. Devido a este tipo de geometria, os efeitos desmagnetizantes sofridos pelo núcleo são bastante reduzidos, visto que o caminho magnético é fechado, “circular”.

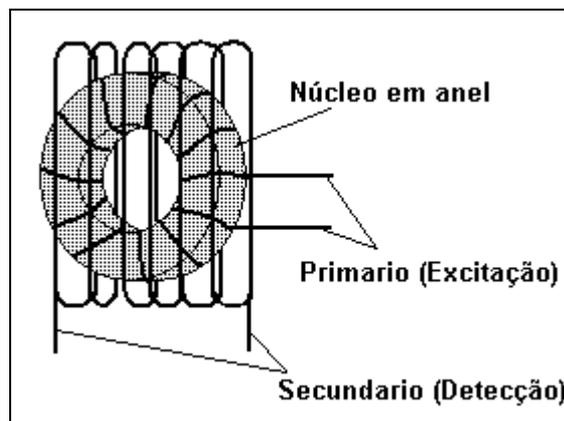


Figura 3.6 – Núcleo em anel.

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”, diminuído assim o ruído;
- Maior facilidade de se obter a saturação do núcleo, visto que o circuito magnético de excitação é fechado;

3.2. 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.

3.2.1. 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.

3.2.2. 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.

3.2.3. 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.

3.2.4. 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 aquele 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.

3.2.5. 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 4. Implementação do fluxgate

4.1 – 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, como podemos ver na Figura 4.1.

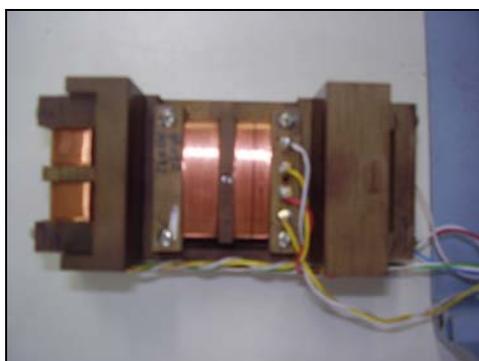


Figura 4.1 – Sensores do magnetômetro fluxgate.

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 4.2 – Núcleo ferromagnético toroidal.

Este núcleo apresentado na Figura 4.2 é industrializado pela companhia *Magnetics Div* e tem seu modelo com referência 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. Está 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 4.3:

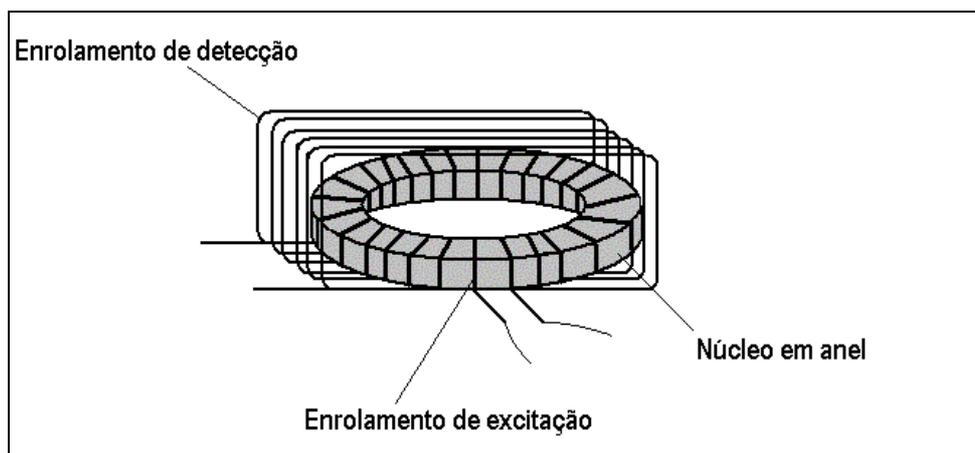


Figura 4.3 – Esquema do sensor magnético com o enrolamento de excitação e de detecção .

Vista frontal do sensor:

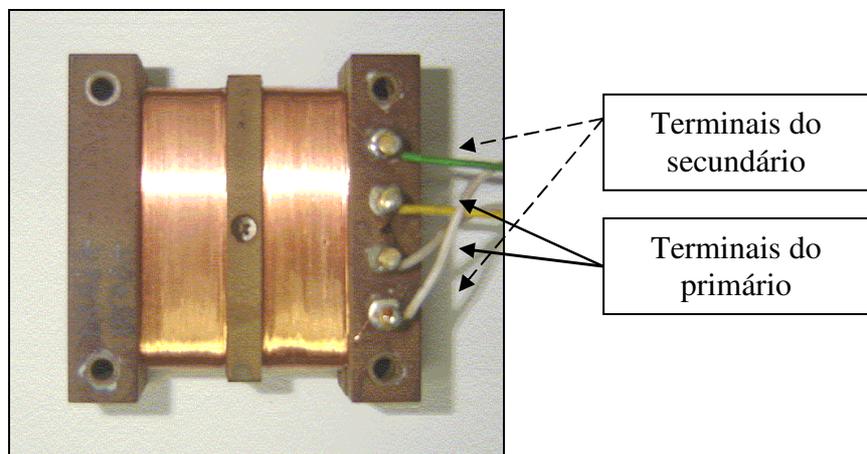


Figura 4.4 – Vista frontal do secundário.

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.

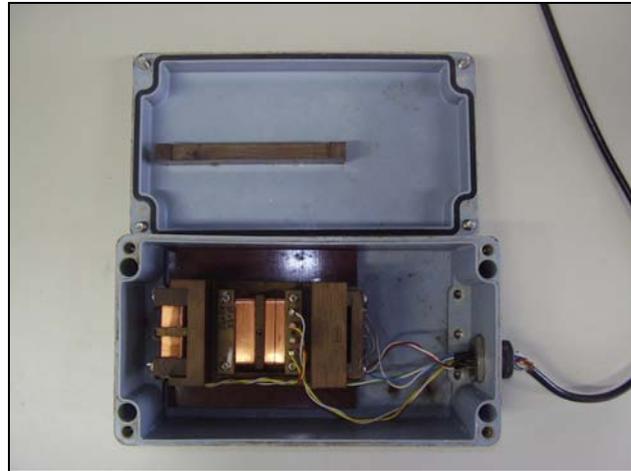


Figura 4.5a – Magnetômetro Fluxgate.



Figura 4.5b – Magnetômetro Fluxgate.

4.2 – 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 contínua 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.

4.2.1 – Circuito e Sinal de Excitação

O circuito de excitação consiste basicamente em um cristal oscilador e um circuito integrado divisor de frequência, que 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. Para este tipo de sensor com núcleo em anel, foi utilizado cristais com frequências entre 5,0KHz a 9,0KHz. Sendo que os cristais que apresentaram melhor sinal de excitação foram os cristais de 6,0KHz e 7,0KHz.

No circuito de excitação foi utilizado o circuito integrado LH0002CN, que é um amplificador de corrente de baixa distorção harmônica, que teve de ser substituído,

devido a um erro na placa auxiliar para adaptar o circuito integrado, por um par de transistores que tivesse uma resposta à saturação positiva e à saturação negativa bem simétrica e com tempo de transição bastante próxima. Assim escolheram-se os transistores 2N2222A e 2N2907A.

O esquema de montagem dos componentes para o circuito de excitação é mostrado na Figura 4.6 abaixo:

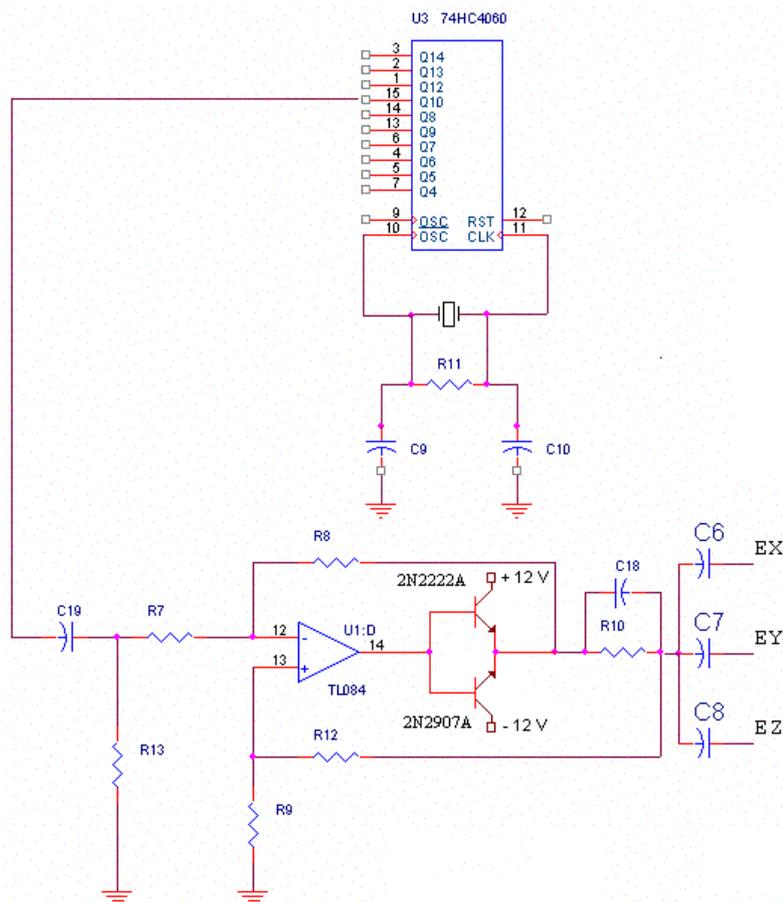


Figura 4.6 – Circuito de excitação.

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 referência 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 6 KHz:

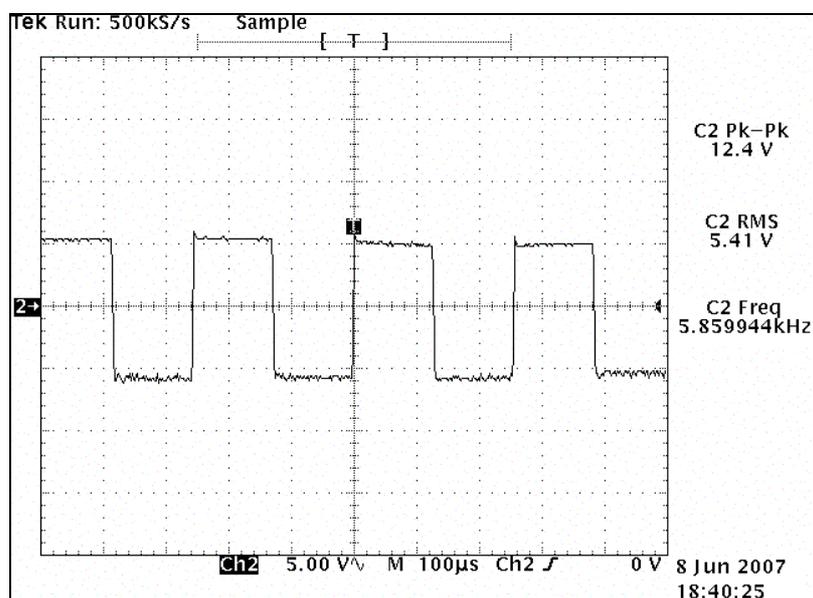


Figura 4.7 – Sinal de excitação com frequência 6,0Khz.

Quando a excitação é conectada ao enrolamento primário há uma distorção do sinal quadrado devido à indutância da bobina de excitação. A Figura 4.8 mostra a distorção do sinal de excitação para um cristal de 6,0 kHz.

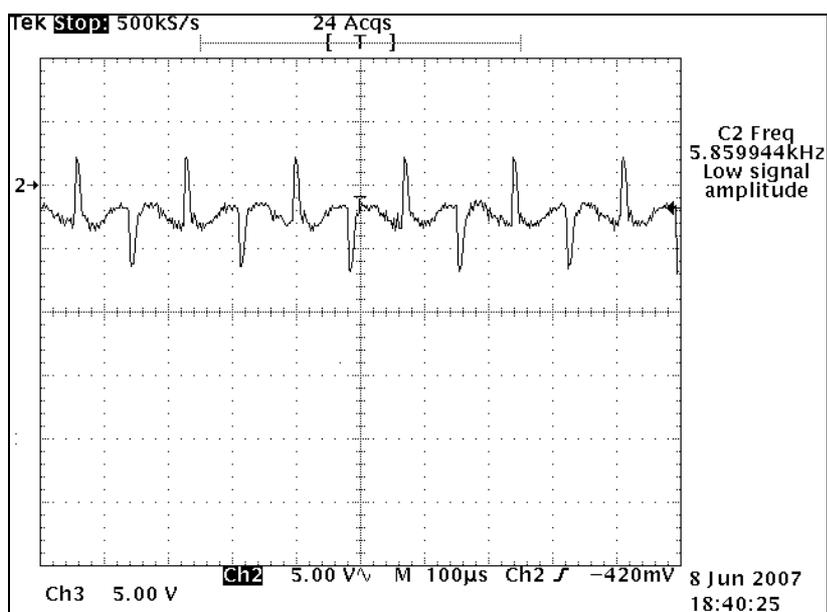


Figura 4.8 – Distorção do sinal de excitação com frequência de 6,0Khz.

O sinal de excitação obtido do CI 4060 passa então, por um capacitor de desacoplamento contínuo e é levado a um amplificador formado pelos transistores

escolhidos, que fornecem pulsos de corrente para o enrolamento de excitação. Neste ponto temos a formação de pulsos de corrente curtos e intensos, através de um capacitor introduzido, no circuito LC que se forma no enrolamento de excitação. Assim, ganhando uma maior sensibilidade no sensor.

4.2.2 – 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.

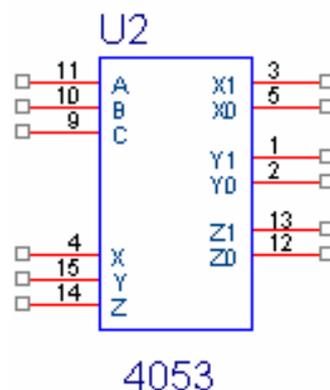


Figura 4.9 – Circuito integrado multiplexador.

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.

4.2.3 – 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:

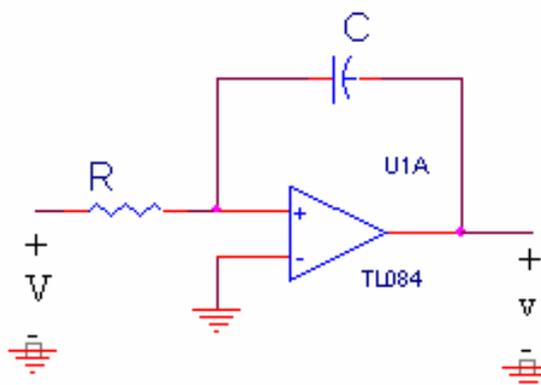


Figura 4.10 – Circuito Integrador.

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

4.3 – 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:

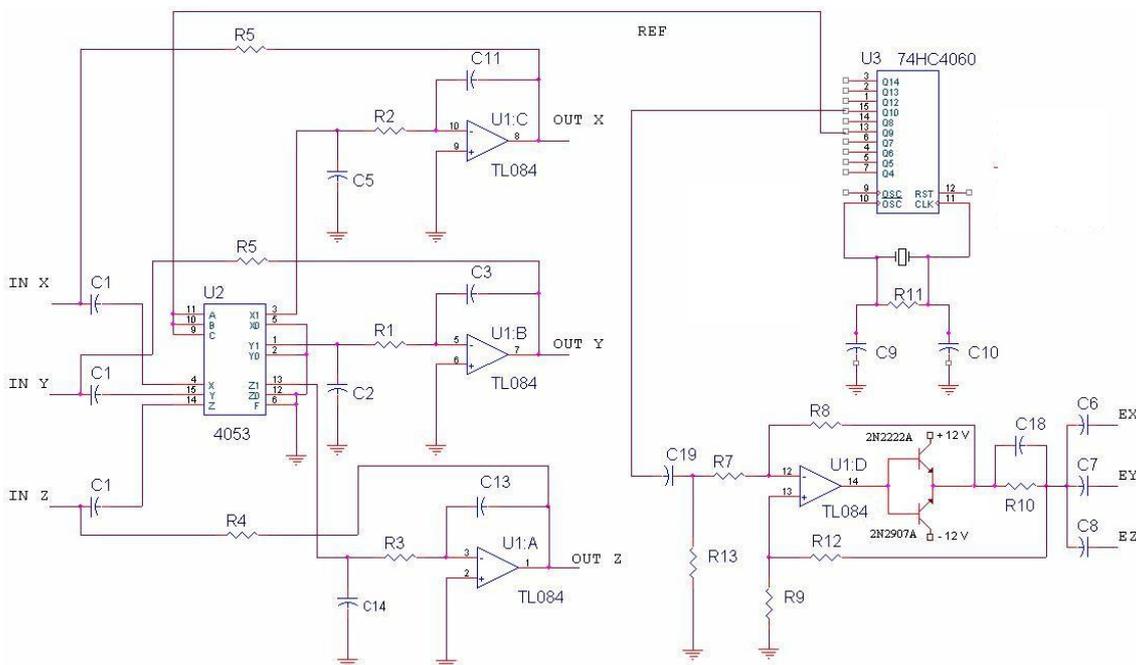


Figura 4.11 – Schematic do circuito de excitação e detecção.

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

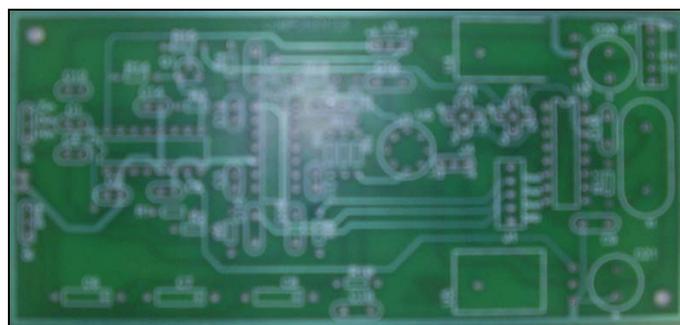


Figura 4.12a – Vista superior (lado dos componentes).

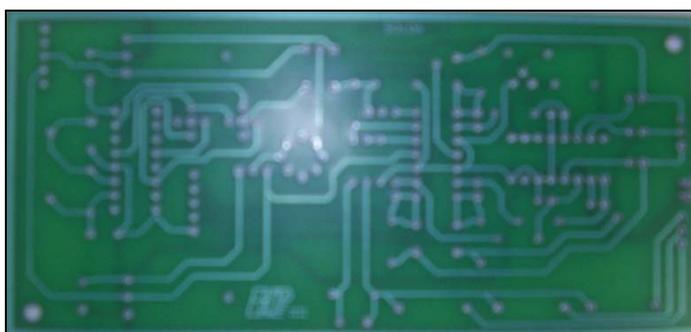


Figura 4.12b – Vista inferior (lado da solda).

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

Capítulo 5. Resultados Obtidos

Inicialmente foram realizados testes com vários cristais com frequências entre 5,0 kHz a 9,0 kHz, para que pudéssemos encontrar a frequência ideal e assim gerar o sinal de excitação adequado para este tipo de sensor. Assim os cristais que apresentaram melhor sinal de excitação foram os cristais de 6,0 kHz e 7,0kHz. Entre estes dois cristais foi selecionado o cristal com frequência de 6,0 kHz, por apresentar o sinal de excitação com menos ruído.

Após analisar o sinal de excitação adequado, verificou-se a diferença de fase entre o sinal $2f$ que entra no circuito integrado 4053 do sinal $2f$ adquirido no enrolamento de detecção. Feita a verificação, começou-se a etapa de montagem do circuito na placa. Como foi mencionado na sessão 4.2.1, o circuito integrado LH 0002CN teve de ser substituído por um par de transistores que tivesse a resposta de saturação simétrica. A Figura 5.1 mostra os testes com o par de transistores com o circuito já montado no Laboratório de Magnetosferas – CRS/CIE/INPE – MCT.



Figura 5.1 – Testes com os transistores 2N2222A e 2N2907A.

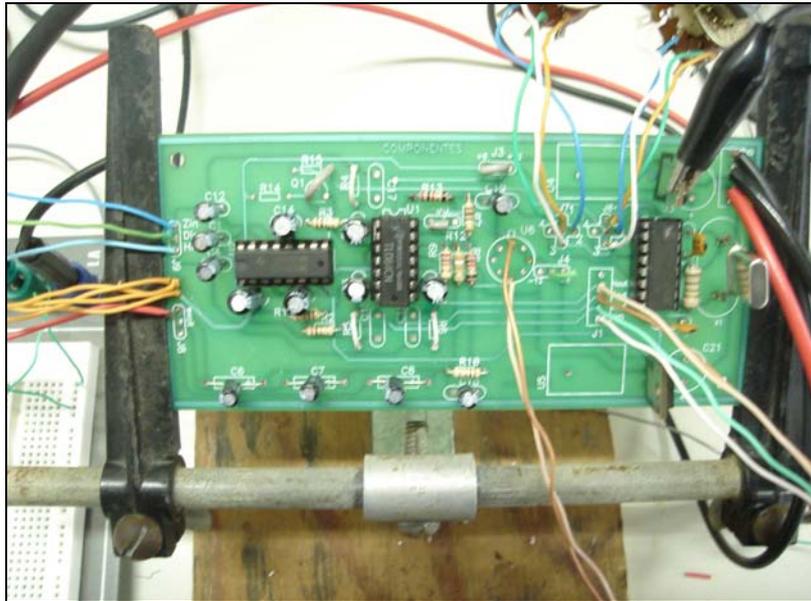


Figura 5.2 – Circuito implementado no CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria.

Com o circuito montado, como podemos ver na Figura 5.2, e em funcionamento, foi feita análises do funcionamento dos sinais nos estágios, já explicados no capítulo 3, na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT em São Martinho da Serra – RS (29.43°S, 53.82°W).



Figura 5.3 – Sinais analisados Na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

Os sinais analisados no Observatório Magnético, Figura 5.3, mostraram-se com pouco ruído, já que na bancado do Laboratório de Magnetosferas – CRS/CIE/INPE –

MCT, não foi possível conseguir estes sinais sem ruído por causa da interferência de outros equipamentos. Os gráficos mostrados na Figura 5.4 representam os sinais de excitação no canal 2, o sinal do enrolamento de detecção no canal 3 e o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação. No canal 2 do osciloscópio o sinal de excitação aplicado no sensor é originalmente uma onda quadrada, mas ao ser ligado na bobina de excitação acaba sendo distorcido devido à indutância da bobina. O sinal detectado no enrolamento de detecção apresenta uma frequência de aproximadamente 12 kHz o que faz sentido já que o sinal de excitação utilizado é de aproximadamente 6,0 kHz. Como se sabe a frequência detectada tem o dobro da frequência do sinal de excitação.

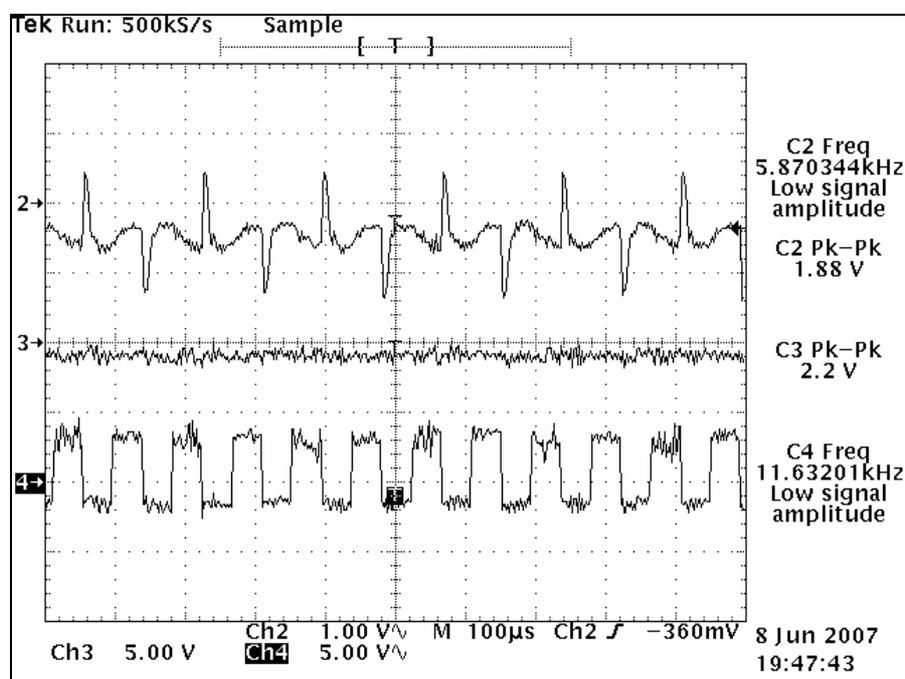


Figura 5.4 – Sinal de excitação, o sinal do enrolamento de detecção e o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação.

Assim com a primeira etapa do circuito concluída e em bom funcionamento, passamos para a segunda etapa, onde conseguimos a diferença entre cada par de saídas do CI 4053 os sinais com um nível contínuo de tensão e em sua saída uma variação linear. De acordo com a variação das diferenças introduzidas pelo sensor e comparadas com a referência. A Figura 5.5 apresenta as três saídas diferentes para cada sensor orientado segundo o seu eixo nas três componentes vetoriais do Campo Geomagnético.

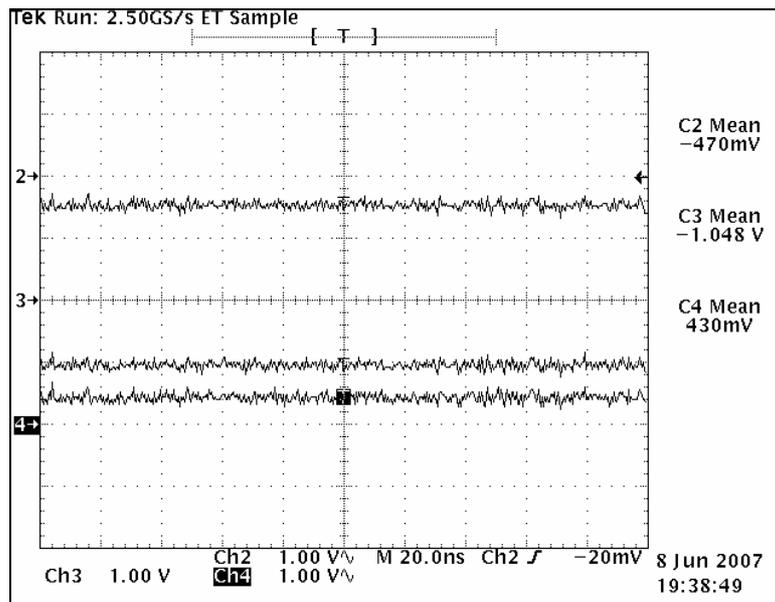


Figura 5.5 – Três medidas referente à saída do CI 4053 para cada sensor.

Embora os resultados tenham sido positivos, o sinal do enrolamento de detecção mostrou-se com ruído. A causa do ruído no enrolamento de detecção deve-se ao par de transistores, como podemos ver na Figura 5.6 os sinais de excitação sem os transistores tem menos ruídos do que o sinal de excitação da Figura 5.4. Conseqüentemente ocasionando este ruído na bobina secundaria e fazendo com que os gráficos do Campo Geomagnéticos ficassem constantes. Assim também notamos que o circuito sem os transistores superaquecia o circuito integrado TL 084CN.

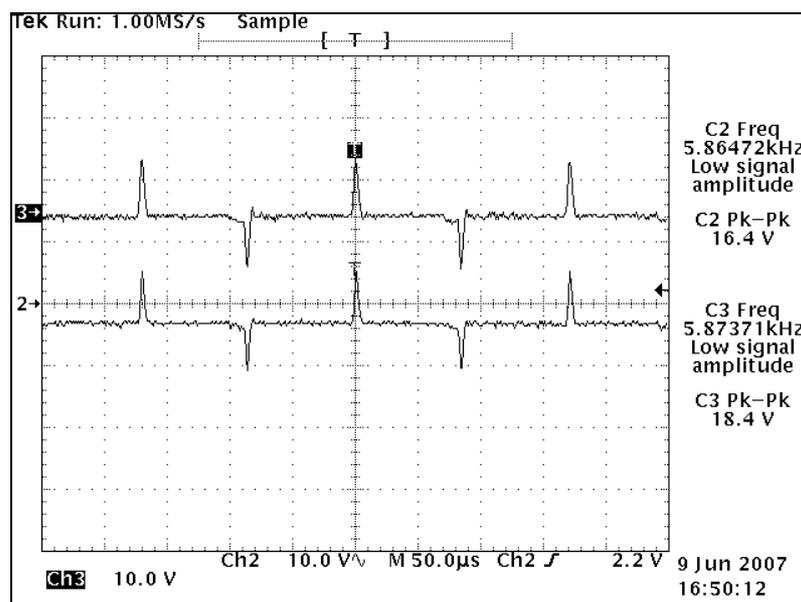


Figura 5.6 – Sinais de excitação sem os transistores.

Contudo estes resultados serviram como base para entendimento mais minucioso do circuito, em especial sobre o circuito de excitação, onde podemos verificar que para este tipo de sensor não é possível usar o par de transistores devido à frequência mais elevada de excitação.

Capítulo 6. Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto, construção e discussões sobre um magnetômetro fluxgate, com núcleo toroidal, para estudo do Campo Geomagnético. Os sinais encontrados para excitação e os sinais da etapa final, onde se obteve o nível de continuidade da tensão após o circuito integrador, ficaram dentro da expectativa inicial comparável a outros magnetômetros fluxgate encontrados na literatura. Porém observou-se um ruído na bobina secundária que conseqüentemente interferiu na coleta dos dados. A causa desse ruído é provocada pelo par de transistores que substituíram o circuito integrado LH0002CN. Sendo assim, o par de transistores com este tipo de circuito, é inadequado para o magnetômetro com núcleo toroidal.

Transcorrido o período de substituição dos bolsistas no Projeto até a conclusão desta segunda etapa, foram obtidos avanços satisfatórios, sobretudo na pesquisa e desenvolvimento de instrumentação voltada para sensoriamento Geomagnético. Os resultados alcançados mostraram o bom andamento do Projeto. Embora o magnetômetro não encontra-se operando na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, devido circuito integrado LH0002CN estar danificado e ser substituído pelo par de transistores que não se adequaram a este tipo de sensor. Os avanços obtidos refletiram um crescimento no desenvolvimento do protótipo do Magnetômetro de Baixo Ruído. Assim esta sendo construído um novo circuito para substituir este com um novo layout.

Com o desenvolvimento deste Projeto o Bolsista pode 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 do Bolsista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Campbell, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [2]. Kabata, Wanderlí. **Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos**. São José dos Campos, SP – 2000.
- [3]. 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.
- [4]. Barbosa, Maria José Faria. **Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas**. São José dos Campos, SP – 2003.
- [5]. Acuña, M. H. And Pellerin, J. A **Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer**, **IEEE Trans. On Geosci. Electronics**, vol GE-7, p.252-260, 1969.
- [6]. Merrill, R.T. – **The Earth's Magnetic Field, (International geophysics series)**, 1983 Academic Press, London
- [7]. Sociedade Brasileira de Física – **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, Vol. 12 e 13
- [8]. Prindahl, F., **Instrumentos Geomagnéticos, Publicações do Observatório Nacional**, Publicação Especial, N^o 09, 1986.
- [9]. 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.
- [10]. Jankowski, J e C. Sucksdorff. **Guide for magnetic measurements and observatory practice**, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder, 1996.
- [11]. Crasto, R.V.Palha. **Magnetômetro de Fluxo saturado (Fluxgate) em arranjo gradiométrico para detecção de dutos e cabos**. Rio de Janeiro, RJ – 2003.
- [12]. KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.
- [13]. AKASOFU, S. e CHAPMAN, S. **Solar-Terrestrial Physics**, 889p., Oxford at the Claredon Press, Oxford, 1972.



- [14]. PINTO, Jr. O. e GONZALEZ, W. D. **Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 51, nº 5, 351-365, 1989.

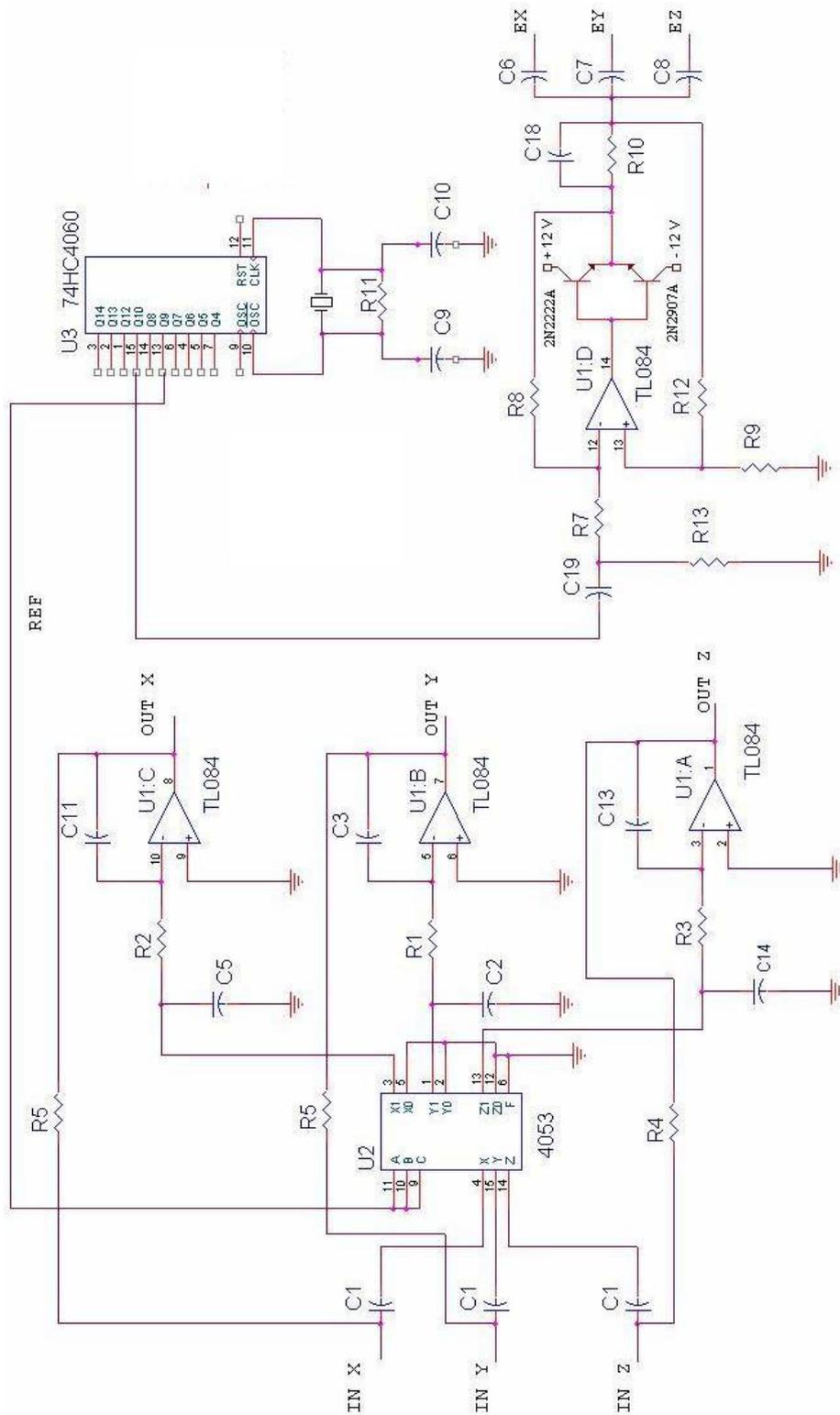


ANEXOS



ANEXO A

Circuito completo do magnetômetro fluxgate de núcleo em anel – Baixo Ruído

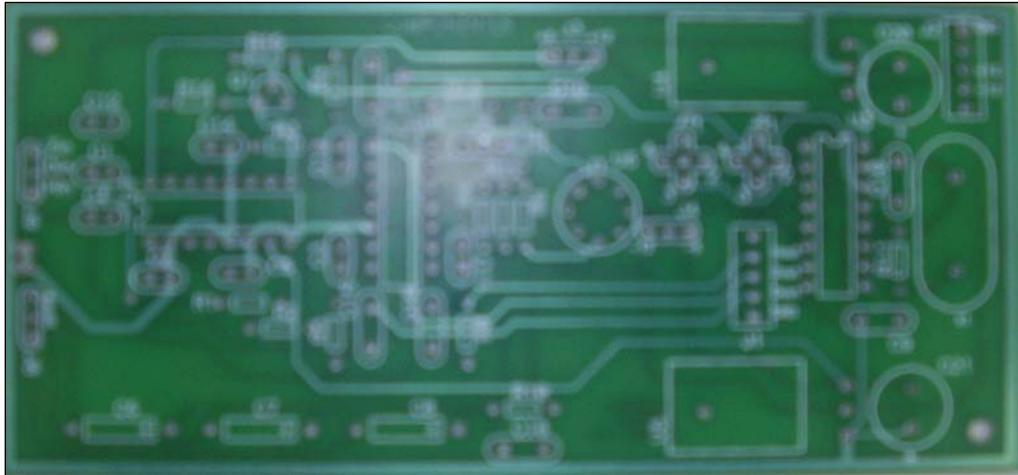




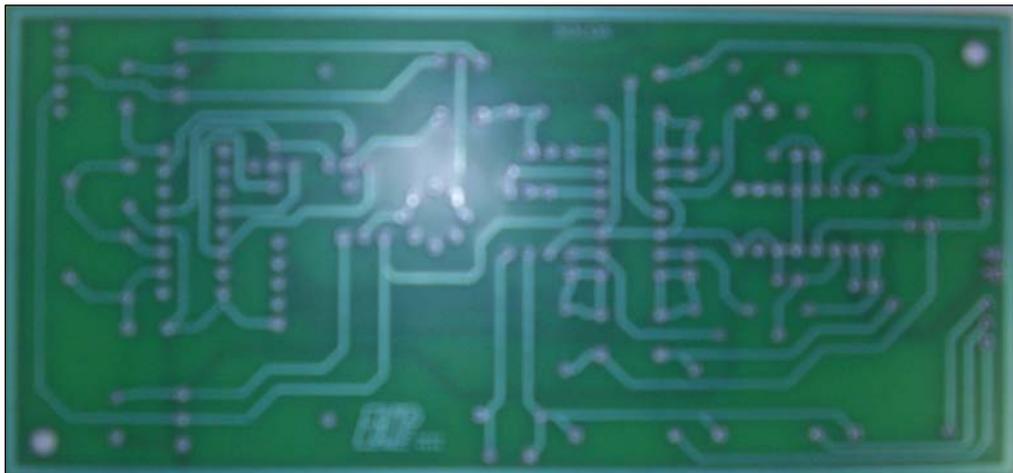
ANEXO B

Placas impressas do circuito do magnetômetro fluxgate em anel.

Vista superior (lado dos componentes)



Vista inferior (lado da solda)





ANEXO C

Títulos e resumos de trabalhos apresentados e ou submetidos.

O bolsista publicou 7 trabalhos, sendo 4 como primeiro autor e foi co-autor de 3 trabalhos científicos que foram apresentados em congressos de Iniciação Científica:

- 01 – Resumo Publicado: **“Magnetometro Tipo Flux-Gate De Baixo Ruído Para Medidas Geomagnéticas”**. Autores: Josemar de Siqueira; Nalin Babulal Trivedi; Nelson Jorge.Schuch. Evento: Seminario De Iniciação Científica Do Inpe-Sicinpe, São José dos Campos, 2006.
- 02 – Resumo Publicado: **“Magnetômetro De Fluxo Saturado Para Pulsações Geomagneticas Pc 3 A Pc 5”**. Autores: Josemar de Siqueira; Cássio Espindola Antunes; Sandro Bertagnolli; Fagner Chagas Rother; Nalin Babulal Trivedi.; Nelson Jorge Schuch. Evento: Simpósio Brasileiro De Geofísica Espacial E Aeronomia – Sbgea, São José dos Campos, 2006.
- 03 -. Resumo Publicado: **“Magnetometro Para Medidas Geomagneticas De Baixo Ruído”**. Autores: Josemar de Siqueira; Cássio Espindola Antunes; Sandro Bertagnolli; Fagner Chagas Rother; Nalin Babulal Trivedi.; Nelson Jorge Schuch.. Evento: Jornada Academica Integrada – JAI, Santa Maria, 2006.
- 04 – Resumo Publicado: **“Geomagnetic pulsations of long periods in the region of the south atlantic magnetic anomaly”**. Autor: Fagner Chagas Rother; Josemar de Siqueira; Sandro Bertagnolli; Cássio Espindola Antunes; Severino Luiz Guimarães Dutra; Nalin B. Trivedi; Nelson Jorge Schuch. Evento: PRIMER ENCUESTRO DE LA RED DE INVESTIGADORES ARGENTINOS EN CIENCIAS DE LA HELIÓSFERA, Buenos Aires, Argentina, 2006.
- 05 – Resumo Publicado: **“Estudos Experimentais Visando O Desenvolvimento De Instrumentação Para Medidas Geomagneticas – Magnetômetro De Núcleo Saturado”**. Autores: Sandro Bertagnolli; Josemar de Siqueira; Cássio Espindola Antunes; Fagner Chagas Rother; Nalin Babulal Trivedi.; Nelson Jorge Schuch. Evento: XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006, Ijuí, RS.
- 06 –Resumo Publicado: **“Magnetômetro De Fluxo Saturado Com Núcleo Toroidal”**. Autores: Cássio Espindola Antunes; Josemar de Siqueira; Sandro Bertagnolli; Fagner Chagas Rother; Nalin Babulal Trivedi.; Nelson Jorge Schuch. Evento: XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006, Ijuí, RS. ANAIS do XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006.
Além dos trabalhos já apresentados nos Congressos a cima citados, até o vigente momento o Bolsista tem mais um Abstracts aceito em Evento futuro.
- 07 – Resumo Publicado: **“Experimental Studies With a Fluxgate Magnetometer Of Toroidal Core”**. Autores: Josemar de Siqueira; Cássio Espindola Antunes; Sandro Bertagnolli; Fagner Chagas Rother; Nalin Babulal Trivedi.; Nelson Jorge Schuch. Evento: **XXIV International Union of Geodesy and Geophysics. Perugia, Italy 2-13, 2007.**

XXIV International Union of Geodesy and Geophysics. Perugia, Italy 2-13, 2007.**EXPERIMENTAL STUDIES WITH A FLUXGATE MAGNETOMETER OF TOROIDAL CORE**

SIQUEIRA JOSEMAR 1, Schuch Nelson J. 1, Antunes Cassio E. 1, Bertagnolli Sandro F. 1; Rother Fagner C. 1, Trivedi Nalin B. 2.

1. Southern Regional Space Research Center - CRS/INPE - MCT, Santa Maria, RS, Brazil.
2. Magnetic Observatory of Vassouras – OMV/ON – MCT, Vassouras, RJ, Brazil.

The fluxgate magnetometers are instruments used for measuring geomagnetic field and its variations. The objective of this work is to construct a ring core magnetometer based on fluxgate principle. The magnetometer described here is constituted by three orthogonal sensors (H, D, and Z components) with a toroidal nucleus. Each sensor is composed for two bobbins in each axis, one for excitement and another bobbin for the second harmonic signal detection which is proportional to the surrounding magnetic field. The functioning of this sensor is based on properties of high permeability material of the ring core. The electronic circuit used in the construction of the magnetometer has three stages. The first stage consists of the generation of a periodic signal of frequency f capable to saturate the iron magnetic nucleus twice per cycle of the excitation signal. The second stage of the circuit is for the detection of a DC signal proportional to the geomagnetic field variation by comparing the phase of the signal obtained from the sensor coil with the original $2f$ signal from which excitation signal f was obtained. After the comparison of the signals is made follows the stage of an integrator which provides smoothed variations proportional to the surrounding geomagnetic field. This type of a magnetometer is a versatile equipment for the detection of geomagnetic field ranging from 0,1nT to 1mT.

Jornada academica integrada – jai, santa maria, 2006.

MAGNETOMETRO PARA MEDIDAS GEOMAGNETICAS DE BAIXO RUÍDO – MAGNETÔMETRO DE NUCLEO SATURADO¹.

Josemar de Siqueira², Cassio Espindola Antunes³, Sandro Bertagnolli⁴,
Fagner Chagas Rother⁵, Nalin Babulal Trivedi⁶, Nelson Jorge Schuch⁷

1. 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. 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.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho, que esta sendo desenvolvido no laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT, é de alcançar um maior conhecimento das técnicas utilizadas na medição do Campo Magnético Terrestre para compreensão dos fenômenos nas áreas de Geofísica Espacial desenvolvendo e aprimorando as habilidades na área de instrumentação para magnetômetros.

3. METODOLOGIA

O sensor escolhido para estudo 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, como é

1 – Trabalho desenvolvido no Laboratório Magnetosferas do CRSPE/INPE – MCT, em parceria com o LACESM/CT – UFSM.

2 – Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Física Licenciatura – UFSM.

3 – Co-Autor: Acadêmico do Curso de Física Licenciatura – UFSM.

4 – Co-Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM.

5 – Co-Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM.

6 – Orientador: Pesquisador do Departamento de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE - MCT e observatório Magnético de Vassouras - OMV/ON – MCT.

7 – Co-orientador: Pesquisador, e Chefe da RSU/CIE/INPE – MCT.

mostrado na Figura 1, 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.

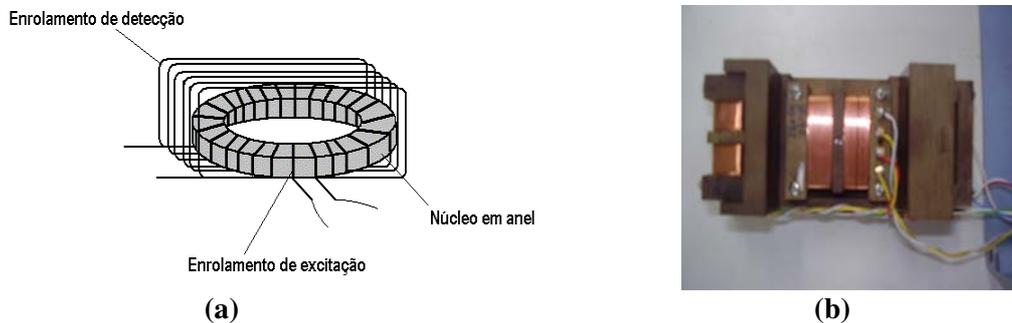


Figura 1- (a) Exemplo esquemático de um sensor de magnetômetro fluxgate toroidal. (b) Sensores do magnetômetro fluxgate.

O enrolamento de excitação é responsável pela saturação magnética do núcleo. 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 da densidade de fluxo magnético B gerada no núcleo do sensor. A cada pulso de saturação do núcleo, a variação da densidade de fluxo que atravessa o enrolamento de detecção cria uma força eletromotriz, *fem*, nesta bobina, gerando um sinal com alto conteúdo harmônico e linear à variação do campo magnético externo.

Para o tratamento adequado da resposta obtida do sensor do magnetômetro de fluxo saturado foi desenvolvido um circuito comparador que faz a análise entre o sinal utilizado na excitação do núcleo e o sinal do secundário. Como a cada ciclo de saturação são induzidos dois pulsos no secundário, o sinal detectado tem o dobro da frequência da excitação.

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 é de conhecimento geral 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 CI 4053 é retirada do sinal de excitação com a frequência dobrada.

No par de saída do CI 4053 obtém-se dois sinais que apresentam uma relação entre a sua frequência e a frequência do segundo harmônico do sinal de entrada, o que apresenta maior linearidade com a variação do campo externo. Os sinais de saída embora apresentem a mesma frequência têm características distintas. O CI 4053 detecta a diferença das fases do segundo harmônico do sinal vindo do sensor e da referência. Após a obtenção dos sinais de saída do multiplexador analógico 74HC 4053 do magnetômetro de fluxo saturado em desenvolvimento, é importante 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.

No caso do magnetômetro de fluxo saturado em desenvolvimento para obter o sinal de tensão contínua esta sendo usado um circuito integrador mostrado esquematicamente na Figura 2, que pode ser visto basicamente como a montagem inversora de um amplificador operacional, onde apenas troca-se a resistência por um capacitor.

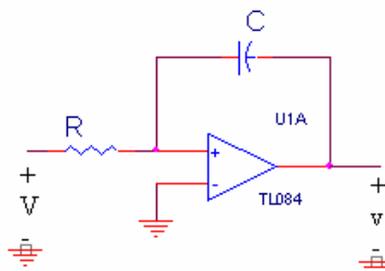


Figura 2 – Esquema do circuito integrador do magnetômetro de fluxo saturado em desenvolvimento no CRSPE/INPE – MCT.

Dessa forma a tensão de saída é proporcional a integral das tensões de entrada, gerando assim um sinal de tensão contínuo que varia linearmente com o Campo Magnético medido.

4. RESULTADOS

Foram utilizados dois “pront-o-labor” para a montagem dos componentes do circuito de excitação e detecção do magnetômetro. O sinal detectado no secundário apresentou 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. Porém, estes testes mostraram um resultado inicial de baixa confiabilidade visto 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.

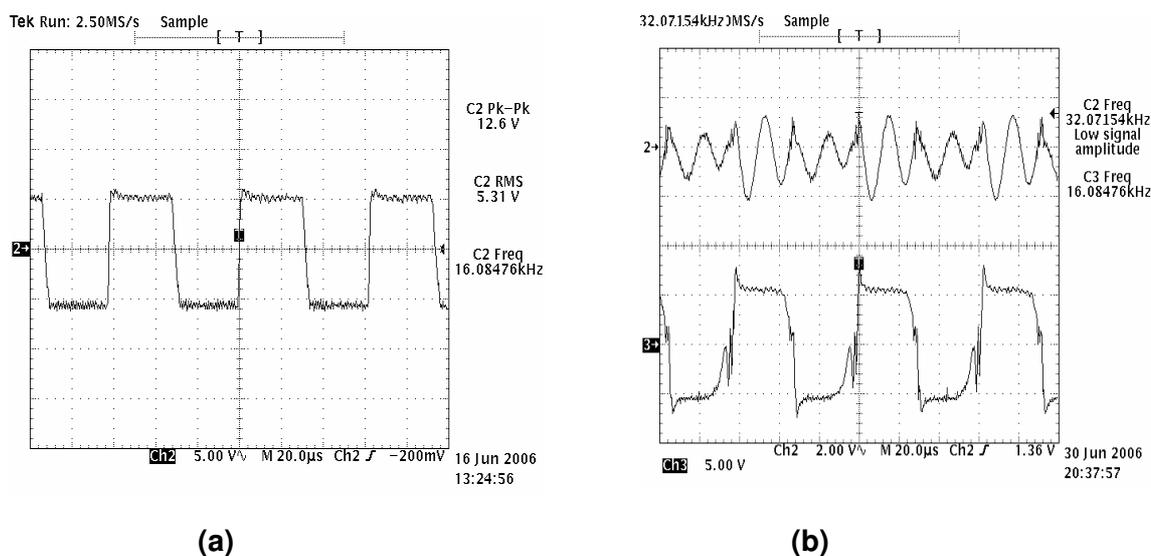


Figura 3- (a) Frequência de excitação 16KHz. (b) Sinal de excitação e tensão detectada do circuito do magnetômetro de fluxo saturado em desenvolvimento no CRSPE/INPE – MCT.

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.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de instrumentação para sensores de campo magnético é uma atividade de grande importância para estudos aprofundados e maior compreensão de fenômenos que atingem diretamente a Terra. 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 mas inclusive para estudos de processos físicos químicos e biológicos.

REFERÊNCIAS

1. **Campbell, W. H.** Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press, New York, 1997.
2. **Acuña, M. H. And Pellerin, J.** A Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer, IEEE Trans. On Geosci. Electronics, vol GE-7, p.252-260, 1969.
3. **Barbosa, Maria José Faria.** Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas. São José dos Campos, SP – 2003.
4. **Kabata, Wanderlí.** Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos. São José dos Campos, SP – 2000.

Simposio Brasileiro De Geofísica Espacial E Aeronomia – Sbgea, São José dos Campos, 2006.

MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO PARA PULSAÇÕES GEOMAGNETICAS Pc 3 a Pc 5

Siqueira, J. [1,2], Antunes, C.E.[1,2], Bertagnolli, S.[1,2], Rother, F.C.[1,2];

Trivedi, N. B.[3]; Schuch, N.J.[1]

**[1] Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT,
Caixa Postal 5021**

Santa Maria, RS, Brasil

**[2] Laboratório de Ciência Espaciais de Santa Maria da Universidade
Federal de Santa Maria - LACESM (CT – UFSM), Av. Roraima, 1000 CEP 97105-
900**

Santa Maria, RS, Brasil

**[3] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT, Caixa Postal
515**

São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Um dos principais objetivos deste trabalho é o desenvolvimento e construção de um magnetômetro de fluxo saturado (fluxgate) para as medidas das pulsações geomagnéticas pc 3 a pc 5. O estudo das variações Geomagnéticas pode revelar importantes informações sobre fenômenos da Magnetosfera, bem como eventos na Ionosfera que podem gerar distúrbios nas telecomunicações ou até mesmo no clima espacial. Este tipo de sensor tem seu funcionamento baseado nas propriedades ferromagnético de alguns materiais, sendo composto por duas bobinas em cada eixo, uma de excitação e outra de detecção do Campo. Cada sensor possui um núcleo toroidal com alta permeabilidade e ortogonais entre si, formando um eixo coordenado que é ajustado as componentes **H**, **D** e **Z** do Campo Geomagnético. Esse núcleo toroidal é exposto a um campo de excitação **H** gerado por uma bobina envolta do anel, que faz variar o fluxo magnético do material segundo a curva de histerese $B \times H$. Quando o fluxo magnético chega ao seu ponto de saturação, a permeabilidade do núcleo decai para valores muito baixos próximos ao do vácuo, como se o toróide houvesse desaparecido. Quando o núcleo não está saturado, o campo magnético externo, o qual se quer medir, se concentra no toróide devido a sua alta permeabilidade. Após receber o campo de excitação, o fluxo magnético no núcleo varia devido à saturação e conseqüente diminuição da permeabilidade do meio. Essa variação do fluxo magnético é detectada por uma segunda bobina ao redor do núcleo. Analisando-se o segundo harmônico do sinal obtido no secundário, bobina de detecção, e o sinal de excitação com a frequência dobrada, nota-se que existe uma proporcionalidade com o campo externo que esta sendo mensurado. 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. O magnetômetro de fluxo saturado, com núcleo em anel, é um equipamento versátil por apresentar uma larga faixa de detecção variando de 0,1nT a 1mT e uma boa relação de custo benefício na sua implementação. Por estas características torna este equipamento muito utilizado em diversas áreas assim como em observações geomagnéticas.

Seminário De Iniciação Científica Do Inpe- Sicinpe, São José dos Campos, 2006.

MAGNETOMETRO TIPO FLUX-GATE DE BAIXO RUÍDO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS

Josemar de Siqueira⁴ (LACESM/CT/UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Dr. Nalin Babulal Trivedi² (DGE/CEA/INPE - MCT, Orientador)

Dr. Nelson Jorge Schuch³ (CRSPE/INPE - MCT, Co-orientador)

RESUMO

Para obter medidas das variações do campo geomagnético, podemos utilizar diversas técnicas e aparelhos, cada um com suas peculiaridades. O magnetômetro *fluxgate* ou de Núcleo Saturado é muito utilizado para a obtenção destas medidas tanto em estações terrenas quanto em balões ou satélites na órbita terrestre. A sua habilidade na medição das componentes vetoriais de campo magnético na faixa de 0.1nT a 1mT na faixa de frequência de um sinal dc a alguns kHz, faz deste sensor um instrumento bastante versátil. Os “fluxgate” de núcleo em anel apresentam bons resultados, pois o funcionamento desse modelo de magnetometro baseia-se nas propriedades de certos materiais ferromagnéticos. Um núcleo toroidal com alta permeabilidade é exposto a um campo de excitação H gerado por uma bobina envolta a esse núcleo, que faz variar o fluxo magnético do material segundo a curva de histerese BxH. Quando o fluxo magnético chega ao seu ponto de saturação, a permeabilidade do núcleo decai para valores muito baixos próximos ao do vácuo, como se o toróide houvesse desaparecido. Quando o núcleo não está saturado, o campo magnético externo, o qual se quer medir, se concentra no toróide devido a sua alta permeabilidade. Após receber o campo de excitação, o fluxo magnético no núcleo varia devido à saturação e conseqüente diminuição da permeabilidade do meio. Essa variação do fluxo magnético é detectada por uma segunda bobina ao redor do núcleo. Analisando-se o segundo harmônico do sinal obtido no secundário, bobina de detecção, e o sinal de excitação com a frequência dobrada, nota-se que existe uma proporcionalidade com o campo externo que esta sendo mensurado. 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.

¹ Aluno de Graduação em Física Licenciatura Plena, UFSM. E-mail: josemar@lacesm.ufsm.br

² Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial (DGE/CEA/INPE – MCT), Orientador.

E-mail: trivedi@dge.inpe.br

³ Pesquisador, Coordenador da Ação 1275 de Implantação do CRSPE e Chefe do RSU/CIE/INPE – MCT. E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Seminário De Iniciação Científica Do Inpe- Sicinpe, São José dos Campos, 2006.

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

Josemar de Siqueira⁵ (CRS/CIE/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)
Dr. Nalin Babulal Trivedi² (Orientador - OMV/ON – MCT)
Dr. Nelson Jorge Schuch³ (Co-orientador - CRS/CIE/NPE - MCT)

RESUMO

Um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento com a construção de um magnetômetro tipo fluxgate de baixo ruído, com núcleo toroidal, para medidas Geomagnéticas. O magnetômetro é constituído por três sensores com o núcleo toroidal, ortogonais entre si, formando um eixo coordenado que é ajustado as componentes H, D e Z do Campo Geomagnético. Cada sensor é composto por duas bobinas em cada eixo, uma de excitação e outra de detecção do Campo Magnético. O funcionamento deste sensor é baseado em propriedades ferro magnético de certos materiais e na alta permeabilidade do núcleo. O circuito eletrônico utilizado no protótipo de magnetômetro tem basicamente três etapas. A primeira etapa consiste na geração de um sinal periódico de frequência f capaz de saturar o núcleo ferromagnético fazendo com que varie o fluxo magnético do material, segundo a curva de histerese $B \times H$. A segunda etapa do circuito é feita comparando o sinal de excitação com o sinal detectado, utilizando uma referência $2f$ retirada do circuito de excitação. Após a comparação dos sinais é feita a integração dos mesmos para se obter uma tensão contínua que tenha uma linearidade com a variação do sinal obtido na bobina de detecção. Na terceira etapa do circuito a diferença entre o par de saída do sinal obtido do circuito integrado 4053 é integrada pelo circuito, obtendo a relação de linearidade entre o sinal detectado e a variação do campo magnético medido, possibilitando a determinação da intensidade do Campo Geomagnético. Este tipo de magnetômetro de fluxo saturado, é um equipamento versátil por apresentar uma larga faixa de detecção variando de 0,1nT a 1mT e uma boa relação de custo beneficio na sua implementação. Por estas características torna o equipamento magnetômetro, tipo fluxgate, muito utilizado em diversas áreas assim como em observações Geomagnéticas.

¹ Aluno do Curso de Física Licenciatura Plena da UFSM, vinculado ao LACESM/CT - UFSM.

E-mail: josemar@lacesm.ufsm.br

² Pesquisador do Observatório Magnético de Vassouras do Observatório Nacional – ON/MCT.

E-mail: ntrivedi@on.br

³ Pesquisador Titular AIII do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT.

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br



ANEXO D
Certificados de trabalhos de participação do Bolsista substituído Projeto em
Congressos e Eventos

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - PIBIC/INPE/CNPq

Conferimos o presente Certificado a **JOSEMAR DE SIQUEIRA** por sua participação com o trabalho intitulado: "MAGNETOMETRO TIPO FLUX-GATE DE BAIXO RUIDO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS", sob a orientação do(a) Prof(a). **Nalim Babulal Trivedi**, no Seminário de Iniciação Científica do INPE- SICINPE, realizado em São José dos Campos-SP, nos dias 11 e 12 de julho de 2006.

São José dos Campos, 12 de julho de 2006.

JOSÉ CARLOS BECCENERI
Coordenador Institucional do PIBIC





Primer Encuentro de la Red de Investigadores Argentinos en Ciencias de la Heliosfera



Se deja constancia que

Josemar Siqueira

ha asistido a la escuela y reunión de trabajo que se realizó en el marco del Primer Encuentro de la Red de Investigadores Argentinos en Ciencias de la Heliosfera. El evento tuvo lugar en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA), en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, entre los días 25 y 29 de septiembre de 2006.

“Geomagnetic pulsations of long periods in the region of the south atlantic magnetic anomaly”

Buenos Aires, 29 de septiembre de 2006

Dr. Rafael Ferraro
Director IAFE

Dra. Cristina H. Mandirini
Comité Organizador Científico

Dr. Daniel O. Gómez
Comité Organizador Científico

SBGE 2006 CERTIFICADO

Certificamos que **JOSEMAR DE SIQUEIRA** participou do Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, realizado em São José dos Campos de 23 a 26 de outubro de 2006, na qualidade de apresentador.

[Handwritten signature]
Hisao Takahashi
Presidente do Comitê Organizador

[Handwritten signature]
Inez Steciarihi Batista
Vice-Presidente do Comitê Organizador Local

PROMOÇÃO **PATROCÍNIO** **APOIO**