



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

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

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

**PROCESSO Nº. 104038/2006-3**

**Josemar de Siqueira - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT**  
**Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas**  
**LFSMIM/CRS/CIE/INPE – MCT**  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais**  
**CRS/CIE/INPE – MCT**  
**E-mail: josemar@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra - Orientador**  
**Divisão de Geofísica Espacial**  
**DGE/CEA/INPE – MCT**  
**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
**INPE - MCT**  
**E-mail: dutra@dge.inpe.br**

Santa Maria, Julho de 2008



**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO  
PROGRAMA: PIBIC/INPE - CNPq/MCT**

**PROJETO**

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

**PROCESSO: 104038/2006-3**

Relatório elaborado por **Josemar de Siqueira** relatando as atividades  
executadas por:

**Josemar de Siqueira** - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
E-mail: josemar@lancesm.ufsm.br

**Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra** - Orientador  
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT  
E-mail: dutra@dge.inpe.br

**Dr. Nelson Jorge Schuch** - Co-Orientador  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT  
E-mail: njschuch@lancesm.ufsm.br

**Dr. Nalin Babulal Trivedi** – Co-Orientador  
Observatório Magnético de Vassouras – OMV/ON – MCT  
E-mail: ntrivedi@on.br



## **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 104038/2006-3

### **Orientador:**

**Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra**

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

### **Co-Orientador:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

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

**Dr. Nalin B.Trivedi**

Observatório Magnético de Vassouras – OMV/ON – MCT

### **Colaboradores:**

**Cassio E. Antunes**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

**Fermado de Souza Savian**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

**Willian Rigon Silva**

Acadêmico do Curso de Física – UFSM

### **Local de Trabalho/Execução do projeto:**

Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFSMIM/CRS/CIE/INPE – MCT.

Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT - UFSM, através do Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFSMIM/CRS/CIE/INPE – MCT com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



**Grupo de Pesquisa**  
**Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol,  
NanoSatC-Br**



| <a href="#">Identificação</a> | <a href="#">Recursos Humanos</a> | <a href="#">Linhas de Pesquisa</a> | <a href="#">Indicadores do Grupo</a> |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|

### Identificação

#### Dados básicos

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

**Status do grupo:** **certificado pela instituição**

**Ano de formação:** 1996

**Data da última atualização:** 18/06/2008 15:04

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

Ademar Michels - [michels@ct.ufsm.br](mailto:michels@ct.ufsm.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@lasesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lasesm.ufsm.br)

**Home page:** <http://>

#### Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo de Pesquisa - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS: INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, Lat. 29°26' 24"S, Long. 53°48' 38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE (CEA, ETE, CPA), CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, os mecanismos de geração de energia no Sol, o Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra. Pesquisas teóricas e observacionais utilizando-se de larga base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, bem como de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Marcelo Barcellos da Rosa, Ademar Michels.





Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT  
*Relatório Final de Atividades 2008*

**Recursos humanos**

**Pesquisadores** **Total: 32**

|                                                 |                                                  |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <a href="#">Ademar Michels</a>                  | <a href="#">Jean Carlo Santos</a>                |
| <a href="#">Alan Prestes</a>                    | <a href="#">Jean Pierre Raulin</a>               |
| <a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a>   | <a href="#">Joao Paulo Minussi</a>               |
| <a href="#">Alisson Dal Lago</a>                | <a href="#">Jose Humberto Andrade Sobral</a>     |
| <a href="#">Antonio Claret Palerosi</a>         | <a href="#">Mangalathayil Ali Abdu</a>           |
| <a href="#">Barclay Robert Clemesha</a>         | <a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>        |
| <a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a>         | <a href="#">Nalin Babulal Trivedi</a>            |
| <a href="#">Cristiano Max Wrasse</a>            | <a href="#">Natanael Rodrigues Gomes</a>         |
| <a href="#">Delano Gobbi</a>                    | <a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>              |
| <a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a>       | <a href="#">Odin Mendes Junior</a>               |
| <a href="#">Ezequiel Echer</a>                  | <a href="#">Osmar Pinto Junior</a>               |
| <a href="#">Fabiano Luis de Sousa</a>           | <a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>    |
| <a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a> | <a href="#">Petrônio Noronha de Souza</a>        |
| <a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a>         | <a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>           |
| <a href="#">Hisao Takahashi</a>                 | <a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>    |
| <a href="#">Ijar Milagre da Fonseca</a>         | <a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a> |

**Estudantes** **Total: 28**

|                                                 |                                               |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <a href="#">Alan Carlos Klein</a>               | <a href="#">Juliano Moro</a>                  |
| <a href="#">Antonio Marcos Martins Silveira</a> | <a href="#">Lilian Piecha Moor</a>            |
| <a href="#">Bernardo Henz</a>                   | <a href="#">Lorenzo Marzari Félix</a>         |
| <a href="#">Carlos Roberto Braga</a>            | <a href="#">Lucas Lopes Costa</a>             |
| <a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>        | <a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a> |
| <a href="#">César Augusto Daroit</a>            | <a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a>           |
| <a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>         | <a href="#">Nikolas Kemmerich</a>             |
| <a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>    | <a href="#">Rafael Lopes Costa</a>            |
| <a href="#">Fabrício Deives Kummer</a>          | <a href="#">Samuel Martins da Silva</a>       |
| <a href="#">Fernando de Souza Savian</a>        | <a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>        |
| <a href="#">Igor Freitas Fagundes</a>           | <a href="#">Tardelli Ronan Coelho Stekel</a>  |
| <a href="#">Jean Carlos Daroit</a>              | <a href="#">Tiago Domingos dos Santos</a>     |
| <a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>           | <a href="#">Tiago Jaskulski</a>               |
| <a href="#">Josemar de Siqueira</a>             | <a href="#">Willian Rigon Silva</a>           |

**Técnicos** **Total: 5**

Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica  
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação  
Koiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas  
Roben Castagna Lunardi - Graduação - Técnico em Computação  
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função

**Linhas de pesquisa** **Total: 4**

- [AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)
- [MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO](#)
- [MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)
- [NANOSATC-BR](#)

**Relações com o setor produtivo** **Total: 0**





| Indicadores de recursos humanos do grupo |       |
|------------------------------------------|-------|
| Integrantes do grupo                     | Total |
| Pesquisador(es)                          | 32    |
| Estudante(s)                             | 28    |
| Técnico(s)                               | 5     |



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



#### Linha de Pesquisa

### MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

#### Linha de pesquisa

#### MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

**Nome do grupo:** [Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

**Palavras-chave:** Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS; Desenvolvimento de Instrumentação Espacial; Eletricidade Atmosférica - Descargas Elétricas; Física Magnetosferas, Física Solar e Heliosférica; Geomagnetismo; Magnetômetros;

#### 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](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lorenzo Marzari Félix](#)  
[Willian Rigon Silva](#)

#### Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica; Geofísica Aplicada;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

#### Setores de aplicação:

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

#### Objetivo:

Pesquisas: acoplamento da Heliosfera, Meio Interplanetário e Magnetosferas Planetárias, com dados de sondas espaciais e nas magnetosferas; modelos físicos/estatísticos; variação secular do Campo Total-F, 22883 nT no OES, na razão -28 nT/ano; deslocamento para oeste da AMAS observado desde 1985, via Cooperação: UFSM-ON-INPE com o SERC/KU-Japão; pulsações contínuas e/ou impulsivas observadas na componente H amplificadas pela precipitação na região da AMAS. Vice-Líder: Nalin Babulau Trivedi.





## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



### **Linha de Pesquisa** **MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL**

#### **Linha de pesquisa**

#### **MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL**

**Nome do grupo:** [Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

**Palavras-chave:** Campo Magnético Interplanetário; Muons; Raios Cósmicos; Tempestade Geomagnética;

**Pesquisadores:**

[Alan Prestes](#)  
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)  
[Alisson Dal Lago](#)  
[Ezequiel Echer](#)  
[Fernando Luís Guarnieri](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

**Estudantes:**

[Carlos Roberto Braga](#)  
[Fabrício Deives Kummer](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Samuel Martins da Silva](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

**Árvore do conhecimento:**

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;  
Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

Pesquisar e prover em tempo real com o Telescópio Multidirecional de Raios Cósmicos-Muons, 2x(4mx7m), >50GeV, no Observatório Espacial do Sul, o monitoramento de muons e fenômenos das interações Sol-Terra, a previsão no Geoespaço de eventos solares e distúrbios geofísicos, graves efeitos das tempestades e subtempestades geomagnéticas sobre dispositivos e sistemas tecnológicos afetando equipes de trabalho e equipamentos na superfície da Terra e no Espaço. Vice-Líder: Alisson Dal Lago.



## 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 Clúa de Gonzalez](#)  
[Alisson Dal Lago](#)  
[Antonio Claret Palerosi](#)  
[Clezio Marcos De Nardin](#)  
[Ezequiel Echer](#)  
[Fabiano Luis de Sousa](#)  
[Fernando Luís Guarnieri](#)  
[Ijar Milagre da Fonseca](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Jose Humberto Andrade Sobral](#)  
[Nalin Babulal Trivedi](#)  
[Natanael Rodrigues Gomes](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Odim Mendes Junior](#)  
[Otavio Santos Cupertino Durão](#)  
[Petrônio Noronha de Souza](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

#### Estudantes:

[Alan Carlos Klein](#)  
[Bernardo Henz](#)  
[Carlos Roberto Braga](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Igor Freitas Fagundes](#)  
[Jean Carlos Daroit](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lorenzo Marzari Félix](#)  
[Lucas Lopes Costa](#)  
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Rafael Lopes Costa](#)  
[Samuel Martins da Silva](#)  
[Silvano Lucas Prochnow](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)  
[Tiago Jaskulski](#)  
[Willian Rigon Silva](#)

#### 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; Desenvolvimentos: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração, sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, controle: atitude, térmico, Vice-Líder: Ademair 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. Severino Luiz Guimarães Dutra e ao 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 também para meu próprio crescimento pessoal: Willian Rigon Silva, Fernando de Souza Savian e em especial ao meu grande amigo e colega de Pesquisa Cassio Espindola Antunes que não mediu tempo e esforços para me auxiliar. Gostaria de agradecer também ao amigo 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

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| AGRADECIMENTOS .....                                              | 6  |
| RESUMO .....                                                      | 1  |
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....                                      | 2  |
| CAPÍTULO 2. CAMPO GEOMAGNÉTICO .....                              | 4  |
| 2.1. ASPECTOS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO .....                         | 4  |
| 2.2. MAGNETOSFERA TERRESTRE.....                                  | 12 |
| 2.3. VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS .....                                | 15 |
| 2.3.1. Micropulsações Geomagnéticas .....                         | 15 |
| 2.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS) .....             | 17 |
| CAPÍTULO 3. TIPOS DE MAGNETÔMETROS .....                          | 19 |
| 3.1. MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO (FLUXGATE MAGNETOMETER) ..... | 20 |
| 3.1.1. Geometria dos Sensores Fluxgate.....                       | 23 |
| 3.2. MÉTODOS DE DETECÇÃO E ANÁLISE DO SINAL.....                  | 26 |
| 3.2.1. Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado .....       | 26 |
| 3.2.2. O Sensor e a Bobina de Realimentação .....                 | 27 |
| 3.2.3. Fluxgate Curto Circuitado.....                             | 27 |
| 3.2.4. Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado.....         | 28 |
| 3.2.5. Magnetômetro de Harmônicos Pares .....                     | 29 |
| CAPÍTULO 4. IMPLEMENTAÇÃO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE .....          | 31 |
| 4.1 – DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES.....               | 31 |
| 4.2 – CIRCUITO ELETRÔNICO.....                                    | 34 |
| 4.2.1 – Circuito e Sinal de Excitação.....                        | 35 |
| 4.2.2 – Comparação dos Sinais .....                               | 36 |
| 4.2.3 – Circuito Integrador .....                                 | 37 |
| 4.3 – CIRCUITO E PLACA .....                                      | 38 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS PRELIMINARES .....                         | 39 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E PERFECTIVAS DO PROJETO .....              | 42 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....                                   | 43 |
| ANEXOS .....                                                      | 45 |
| ANEXO A .....                                                     | 46 |
| ANEXO B .....                                                     | 48 |
| ANEXO C .....                                                     | 50 |
| ANEXO D .....                                                     | 57 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.....                              | 4  |
| Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol. ....                             | 5  |
| Figura 2.3 – Elementos do vetor campo geomagnético. ....                                                     | 5  |
| Figura 2.4 - <i>Representação das coordenadas esféricas.</i> ....                                            | 8  |
| Figura 2.5 - Estrutura interna da Terra. ....                                                                | 10 |
| Figura 2.6 – Diagrama esquemático das correntes no núcleo da Terra que produzem o Campo Geomagnético. ....   | 10 |
| Figura 2.9 – Composição da Magnetosfera. ....                                                                | 13 |
| Figura 2.10 - Cinturão de Radiação de Van Allen. ....                                                        | 14 |
| Figura 2.11 - Movimentos de carga elétrica na presença do Campo Magnético. ....                              | 14 |
| Figura 2.12 - Mapa magnético da Terra. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul em azul. ....                   | 18 |
| Figura 3.1 – Classificação dos magnetômetros. ....                                                           | 19 |
| Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.....                                                       | 21 |
| Figura 3.3 – Saturação do núcleo .....                                                                       | 22 |
| 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. ....                                                         | 31 |
| Figura 4.2 – Núcleo ferromagnético toroidal .....                                                            | 32 |
| Figura 4.3 – Esquema do sensor magnético com o enrolamento de excitação e de detecção . ....                 | 32 |
| Figura 4.4 – Vista frontal do secundário. ....                                                               | 33 |
| Figura 4.5a – Magnetômetro Fluxgate. ....                                                                    | 33 |
| Figura 4.5b – Magnetômetro Fluxgate. ....                                                                    | 33 |
| Figura 4.6 – Circuito de excitação.....                                                                      | 35 |
| Figura 4.7 – Circuito integrado multiplexador.....                                                           | 37 |
| Figura 4.8 – Circuito Integrador.....                                                                        | 37 |
| Figura 4.10 – Schematic do circuito de excitação e detecção. ....                                            | 38 |
| Figura 4.11 – Placa originalmente feita para este layout.....                                                | 38 |
| Figura 5.1 – Sinal de excitação, o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação. .... | 39 |
| Figura 5.2 – Sinal de excitação ligado na bobina de excitação com distorção. ....                            | 40 |
| Figura 5.3 - Formas de ondas obtidas em cada par das três saídas do CI 4053. ....                            | 40 |
| Figura 5.4 – Três medidas referente à saída do CI 4053 para cada sensor.....                                 | 41 |

## Índice de Tabelas

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classificação Morfológica..... | 16 |
| Tabela 2 - Classificação Genética. ....   | 17 |

## Resumo

O Campo Magnético Terrestre sofre grandes variações devido à interação do Plasma Solar com o Campo Geomagnético. Estas variações no Campo Geomagnético são conhecidas como as tempestades geomagnéticas que afetam o funcionamento dos modernos sistemas tecnológicos tais como: GPS, comunicação via satélite, os próprios satélites – incluindo os astronautas – e vários sistemas de geração de energia elétrica na superfície terrestre. Neste contexto, é importante o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo e capaz de realizar medições precisas para o estudo das variações que ocorrem no Campo Geomagnético. O principal objetivo do Projeto de Pesquisa é o desenvolvimento e a construção de um magnetômetro do tipo fluxgate de baixo ruído, com núcleo toroidal, para estudos do Campo Geomagnético. Os magnetômetros de núcleo saturado ou “Fluxgate Magnetometer”, são dispositivos que medem a magnitude e direção de campos magnéticos, estáticos ou alternados.

O funcionamento do sensor é baseado nas propriedades ferro magnéticas do material e na alta permeabilidade do seu núcleo. O magnetômetro implementado neste trabalho 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 para cada eixo, uma de excitação e outra de detecção do campo magnético. O circuito eletrônico utilizado no protótipo do magnetômetro consiste basicamente em três partes. A primeira consiste na saturação do núcleo ferromagnético, a segunda compara o sinal de excitação com sinal detectado e na terceira obtém-se a relação de linearidade entre o sinal detectado e a variação do Campo Geomagnético. Os primeiros resultados obtidos com os testes em laboratório e em campo, ficaram dentro da expectativa inicial e são comparáveis com dados de outros magnetômetros fluxgate publicados na literatura. Contudo, devemos ampliar os esforços para encontra os problemas técnicos que o circuito implementado apresentou devido à linearidade do sinal de saída não está condizente com a variação do sensor.

## Capítulo 1. Introdução

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.

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.

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.

Os magnetômetros *fluxgate* também são conhecidos por magnetômetros de baixo ruído por não apresentarem níveis muito altos de interferências ou sinais indesejados nas medidas. 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.

Portanto, os principais objetivos do Projeto é estudar técnicas de medição das variações do Campo Magnético Terrestre para realizar estudos na área da Geofísica Espacial. E assim, efetuar estudos experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas abordo de satélites científicos, utilizando sistemas “*fluxgate*” de três componentes com o sensor em anel, como também a participação do bolsista na operação e análise de dados do magnetômetro fluxgate e a realização de pesquisas utilizando os dados geomagnéticos coletados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, SMS, (29º,

43 S, 53° 82 W), RS, Brasil, no âmbito da Parceria: INPE – UFSM. Desta maneira os resultados esperados são de obter:

- 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.

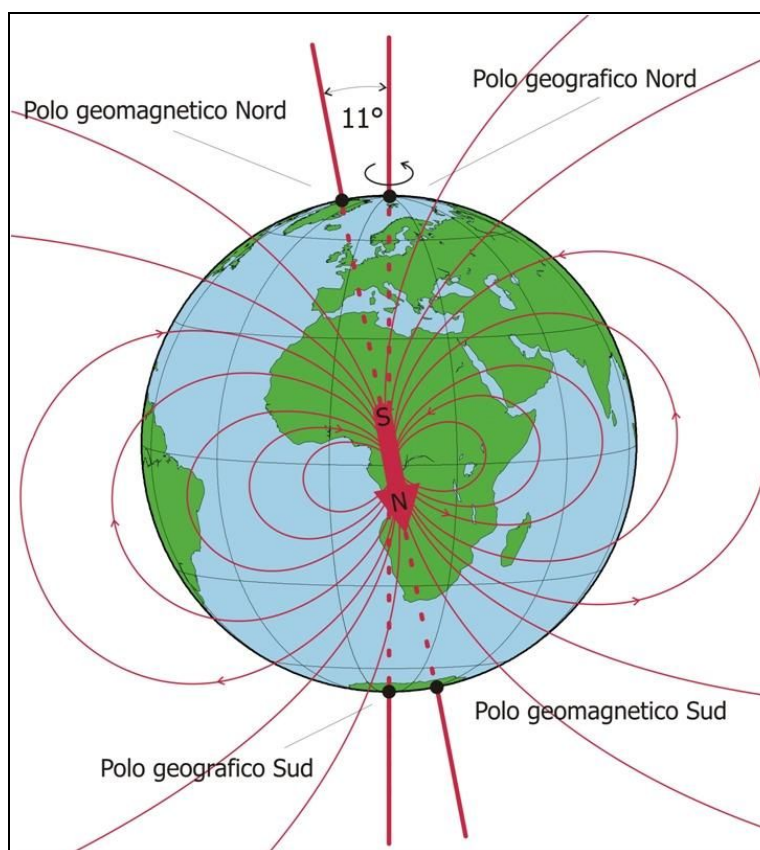
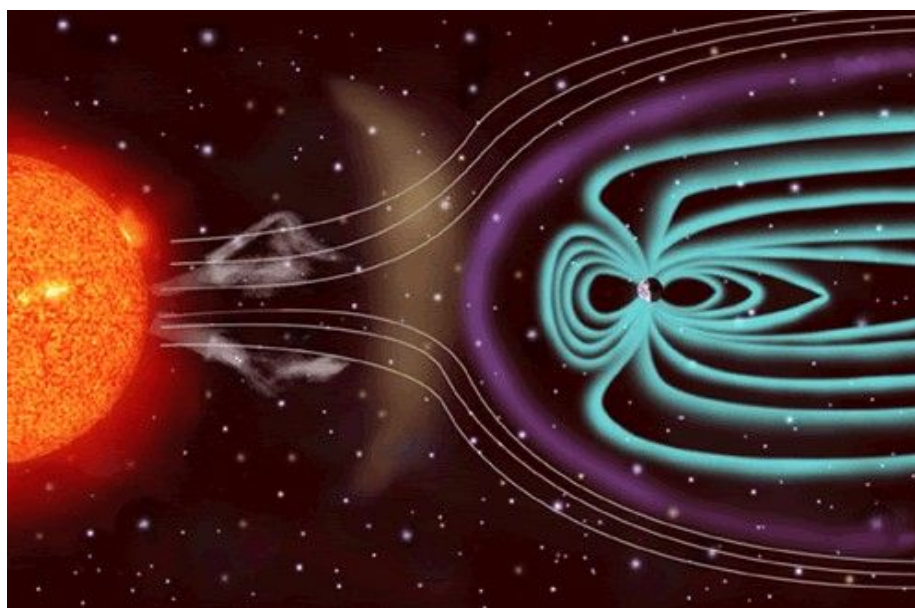


Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.

Fonte: [www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra/](http://www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra/)

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.

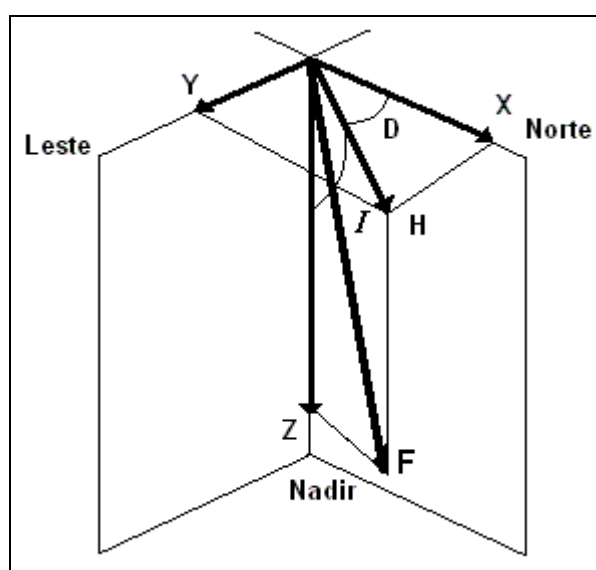


**Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol.**

Fonte: [http://www.clas.ufl.edu/jur/200201/images/lamb\\_6.jpg](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 é um vetor, portanto caracterizado pelo módulo, direção e sentido. No eletromagnetismo, usa-se  $\mathbf{B}$  para o campo de indução magnética ou fluxo de densidade. Desta maneira, o Campo Magnético da Terra é descrito pelas equações de Maxwell, como um campo eletromagnético. Por resolução da IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), de 1973, deve-se usar o vetor  $\mathbf{B}$  para representar o Campo Geomagnético.

Lei de Ampère

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

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  $\mu$  é a permeabilidade magnética no vácuo,  $\partial \vec{D} / \partial t$  é a corrente de deslocamento,  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico e  $\rho$  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.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_j + \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_i \quad (\text{Eq. 2.15})$$

onde  $\mathbf{B}_i$  é o campo de origem estritamente interna da Terra;  $\mathbf{B}_e$  é o campo de origem externa, cuja produção ocorre fora da região da ionosfera e  $\mathbf{B}_j$  é o campo cuja produção ocorre dentro da ionosfera, então  $\mathbf{B}_i + \mathbf{B}_e$  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  $(r, \theta, \lambda)$ , onde  $\lambda$  é a longitude e  $\theta$  é a colatitude (latitude:  $\varphi = \pi/2 - \theta$ ).

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

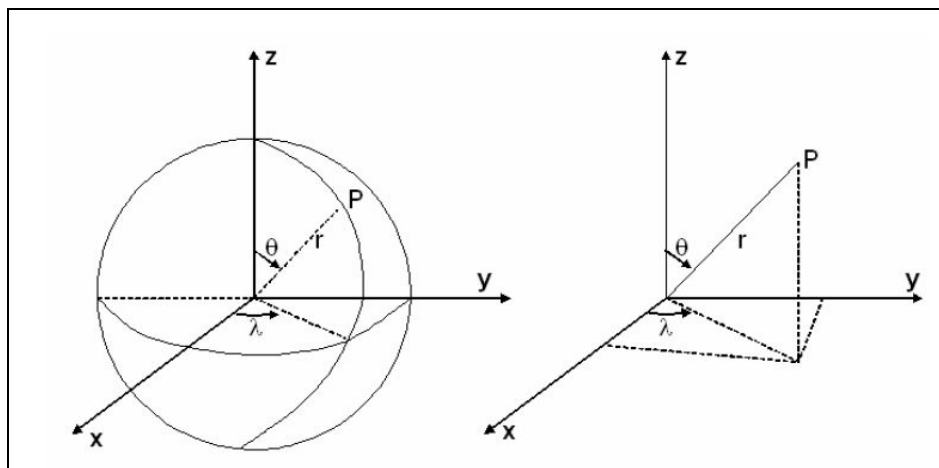


Figura 2.4 - Representação das coordenadas esféricas.

Fonte: Hartmann, 2005.

Conhecendo-se a variação desta função potencial com as coordenadas  $(r, \theta, \lambda)$ , 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

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

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

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

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

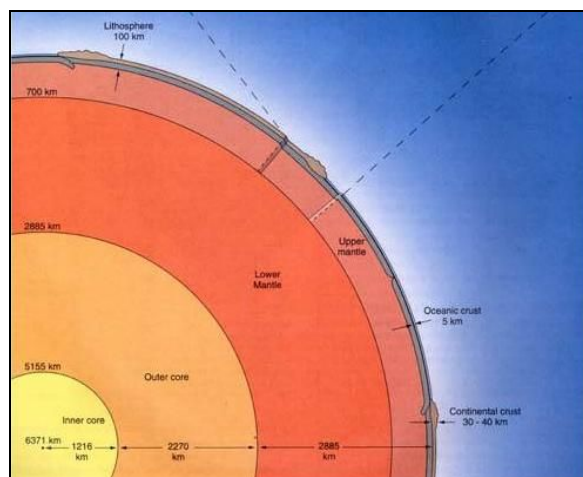
$$Y = \frac{1}{\sin \theta} \sum \sum P_n^m [mA_n^m \sin m\lambda - mB_n^m \cos m\lambda] \quad (\text{Eq. 2.22})$$

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

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.

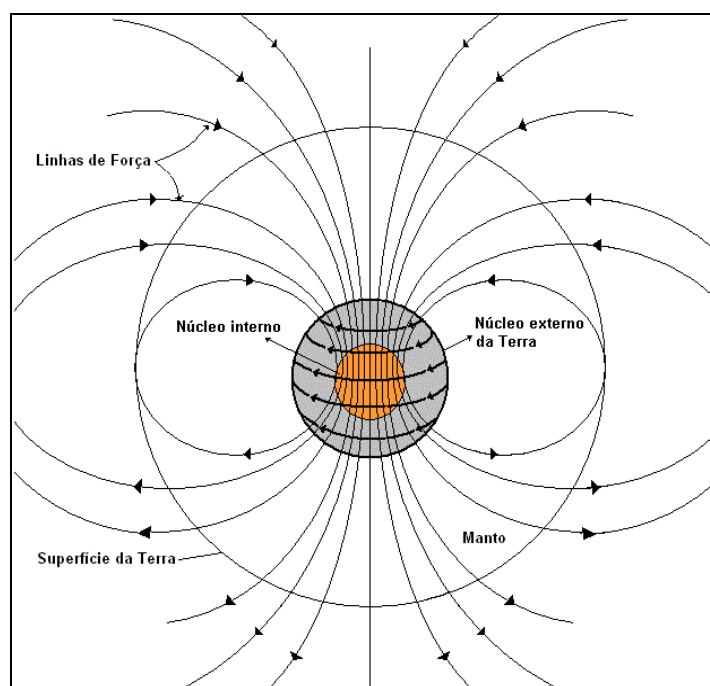
O Campo Geomagnético, em qualquer posição da superfície da Terra é a soma de três componentes com origens distintas: o campo interno, cuja produção ocorre no núcleo externo da Terra; o campo crustal, cujas fontes são os materiais magnetizados e induzidos encontrados na crosta e o campo externo, produzido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

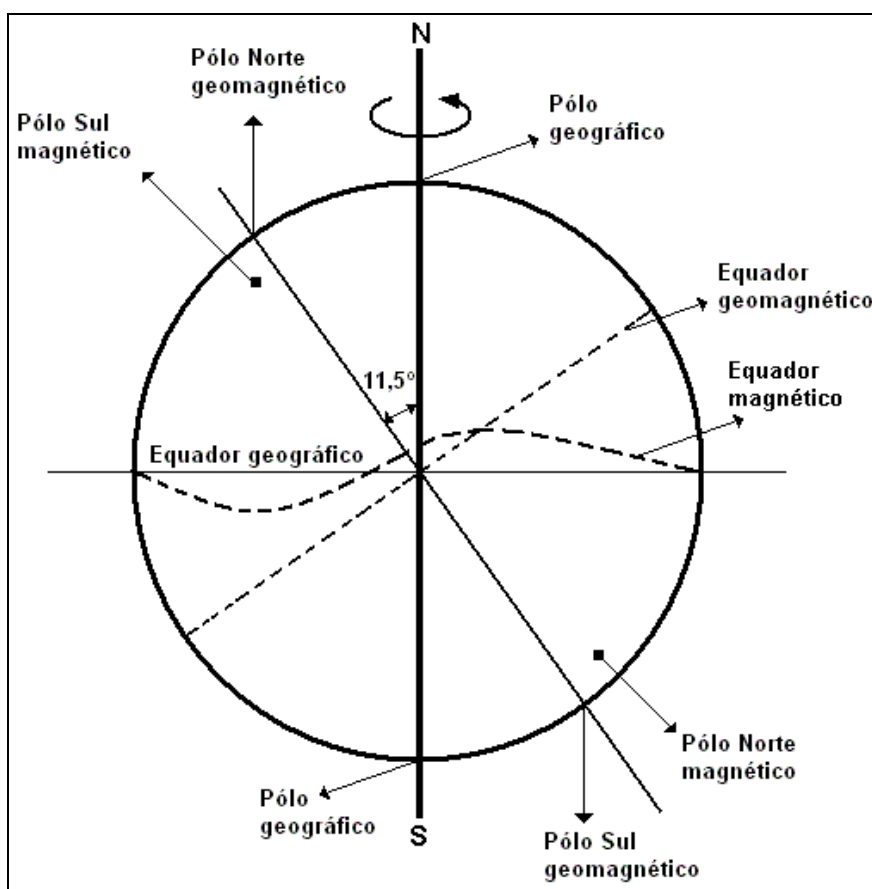
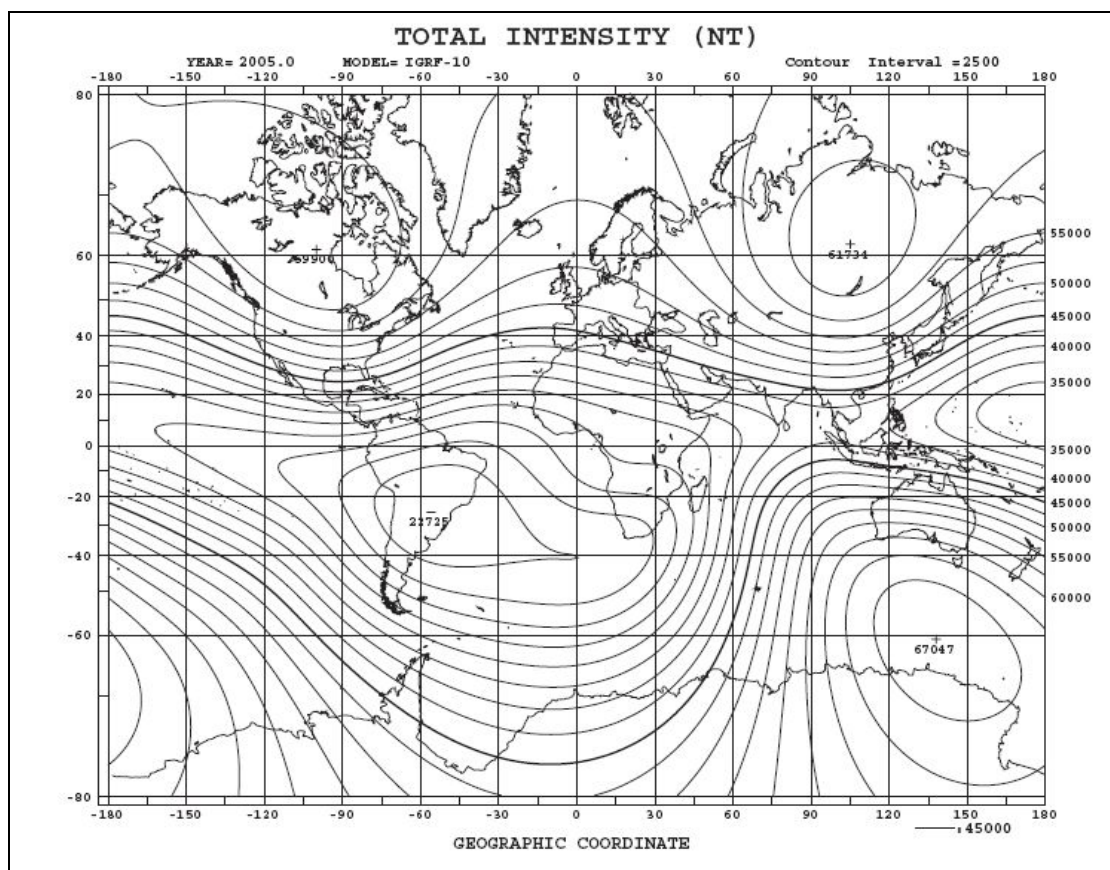


Figura 2.7 – Localização dos polos geográficos, geomagnéticos e magnéticos; do equador geográfico, geomagnético e equador magnético.

Fonte: Figura modificada de Hartmann 2005.

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 (Figura 2.8) 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://swdcdb.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.

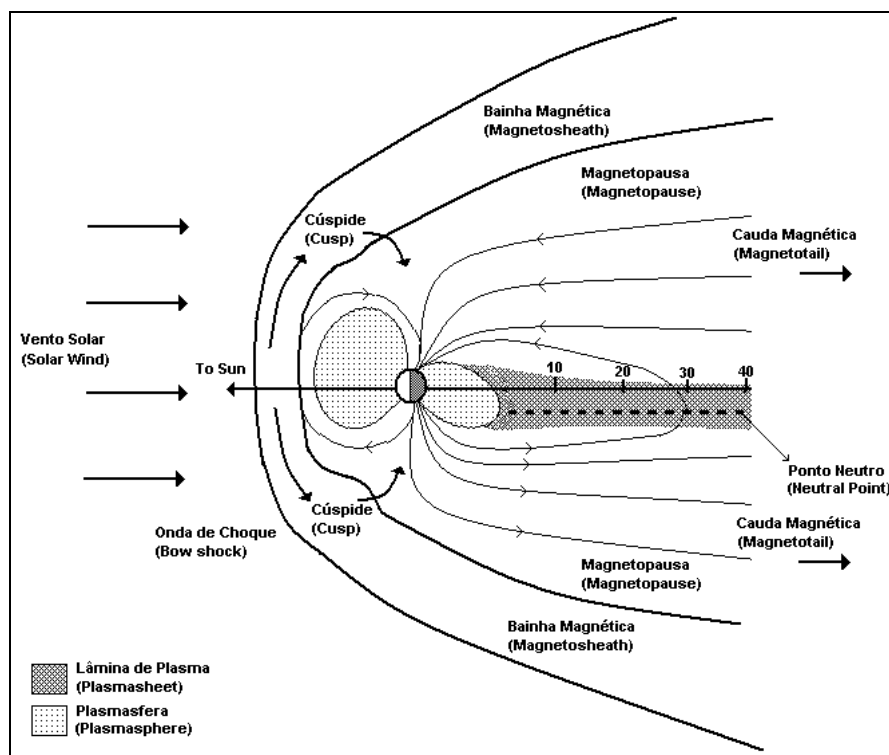


Figura 2.9 – Composição da Magnetosfera.

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.

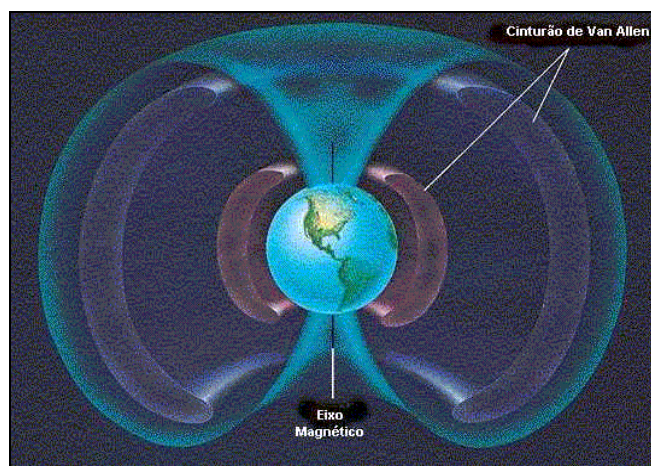


Figura 2.10 - Cinturão de Radiação de Van Allen.

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

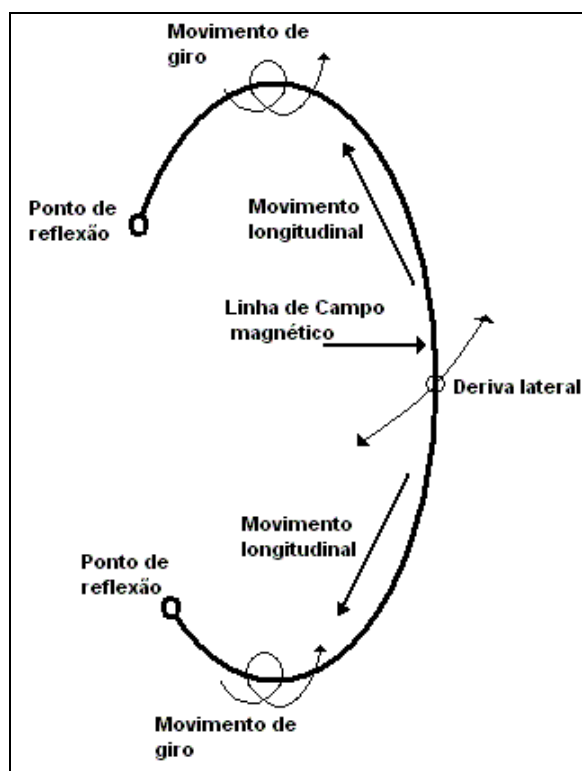


Figura 2.11 - Movimentos de carga elétrica na presença do Campo Magnético.

## **2.3. Variações Geomagnéticas**

A faixa de variação temporal do Campo Magnético Terrestre estende-se desde frações de segundos até mais de milhões de anos. As causas das variações de longo período, como a variação secular, são internas, enquanto que as variações com períodos menores que poucos dias são de origens externas à Terra [ Jacobs, 1970; Samson, 1991]. As variações de curto período, como as tempestades e subtempestades geomagnéticas, a variação diurna Sq e as variações de período mais curto do que 17 minutos aproximadamente, chamadas de micropulsações geomagnéticas, estão diretamente ou indiretamente associadas à atividade solar.

### **2.3.1. Micropulsações Geomagnéticas**

As micropulsações são flutuações de curto período (usualmente da ordem de segundos a minutos) do Campo Magnético Terrestre. As amplitudes típicas destas flutuações são menores que uma parte em  $10^4$  do campo principal e têm efeito transitório. A faixa de período na qual se considera as micropulsações está entre 0,2 segundos e 17 minutos, com amplitudes desde frações centenas de nanotesla .

Em geral é aceito que as micropulsações geomagnéticas são provocadas pela manifestação de ondas hidromagnéticas geradas por vários processos físicos. A interação de o vento solar com o Campo Magnético da Terra é o principal processo de geração das micropulsações detectadas em toda a magnetosfera, ionosfera e na superfície da terrestre [Zanandrea, 1998].

As micropulsações do Campo 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.

Geralmente as micropulsações são observadas em bases terrestres (estações geomagnéticas) e com instrumentos abordo de satélites. Independente do ponto de observação há varios fatores vinvulados, direta e indiretamente, à interação Sol-Terra, que podem afetar a atividade das micropulsações, tais como: a interação do vento solar que flui com velocidades instáveis supersônicas (250 – 800 Km/s) em relação à magnetosfera, causando pulsos de compressão e rarefação nas linhas de campo da magnetosfera; a duração do ciclo solar e efeitos periódicos como as manchas solares; a localização, em latitude e longitude geomagnética do observatório; a hora e o dia; o estado local da ionosfera; o nível de atividade magnética [Zanandrea, 1998].

### 2.3.1.1. Classificação das Micropulsações

Em 1958, a Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia ( IAGA – International Association of Geomagnetism and Aeronomy), propôs uma classificação baseada nas características morfológicas das micropulsações. Esta classificação divide em duas classes distintas, que são as pulsções regulares ou contínuas e pulsções irregulares designadas por Pc e Pi, respectivamente.

As Pc são pulsções cujas amplitudes são estáveis ou flutuam regularmente, enquanto que as Pi não mantém qualquer regularidade. Dentro de cada grupo ou família, as micropulsações classificadas de acordo com o período ou frequência (Tabela 2.1).

**Tabela 1 - Classificação Morfológica.**

| Notação | Faixa de Período (s) | Frequência   |
|---------|----------------------|--------------|
| Pc 1    | 0,2 – 5              | 0,2 – 5 Hz   |
| Pc 2    | 5 – 10               | 0,1 – 0,2 Hz |
| Pc 3    | 10 – 45              | 22 – 100 mHz |
| Pc 4    | 45 – 150             | 7 – 22 mHz   |
| Pc 5    | 150 – 600            | 2 – 7 mHz    |
| Pi 1    | 1 – 40               | 0,025 – 1 Hz |
| Pi 2    | 40 – 150             | 2 – 25 mHz   |

Fonte: Jacobs (1970, p. 17).

A classificação morfológica vem sendo continuamente modificada e gradualmente está sendo constituída, com base nos processos físicos de geração, a chamada classificação genética [Zanandrea, 1998]. Sanson (1991) dividiu as pulsações em três bandas de frequência distintas:

- Baixa frequência (1 – 10 mHz);
- Média frequência (10 – 100m Hz);
- Alta frequência (0,1 – 10 Hz).

E também em dois tipos de pacotes de ondas:

- Contínuas;
- Impulsivas.

Podemos ver na tabela 2.2 o esquema de classificação gnética das micropulsações.

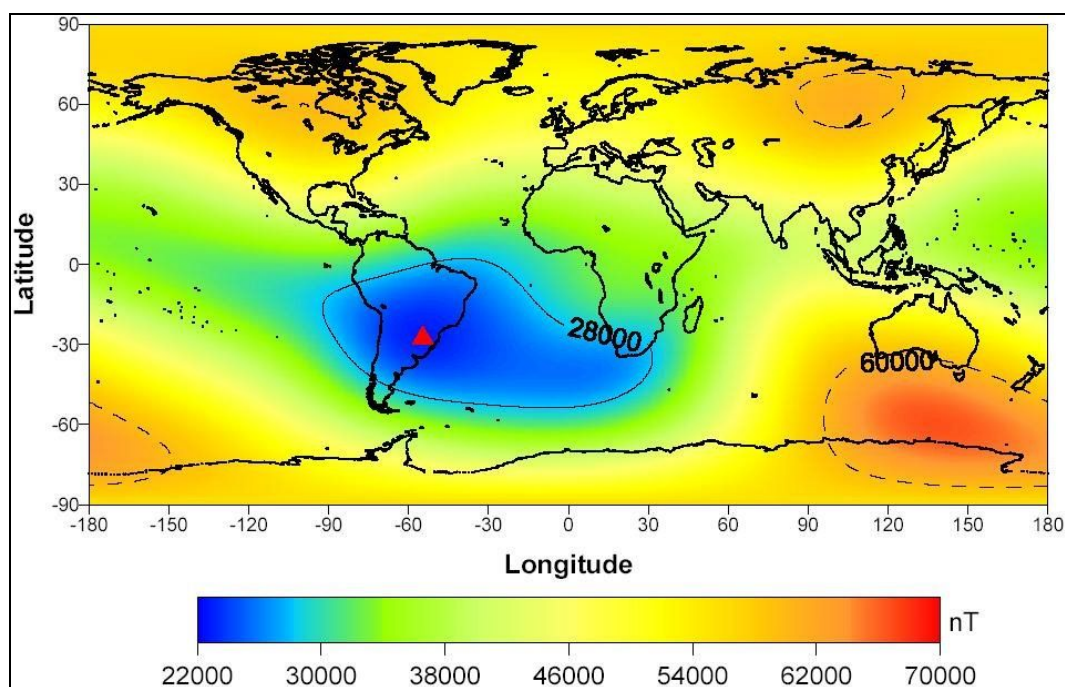
**Tabela 2 - Classificação Genética.**

| Banda        | Contínuas                                                                                                                                           | Impulsivas                                                                                                                                                                       |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 – 10 mHz   | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Instab. De deriva de espelho;</li><li>▪ Ressonância “bounce”;</li><li>▪ Instab. Kelvin-Helmonhtz.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Impulsos súbitos do vento solar;</li><li>▪ Mudança abruptas da convecção na cauda;</li><li>▪ Eventos de trasferencia de fluxo.</li></ul> |
| 10 – 100 mHz | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Instab. Kelvin-Helmonhtz;</li><li>▪ Instab. Próton-ciclotrônica do vento solar.</li></ul>                   | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Mudança abruptas na cauda da magnetosfera;</li><li>▪ Instab. De correntes alinhadas ao campo.</li></ul>                                  |
| 0,1 – 10 Hz  | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Instab. Próton-ciclotrônica na magnetosfera.</li></ul>                                                      | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Instab. De correntes alinhadas ao campo.</li></ul>                                                                                       |

Fonte: Samson (1991, p. 498) e Zanandrea (1998, p. 35).

## 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. Está região apresenta atualmente a área de menor intensidade do campo geomagnético ao longo da superfície terrestre (figura 2.12). 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.



**Figura 2.12 - Mapa magnético da Terra. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul em azul. O triângulo vermelho mostra a localização de seu centro no ano 2000.**

Fonte: <http://anomalia.magnetica.atlantico.sul.googlepages.com/>

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. Tipos de Magnetômetros

Vários tipos de magnetômetros foram sendo desenvolvidos ao longo do tempo. Cada magnetômetro possui propriedades e técnicas únicas que a torna mais adequada a aplicações específicas. 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, podemos dividir os magnetômetros em dois grupos, os magnetômetros escalares e os magnetômetros vetoriais.

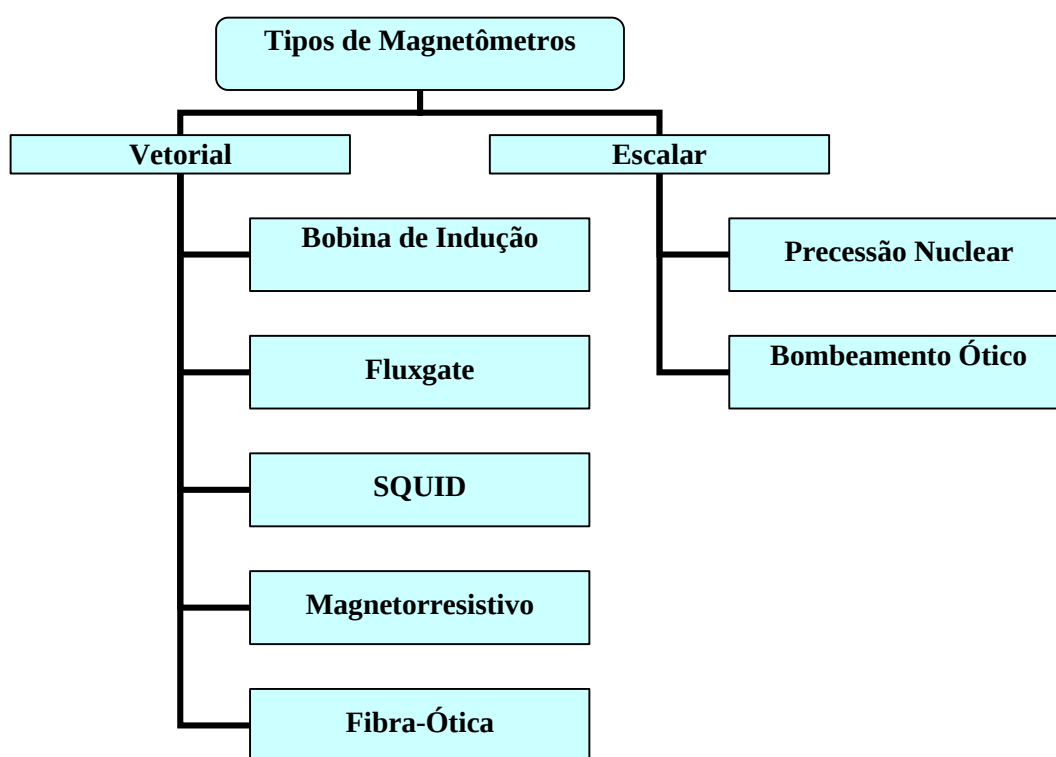


Figura 3.1 – Classificação dos magnetômetros.

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 [Kabata, 2000]. 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 a 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. O princípio de funcionamento do magnetômetro de prótons é baseado em constantes atômicas. 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.

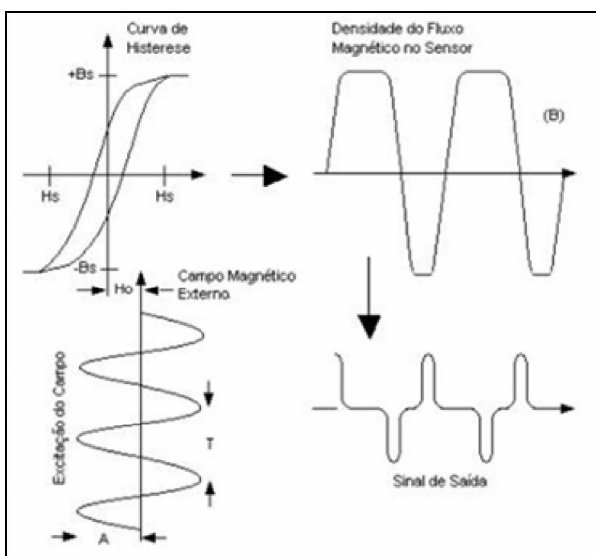
E os dispositivos de **Efeito Hall** são os mais antigos e comuns para medição vetorial de alto-campo. São especialmente utilizados em campos extremamente altos, maior que 1T. Os magnetômetros de efeito Hall são pouco utilizados nas medidas do Campo Geomagnético devido a sua baixa sensibilidade.

### **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.

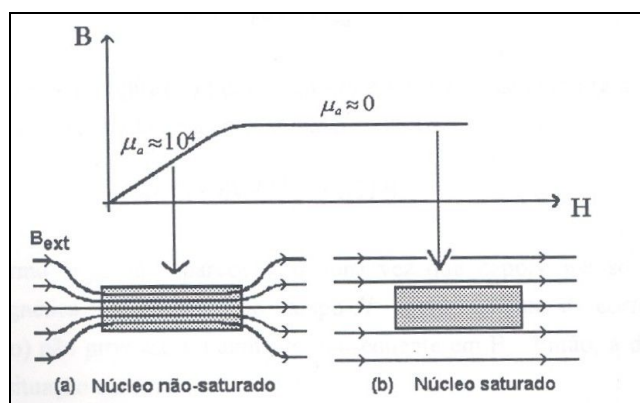


**Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.**  
**Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos**

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 saturado 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.

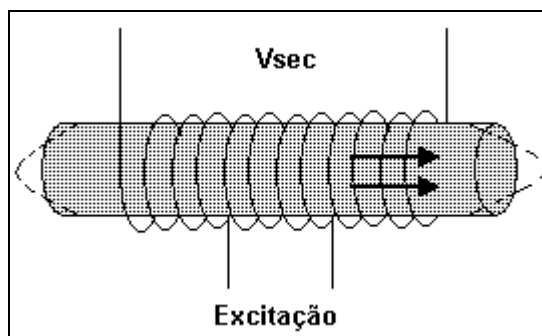


Figura 3.4 – Núcleo linear.

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.

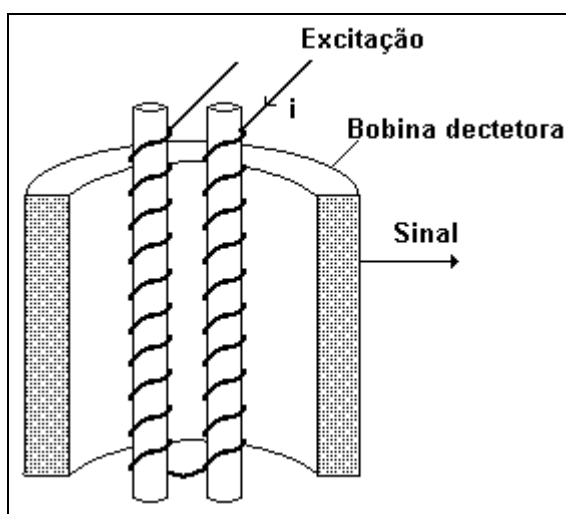


Figura 3.5 – Dois núcleos em barra.

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”.

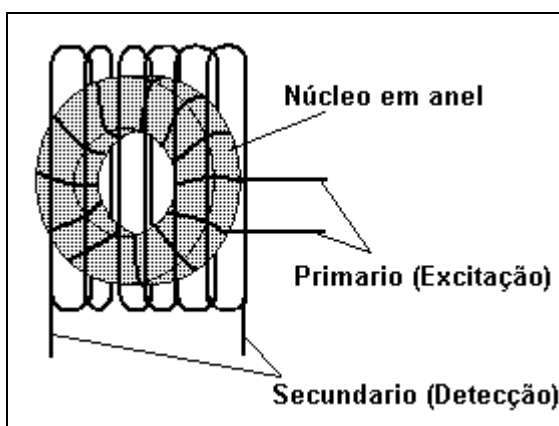


Figura 3.6 – Núcleo em anel.

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, por que:

- 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.

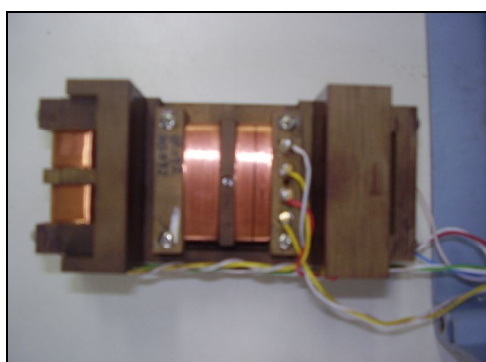
Caso o ruído em cada harmônico fosse completamente aleatório o método de detecção por todos os harmônicos pares deveria ser melhor que o método de segundo harmônico. Se o ruído tiver alguma correlação de fase, a contribuição de cada

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.

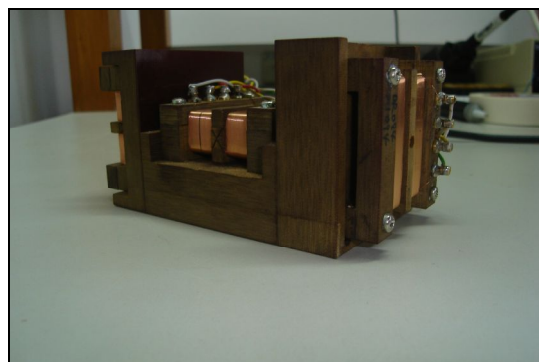
## Capítulo 4. Implementação do Magnetômetro Fluxgate

### 4.1 – Descrição e Características dos Sensores

O sensor escolhido para o estudado experimental e sua implementação 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.



(a)



(b)

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.



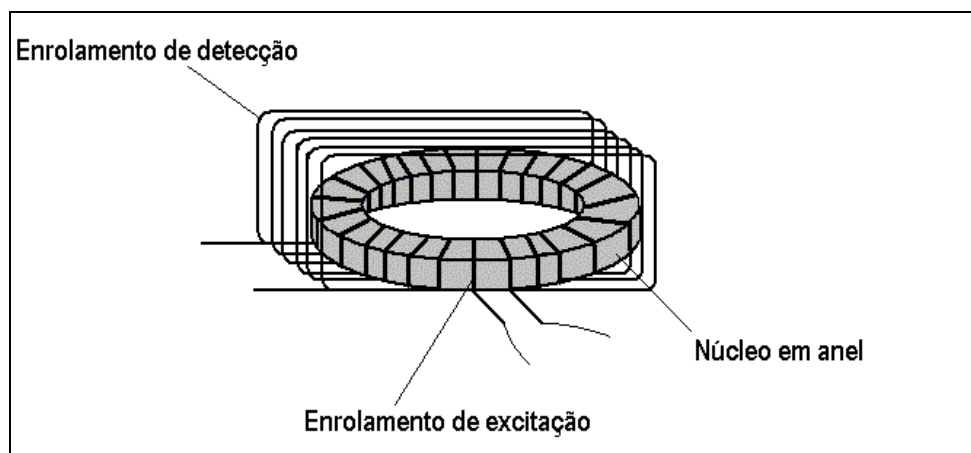
**Figura 4.2 – Núcleo ferromagnético toroidal**

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.

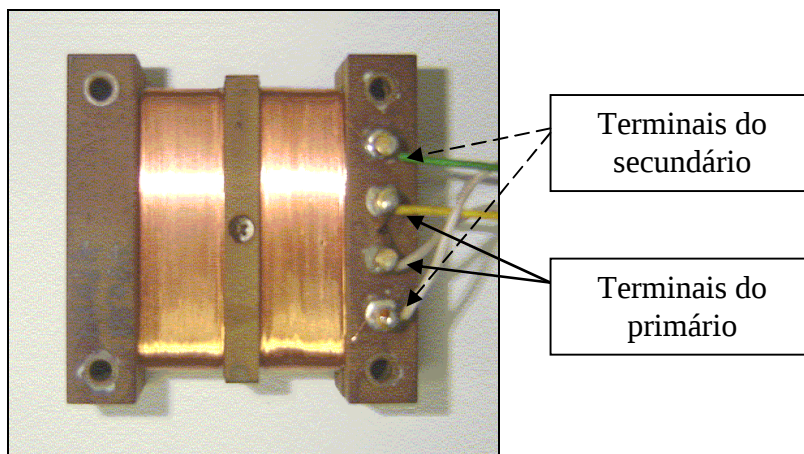
Os enrolamentos primários estão ligados em série entre si para esta configuração do fluxgate, desta forma a mesma corrente de excitação que passa pelas três bobinas é a mesma.

O esquema geral de um sensor é apresentado na figura 4.3:



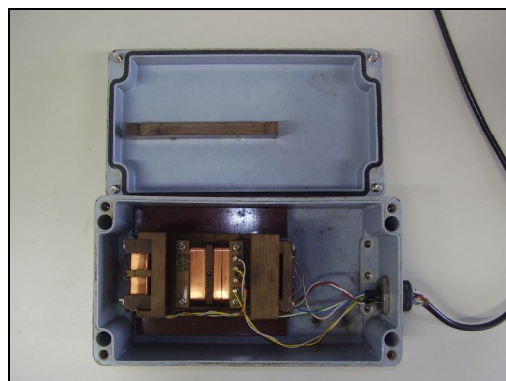
**Figura 4.3 – Esquema do sensor magnético com o enrolamento de excitação e de detecção .  
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.**

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.



Quando a excitação é conectada ao enrolamento primário há uma distorção do sinal quadrado devido à indutância da bobina de excitação.

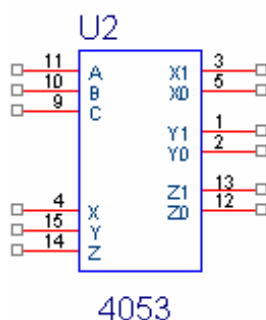
O sinal de excitação obtido do CI 4060 passa então, por um capacitor de desacoplamento contínuo e é levado a um amplificador formado pelos transistores, que fornecem pulsos de corrente para o enrolamento de excitação. Neste ponto temos a formação de pulsos de corrente curtos e intensos, através de um 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 a 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 referencia  $2f$  utilizada no CI 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.



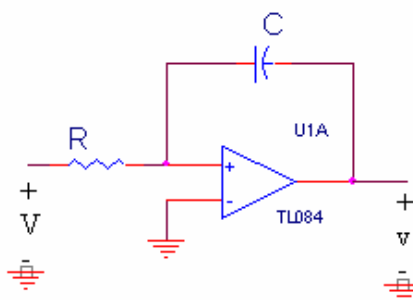
**Figura 4.7 – Circuito integrado multiplexador.**

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 4.8 – Circuito Integrador.**

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

### 4.3 – Circuito e placa

Após a descrição de cada uma das principais etapas do circuito citadas nas seções anteriores, 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:

A placa ainda será planejada, pois devidos aos resultados encontrados e as modificações até então feitas não poderemos usar a placa originalmente feita (Figura 512) para este layout.

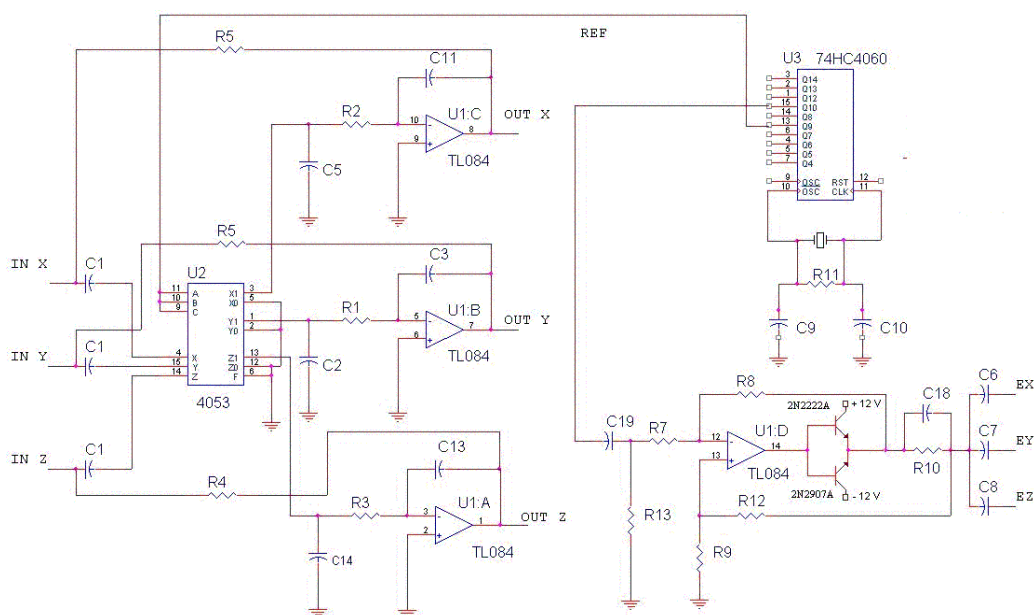


Figura 4.10 – Schematic do circuito de excitação e detecção.

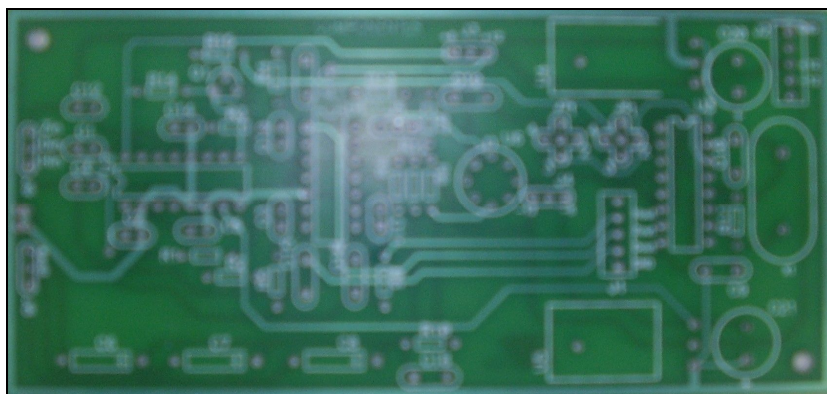


Figura 4.11 – Placa originalmente feita para este layout.

## Capítulo 5. Resultados Preliminares

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. Os cristais que apresentaram melhor sinal de excitação foram os cristais de 6,0 kHz e 7,2 kHz. Entre estes dois cristais foi selecionado o cristal com frequência de 7,2 kHz, por apresentar o sinal de excitação com menos ruído.

Após analisar o cristal com melhor frequência de saturação, passamos para os testes nos próximos estágios do circuito. Os gráficos mostrados na figura 5.1 representam os sinais de excitação no canal 2 e o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação no canal 4.

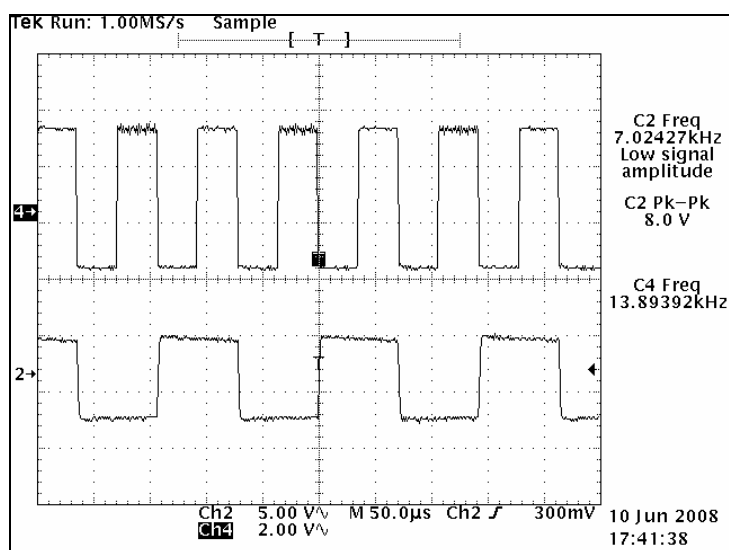


Figura 5.1 – Sinal de excitação, o sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência da excitação.

O sinal mostrado na figura 5.2 no canal 2 do osciloscópio é o sinal de excitação aplicado no sensor que é originalmente uma onda quadrada, mas ao ser ligado na bobina de excitação acaba sendo distorcido devido à indutância da bobina.

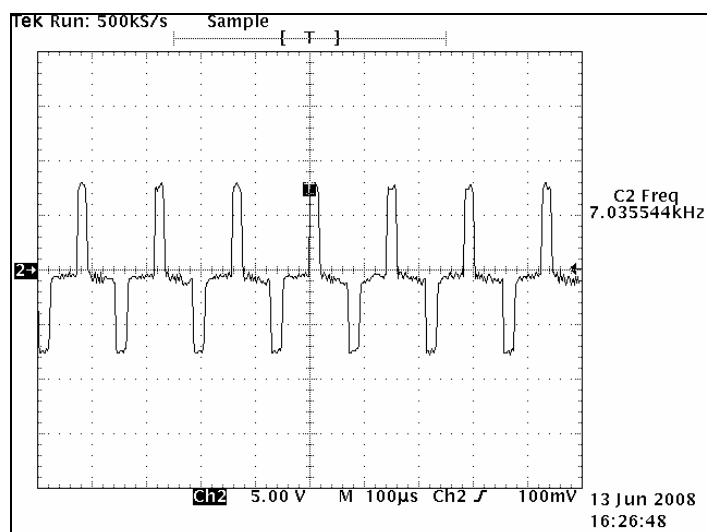


Figura 5.2 – Sinal de excitação ligado na bobina de excitação com distorção.

O sinal detectado no enrolamento de detecção apresenta uma frequência de aproximadamente 14 kHz o que faz sentido já que o sinal de excitação utilizado é de aproximadamente 7.2 kHz. Como se sabe a frequência detectada tem o dobro da frequência do sinal de excitação.

Com a primeira etapa do circuito concluída e funcionando como previsto, passamos para a segunda etapa, onde é feita a comparação do sinal detectado com o sinal da referência  $2f$  através do CI 4053. Na figura 5.3 é verificado a diferença de fase entre os dois sinais gerados no par de saídas do CI 4053. Esta defasagem é relacionada com o segundo harmônico do sinal detectado.

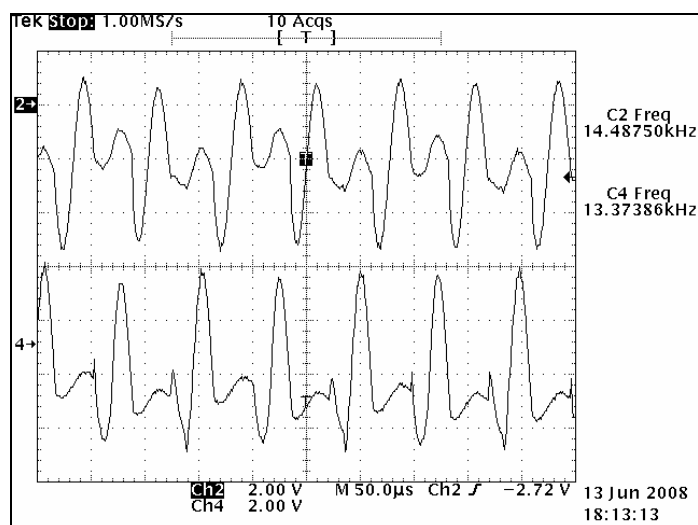
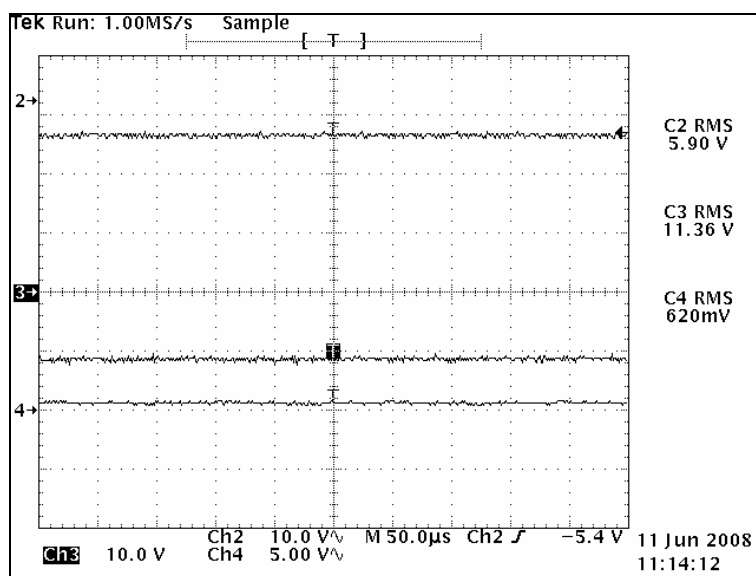


Figura 5.3 - Formas de ondas obtidas em cada par das três saídas do CI 4053.

Na terceira etapa do circuito obtemos uma tensão de saída contínua (Figura 5.4) que varia linearmente sua amplitude conforme as mudanças do Campo Magnético Terrestre. A figura 5.4 apresenta as três saídas diferentes para cada sensor orientado segundo o seu eixo nas três componentes vetoriais do Campo Geomagnético.



**Figura 5.4 – Três medidas referente à saída do CI 4053 para cada sensor.**

Embora os resultados obtidos nas três etapas do circuito são satisfatórios a linearidade do sinal de saída não está totalmente condizente com a variação do sensor. Contudo estes resultados serviram como base para entendimento mais minucioso de cada etapa de funcionamento do circuito. É necessário ampliar os esforços para encontrar os problemas técnicos que o circuito implementado apresentou.

## **Capítulo 6. Conclusão e Perfectivas do Projeto**

Neste trabalho foram abordados os resultados da primeira fase do projeto referente aos estudos experimentais e a construção do circuito de um magnetômetro fluxgate, com núcleo toroidal, desenvolvido no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CIE/INPE - MCT para estudos do Campo Geomagnético.

Os sinais encontrados nas três etapas do circuito ficaram dentro da expectativa inicial comparável a outros magnetômetros fluxgate encontrados na literatura. Porém, é necessário ampliar os esforços para encontra os problemas técnicos que o circuito implementado apresentou em relação à linearidade.

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, os avanços obtidos refletiram um crescimento no desenvolvimento do protótipo do Magnetômetro de Baixo Ruído.

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.

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

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

## 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, Nº 09, 1986.
- [9]. Felch, E. P. and Potter, J. L., **Preliminary Development of a Magnetometer Current Standard**, **Trans. 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 Clarendon 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.
- [15]. Jacobs, J.A.; Kato, Y.; Matsushita, S.; Troitskaya, V.A. **Classification of Geomagnetic Micropulsations.** Journal of Geophysical Research, **69**(1):180–181, Jan. 1964.
- [16]. Zanandrea, A. **Estudo das Micropulsações Geomagnéticas em Latitudes Muito Baixas, no Brasil.** INPE, São José dos Campos, 1999.
- [17]. Zanandrea, A. **Micropulsações Geomagnéticas em Santa Maria – RS.** INPE, São José dos Campos, maio de 1999.
- [18] Samson, J.C. **Geomagnetic Pulsations and Plasma Waves in the Earth's Magnetosphere.** In: Jacobs, J.A. ed., Geomagnetism, London, Academic Press, **4**:481–592, 1991.

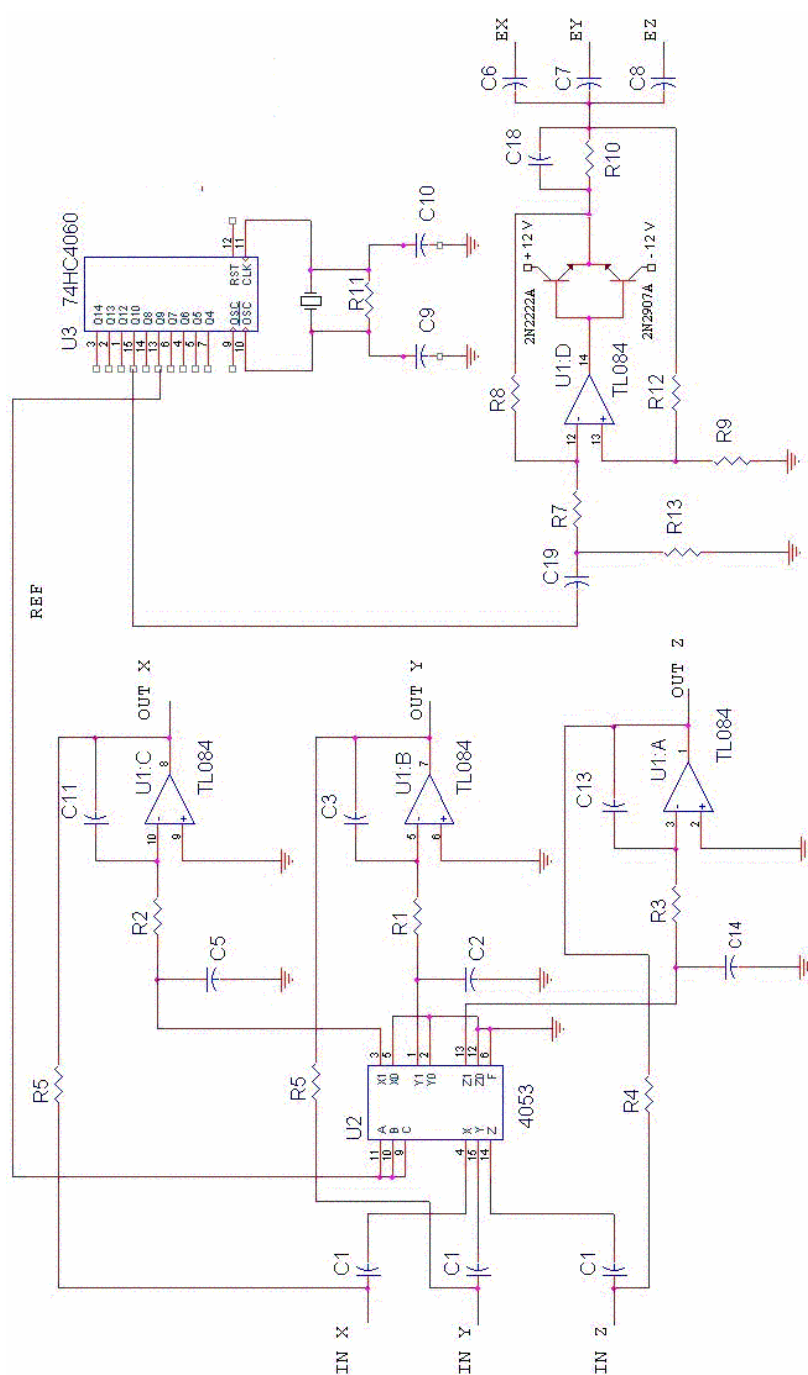


## ANEXOS



## **ANEXO A**

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

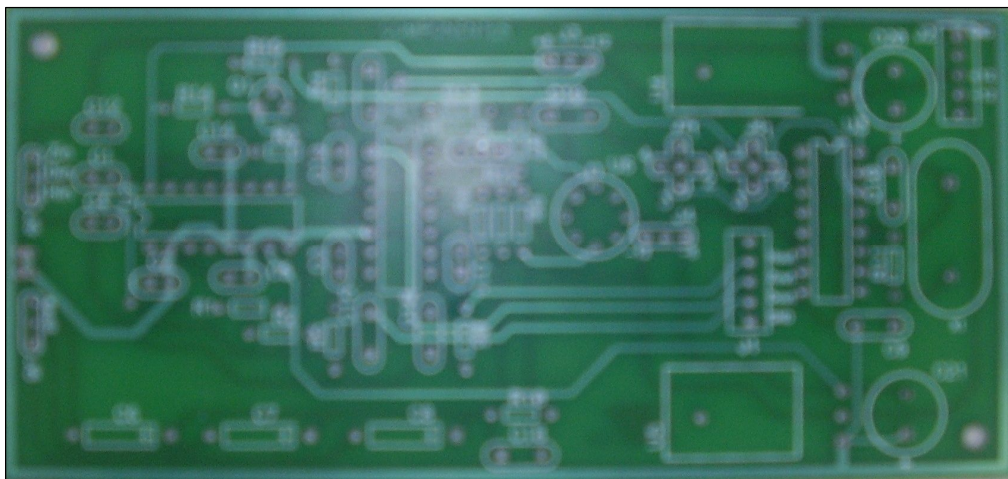




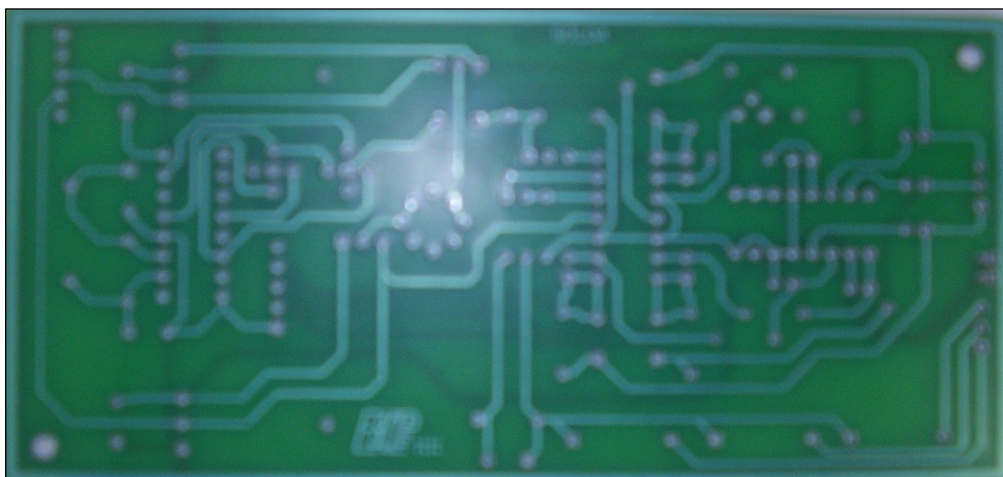
## **ANEXO B**

**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 5 trabalhos, sendo 2 como primeiro autor e foi co-autor de 2 trabalhos científicos que foram apresentados em congressos de Iniciação Científica:**

01 – **SIQUEIRA**, Josemar; TRIVEDI, Nalin Babulal; SCHUCH, Nelson Jorge; DUTRA, Severino Luiz Guimarães; ANTUNES, Cassio Espindola; ROTHER, Fagner Chagas; SANTOS, Lucas Silveira. **RING - CORE FLUXGATE MAGNETOMETER**. In: VI Latin American School of Geomagnetism ‘Luiz Muniz Barreto’ – VI ELAG, Vassouras, RJ, 2007.

02 - **SIQUEIRA**, Josemar; ANTUNES, Cassio Espindola; SANTOS, Lucas Silveira; ROTHER, Fagner Chagas; TRIVEDI, Nalin Babulal.;SCHUCH, Nelson Jorge; DUTRA, Severino Luiz Guimarães . **DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO ABORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO**. In: 22ª JORNADA ACADEMICA INTEGRADA – JAI, Santa Maria, 2007.

03 – ROTHER, Fagner Chagas; DUTRA, Severino Luiz Guimarães; TRIVEDI, Nalin Babulal; SCHUCH, Nelson Jorge; ANTUNES, Cassio Espindola; SANTOS, Lucas Silveira. **ANALISE DAS PULSAÇÕES GEOMAGNETICAS NA ANOMALIA MAGNETICA DO ATLANTICO SUL E PROXIMIDADES**. In: VI Latin American School of Geomagnetism ‘Luiz Muniz Barreto’ – VI ELAG, Vassouras, RJ, 2007.

04 – ANTUNES, Cassio Espindola; **SIQUEIRA**, Josemar; SANTOS, Lucas Silveira; TRIVEDI, Nalin Babulal.; SCHUCH, Nelson Jorge. **RING-CORE FLUXGATE MAGNETOMETER EXPERIMENTAL STUDIES AND DEVELOPMENT FOR DATA ACQUISITION IN THE SOUTH OF BRAZIL NEAR THE CENTER OF SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY – SAMA**. In: International Heliophysical Year – IHY 2008. São Paulo, SP, 2008.

05 - ROTHER, Fagner Chagas; **SIQUEIRA**, Josemar; ANTUNES, Cassio Espindola; SANTOS, Lucas Silveira; TRIVEDI, Nalin Babulal.;SCHUCH, Nelson Jorge; DUTRA, Severino Luiz Guimarães. **VARIAÇÃO COM CICLO SOLAR DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL, AMAS. - SICINPE 2007** In: 22ª JORNADA ACADEMICA INTEGRADA – JAI, Santa Maria, 2007.

**Jornada academica integrada – JAI, santa maria, 2007.****DESENVOLVIMENTO DE MAGNETOMETRO FLUXGATE DE BAIXO RUÍDO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS ABORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO – SICINPE 2007**

**Josemar de Siqueira** (CRS/CIE/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Dr. Nalin Babulal Trivedi (Orientador - OMV/ON – MCT)

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-orientador - CRS/CIE/NPE - MCT)

Cassio E. Antunes (CRS/CIE/INPE – MCT, Estagiário)

Fagner C. Rother (CRS/CIE/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

**Objetivos**

O principal objetivo do projeto é o desenvolvimento com a construção de um magnetômetro tipo fluxgate de baixo ruído, com núcleo toroidal, para medidas Geomagnéticas.

**Materiais e Métodos**

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 do sensor é baseado em propriedades ferro magnético do material e na alta permeabilidade do núcleo. O circuito eletrônico utilizado no protótipo do magnetômetro tem basicamente três etapas. A primeira etapa consiste na saturação do núcleo ferromagnético, a segunda compara o sinal de excitação com sinal detectado e na terceira obtém-se a relação de linearidade entre o sinal detectado e a variação do Campo Geomagnético.

**Resultados**

Os resultados obtidos nas três etapas do circuito foram satisfatórios. O sinal detectado na bobina secundária apresentou uma frequência de aproximadamente 12 kHz que é o dobro da frequência de excitação. Após a comparação deste sinal obtido com a referência  $2f$  foi efetuada à integração obtendo um sinal com um nível contínuo de tensão. Na última etapa conseguimos a relação de linearidade entre o sinal detectado e a variação do Campo Geomagnético.

**Conclusão**

Os sinais obtidos na excitação e os sinais resultantes da etapa final, onde se obteve o nível de continuidade da tensão após o circuito integrador, ficaram dentro da expectativa inicial e são comparáveis com dados de outros magnetômetros fluxgate publicados na literatura. Contudo, devemos otimizar o circuito do magnetômetro para que possa ocorrer uma melhor saturação do núcleo quando o sensor encontra-se afastado do circuito melhorando a qualidade dos dados observados em campo.

Palavras – chave

1. Toroidal
2. Geomagnetismo
3. Magnetômetro
4. Fluxgate
5. Histerese

**Jornada academica integrada – JAI, santa maria, 2007.****VARIAÇÃO COM CICLO SOLAR DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL, AMAS. - SICINPE 2007**

**Fagner Chagas Rother** – (CRS/CIE/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra (Orientador - DGE/CEA/INPE-MCT,)

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-orientador - CRS/CIE/NPE - MCT)

Dr. Nalin Babulal Trivedi (OMV/ON – MCT)

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

Cassio E. Antunes (CRS/CIE/INPE – MCT, Estagiário)

**Objetivos:**

O objetivo deste projeto é o estudo das características das pulsações geomagnéticas em diferentes momentos do ciclo solar, e seu relacionamento com a precipitação de partículas de energia eletricamente carregada na região da anomalia magnética do Atlântico Sul, AMAS

**Materiais e Metodos:**

Foi Realizada a medição das três componentes ortogonais do campo geomagnético usando um magnetômetro do tipo “Fluxgate” instalado nas estações geomagnéticas do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, localizado em São Martinho da Serra, situado próximo ao centro da SAMA, e na estação do Observatório Geomagnético de Vassouras – RJ (OMV/ON – MCT), situado próximo a borda da AMAS. Os dados geomagnéticos adquiridos no formato binário foram posteriormente convertidos para o formato gráfico ASC II em função do tempo, através do programa Narod Fluxgate.

**Resultados:**

Foi possível verificar que nos dias magneticamente calmos, as duas estações geomagnéticas apresentam variações regulares diárias, e nos dias magneticamente perturbados verificamos que em São Martinho da Serra, as pulsações geomagnéticas possuem maiores amplitudes do que as observadas na estação de Geomagnética de Vassouras. Este fenômeno indica uma maior precipitação de partículas carregadas como o resultado da mais baixa intensidade do campo geomagnético na região da AMAS.

**Conclusão:**

O estudo do campo Geomagnético na região da AMAS é principalmente importante para países localizados próximos ou sob a anomalia magnética do atlântico sul, como o Brasil, para evitar inúmeros problemas, por exemplo, de interferências e das falhas em satélites.

Palavras – chave

1. Geomagnetismo
2. Pulsação Geomagnetica
3. Ciclo Solar

**VI Latin American School of Geomagnetism ‘Luiz Muniz Barreto’ – VI ELAG,  
Vassouras, RJ, 2007.**

**ANALISE DAS PULSAÇÕES GEOMAGNETICAS NA ANOMALIA  
MAGNETICA DO ATLANTICO SUL E PROXIMIDADES.**

**Fagner C. Rother<sup>1</sup>, Dr. Nelson J. Schuch<sup>1</sup>, Josemar de Siqueira<sup>1</sup>, Cassio E.  
Antunes, Lucas Silveira dos Santos<sup>1</sup>, Dr. Nalin B. Trivedi<sup>2</sup>, Dr. Severino L.  
Guimarães Dutra<sup>3</sup>.**

1. Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT,
2. Observatório Magnético de Vassouras - OMV/ON – MCT, Vassouras, RJ,  
Brasil
3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - MCT, São José dos Campos,  
Brasil

contato: rother@lancesm.ufsm.br

As características das pulsações geomagnéticas foram estudadas em várias fases do ciclo solar e seu relacionamento com a precipitação de partículas carregadas de altas energias na região da AMAS. O campo magnético da Terra é considerado assimétrico e AMAS é a área onde a menor intensidade do campo magnético é observada, esta anomalia está situada ao sul do equador, abrangendo parte do oceano atlântico e sul do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. Nesta região ocorre uma maior precipitação de raios cósmicos e de partículas do vento solar ocasionando perturbações na ionosfera e no campo geomagnético local. As variações do campo magnético terrestre foram detectadas por um magnetômetro do tipo *fluxgate* (núcleo saturado) instalado na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, SMS (29°,43 S, 53°,82 W), RS, estes dados foram analisados e comparados com os dados das pulsações observadas em estações afastadas e fora da região da anomalia, com ênfase na Estação Geomagnética de Vassouras, VSS (22.40°S,43.65W), RJ, do Observatório Nacional – ON/MCT, e na Estação Geomagnética de Eusébio, EUS (3,89°S; 38,44°O), MA. Para este trabalho foi usado dados da variação observada na componente H durante uma tempestade geomagnética, com isso foi possível detectar pulsações de períodos longos bem como as Pc5–Pc6. Utilizando-se uma filtragem digital – com um filtro tipo passa-banda com a função de analisar somente as pulsações numa faixa de 180 a 900 segundos. Diferenças na variação da componente H foram observadas quando comparadas com os resultados das estações de São Martinho da Serra (SMS) localizada próximo ao centro da AMAS, com a Estação Geomagnética de Vassouras (VSS) localizada na borda da anomalia, e com a Estação Geomagnética de Eusébio (EUS) localizada fora da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, estes resultados observados sugerem a necessidade de um contínuo monitoramento deste fenômeno na região da AMAS.

**VI Latin American School of Geomagnetism ‘Luiz Muniz Barreto’ – VI ELAG,  
Vassouras, RJ, 2007.**

**RING-CORE FLUXGATE MAGNETOMETER**

**Josemar de Siqueira<sup>1</sup>, Dr. Nelson J. Schuch<sup>1</sup>, Cassio E. Antunes<sup>1</sup>, Fagner Rother<sup>1</sup>,  
Lucas Silveira dos Santos<sup>1</sup>, Dr. Nalin B. Trivedi<sup>2</sup>, Dr. Severino L. Guimarães  
Dutra<sup>3</sup>.**

2. Southern Regional Space Research Center – CRS/CIE/INPE – MCT, in collaboration with the Santa Maria Space Research Laboratory – LACESM/CT – UFSM. CP 97110-900, Santa Maria, RS, Brazil.
3. Magnetic observatory of Vassouras - OMV/ON – MCT, Vassouras, RJ, Brazil
3. National Institute for Space Research – INPE - MCT, São José dos Campos, Brazil

Author for contact: josemar@lacesm.ufsm.br

The objective of this work is to describe the development of a fluxgate magnetometer for measuring geomagnetic field variations. The study of Earth's magnetic field has a great importance in the field of space research. This kind of sensor is based on the principle of varying permeability under an excitation signal. The fluxgate sensor is composed of two coils wound on the ring core, one coil for excitation and the second coil a sensor coil for the detection of signal proportional to the ambient geomagnetic field. Each sensor has a toroidal core with high permeability and orthogonal to each other, forming a coordinate axis that is aligned with the H, D and Z components of geomagnetic field. This toroidal core is exposed of in a excitation field  $H_0$  generated by a coil around the ring, that make to change the material magnetic flux according the  $B \times H_0$  hysteresis curve. When the magnetic flux is ranged in saturation point, the core permeability vanishes. When the core is not saturated, the external magnetic field, which one want to measure, is concentrated in a toroidal core due your high permeability. After receiving the excitation field, the magnetic flux in the core changes due the saturation and consequent decrease of external permeability. This magnetic flux variation is detected by a secondary coil wound over the ring core. The detected second harmonic of the excitation signal is proportional to the external field that is to be measured. Thus we can implement a circuit that excites the core and provides the second harmonic signal proportional to the ambient geomagnetic field.

**International Heliophysical Year – IHY 2008. São Paulo, SP, 2008.**

**RING-CORE FLUXGATE MAGNETOMETER EXPERIMENTAL STUDIES  
AND DEVELOPMENT FOR DATA ACQUISITION IN THE SOUTH OF  
BRAZIL NEAR THE CENTER OF  
SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY - SAMA**

Cassio Espindola Antunes <sup>[1,2]</sup>, Nelson Jorge Schuch <sup>[1]</sup>, Nalin Babulau Trivedi <sup>[3]</sup>,  
Josemar de Siqueira <sup>[1,2]</sup>, Sandro F. Bertagnolli <sup>[1,2]</sup>, Fagner Chagas Rother <sup>[1,2]</sup>

1. Southern Regional Space Research Center – CRS/INPE – MCT, Santa Maria, RS, Brazil.
2. Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, Santa Maria, RS, Brazil.
3. Magnetic Observatory of Vassouras – OMV/ON – MCT, Vassouras, RJ, Brazil.  
*e-mail: cassio@lacesm.ufsm.br*

**ABSTRACT**

The recordings of the geomagnetic field variations at a station on the surface of the Earth provide information on the physical processes in the ionosphere and magnetosphere due to the space weather changes or the Sun – Earth interactions. The large scale geomagnetic events recorded in the region of the South Atlantic Magnetic Anomaly – SAMA, the region of lowest total geomagnetic field intensity over the entire globe, are important due to easier charged particle precipitations during the magnetic storms in the SAMA region. In order to conduct geomagnetic field variations in the anomaly region, a ring core fluxgate magnetometer was developed at the Southern Regional Space Research Center – CRS/CIE/INPE – MCT at Santa Maria, RS, Brazil. The principle of the operation of a fluxgate magnetometer is based on varying magnetic permeability of its ring core sensor when subjected to a excitation signal capable of taking the sensor to a periodical saturation. The sensor coil wound over the ring core sensor picks up second harmonic signal of the excitation signal imposed on the primary coil. The detected second harmonic signal is linearly proportional to the varying ambient geomagnetic field. The objective of this work is to conduct geomagnetic field measurements by operating a fluxgate magnetometer with ring core constructed at CRS/CIE/INPE – MCT in Santa Maria, installed at the Southern Space Observatory SSO/CRS/CIE/INPE – MCT in São Martinho da Serra, RS, Brazil, and study the geomagnetic field variations observed in the SAMA region.



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





