



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/INPE – MCT  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
CRS/INPE – MCT  
E-mail: [josemar@lacesm.ufsm.br](mailto: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](mailto:dutra@dge.inpe.br)**

**Santa Maria, Julho de 2009**



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

**PROJETO**

**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS  
GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RÚIDO 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@lacesm.ufsm.br](mailto:josemar@lacesm.ufsm.br)

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

**Dr. Nelson Jorge Schuch** - Co-Orientador  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT  
E-mail: [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Dr. Nalin Babulal Trivedi** – Co-Orientador  
Observatório Magnético de Vassouras – DGE/CEA/INPE – MCT  
E-mail: [trivedi@dge.inpe.br](mailto:trivedi@dge.inpe.br)



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:**

### **Bolsista:**

**Josemar de Siqueira**

Curso de Física – Licenciatura  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Processo:**

Nº 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/INPE – MCT

**Dr. Nalin B. Trivedi**

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

### **Colaboradores:**

**Cassio E. Antunes**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

**Fernando 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/INPE – MCT.

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

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT - UFSM, através do  
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



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



Identificação

Recursos Humanos

Linhas de Pesquisa

Indicadores do Grupo

**Identificação**

**Dados básicos**

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

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

**Ano de formação:** 1996

**Data da última atualização:** 15/06/2009 18:00

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

Natanael Rodrigues Gomes - [natanael.gomes@lacesm.ufsm.br](mailto:natanael.gomes@lacesm.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@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

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

**Repercussões dos trabalhos do grupo**

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/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, 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, mecanismos de geração de energia no Sol, 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, Eletricidade Atmosférica e seus Eventos Luminosos Transientes (TLEs). As Pesquisas base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, e de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.





**Recursos humanos**

**Pesquisadores** **Total: 42**

<a href="#">Ademar Michels</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>
<a href="#">Alan Prestes</a>	<a href="#">Joao Paulo Minussi</a>
<a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a>	<a href="#">Jose Humberto Andrade Sobral</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Juliano Moro</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="#">Caitano Luiz da Silva</a>	<a href="#">Marco Ivan Rodrigues Sampaio</a>
<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</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="#">Nivaor Rodolfo Rigozo</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Odin Mendes Junior</a>
<a href="#">Fabiano Luis de Sousa</a>	<a href="#">Osmar Pinto Junior</a>
<a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Fernanda de São Sabbas Tavares</a>	<a href="#">Pawel Rozenfeld</a>
<a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a>	<a href="#">Petrônio Noronha de Souza</a>
<a href="#">Gelson Lauro Dal' Forno</a>	<a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>
<a href="#">Hisao Takahashi</a>	<a href="#">Rajaram Purushottam Kane</a>
<a href="#">Ijar Milagre da Fonseca</a>	<a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>
<a href="#">Jean Carlo Santos</a>	<a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>

**Estudantes** **Total: 32**

<a href="#">Aline Seeger Santos</a>	<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>
<a href="#">Bernardo Henz</a>	<a href="#">Josemar de Siqueira</a>
<a href="#">Carlos Pinto da Silva Neto</a>	<a href="#">Lilian Piecha Moor</a>
<a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>	<a href="#">Lucas Antunes Tambara</a>
<a href="#">Cássio Rodinei dos Santos</a>	<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>
<a href="#">Celito Muck Felipetto</a>	<a href="#">Lucas Ramos Vieira</a>
<a href="#">Claudio Machado Paulo</a>	<a href="#">Luis Fernando Nicolini</a>
<a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>
<a href="#">Eduardo Escobar Bürger</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>
<a href="#">Eduardo Weide Luiz</a>	<a href="#">Ricardo Cartier dos Santos</a>
<a href="#">Felipe Cipriani Luzzi</a>	<a href="#">Rodrigo da Rosa Azambuja</a>
<a href="#">Fernando de Souza Savian</a>	<a href="#">Rubens Zolar Gehlen Bohrer</a>
<a href="#">Guilherme Aluizio Steffens Lorensen</a>	<a href="#">Tardelli Ronan Coelho Stekel</a>
<a href="#">Guilherme Grams</a>	<a href="#">Thalis José Girardi</a>
<a href="#">Guilherme Simon da Rosa</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>
<a href="#">Igor Freitas Fagundes</a>	<a href="#">Willian Rigon Silva</a>

**Técnicos** **Total: 2**

Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação  
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função

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

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



Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	42
Estudante(s)	32
Técnico(s)	



**Linha de Pesquisa**  
**MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO**

**Linha de pesquisa**

**MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO**

**Nome do grupo:** [Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: 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](#)  
[Gelson Lauro Dal' Forno](#)  
[Jean Carlo Santos](#)  
[Joao Paulo Minussi](#)  
[Mangalathayil Ali Abdu](#)  
[Nalin Babulal Trivedi](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Osmar Pinto Junior](#)  
[Pawel Rozenfeld](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

**Estudantes:**

[Aline Seeger Santos](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Celito Muck Felipetto](#)  
[Claudio Machado Paulo](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)  
[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](#), [Geomagnetismo: 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](#)  
[Carlos Roberto Braga](#)  
[Ezequiel Echer](#)  
[Fernando Luís Guarnieri](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Juliano Moro](#)  
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Rajaram Purushottam Kane](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

**Estudantes:**

[Aline Seeger Santos](#)  
[Claudio Machado Paulo](#)  
[Eduardo Escobar Bürger](#)  
[Guilherme Grams](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lucas Antunes Tambara](#)  
[Lucas Ramos Vieira](#)  
[Luis Fernando Nicolini](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[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.





**Linha de Pesquisa**  
**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

**Linha de pesquisa**

**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

**Nome do grupo:** [Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: 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](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Odim Mendes Junior](#)  
[Otavio Santos Cupertino Durão](#)  
[Pawel Rozenfeld](#)  
[Petrônio Noronha de Souza](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

**Estudantes:**

[Bernardo Henz](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Celito Muck Felipetto](#)  
[Eduardo Escobar Bürger](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Guilherme Grams](#)  
[Guilherme Simon da Rosa](#)  
[Igor Freitas Fagundes](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lucas Antunes Tambara](#)  
[Lucas Lopes Costa](#)  
[Lucas Ramos Vieira](#)  
[Luis Fernando Nicolini](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Rafael Lopes Costa](#)  
[Ricardo Cartier dos Santos](#)  
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)  
[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, 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: Otávio Santos Cupertino Durão.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, pelo “investimento” que fez em mim, pelo constante apoio e incentivo e por tudo que aprendi, não só no campo científico, mas também no ético e no humano. 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.

Em especial, agradeço aos colegas de Laboratório e amigos Cassio Espindola Antunes, Willian Rigon Silva e Fernando de Souza Savian que não mediram tempo e nem esforços para me auxiliar e que foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto e também para meu próprio crescimento pessoal. Gostaria de agradecer também ao amigo Everton Frigo pelas discussões e sugestões referente ao projeto.

Gostaria de agradecer ao Dr. Lúcio Strazzabosco Dorneles, Dr. Marcio Assolin Corrêa e ao Dr. Felipe Bhon, integrantes do Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos – LMMM/CCNE - UFSM, pelo constante apoio e sugestões em relação ao teste realizado com o material ferromagnético do núcleo do sensor do magnetômetro fluxgate.

Meus sinceros agradecimentos também aos funcionários, servidores do CRS/INPE – MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCT.



## Sumário

<b>RESUMO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2 - CAMPO GEOMAGNÉTICO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. ASPECTOS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. MAGNETOSFERA TERRESTRE.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS.....</b>	<b>15</b>
2.3.1. <i>Micropulsações Geomagnéticas .....</i>	<i>15</i>
<b>2.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS).....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3 - TIPOS DE MAGNETÔMETROS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. MAGNETÔMETROS UTILIZADOS NAS MEDIDAS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO (FLUXGATE MAGNETOMETER).....</b>	<b>20</b>
3.2.1. <i>Magnetização de materiais ferromagnéticos e suas curvas de Histerese .....</i>	<i>22</i>
3.2.2. <i>Geometria dos Sensores Fluxgate.....</i>	<i>28</i>
<b>3.3. MÉTODOS DE DETECÇÃO E ANÁLISE DO SINAL.....</b>	<b>31</b>
3.3.1. <i>Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado .....</i>	<i>31</i>
3.3.2. <i>O Sensor e a Bobina de Realimentação.....</i>	<i>32</i>
3.3.3. <i>Fluxgate Curto Circuitado.....</i>	<i>32</i>
3.3.4. <i>Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado.....</i>	<i>33</i>
3.3.5. <i>Magnetômetro de Harmônicos Pares .....</i>	<i>34</i>
<b>CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 – DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2 – CIRCUITO ELETRÔNICO.....</b>	<b>38</b>
4.2.1 – <i>Circuito e Sinal de Excitação.....</i>	<i>39</i>
4.2.2 – <i>Comparação dos Sinais .....</i>	<i>40</i>
4.2.3 – <i>Circuito Integrador.....</i>	<i>41</i>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1. MÉTODO E RESULTADO DA ANÁLISE DAS CURVAS DE HISTERESE .....</b>	<b>43</b>
5.1.1 <i>Método .....</i>	<i>43</i>
5.1.2. <i>Resultado da análise das curvas de histerese .....</i>	<i>45</i>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>51</b>
<b>6.1. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>6.2. PERFECTIVAS DO PROJETO .....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>



<b>ANEXOS .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO D .....</b>	<b>61</b>

## 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. ....	18
Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.....	20
Figura 3.3 – Saturação do núcleo. ....	21
Figura 3.4 – (a) corpo magnetizado com um único domínio; (b) corpo magnetizado com estrutura multi-domínios. ....	24
Figura 3.5 – Movimento das paredes dos domínios de uma amostra ferromagnética sujeita a um campo crescente $H$ . ....	24
Figura 3.6 – Representação de dois domínios magnéticos separados por uma parede de domínios. ....	25
Figura 3.7 – Diagrama da curva de histerese $B \times H$ para um determinado material ferromagnético.....	26
Figura 3.8 – Diagrama da magnetização de um material ferromagnético “mole”. ....	27
Figura 3.9 - Diagrama da magnetização de um material ferromagnético “duro”. ....	27
Figura 3.4 – Núcleo linear. ....	28
Figura 3.5 – Dois núcleos em barra. ....	29
Figura 3.6 – Núcleo em anel.....	30
Figura 4.1 - Desenho esquemático dos três sensores do magnetômetro fluxgate. Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT. ....	36
Figura 4.2 – (a) mostra um dos sensores completo separado do conjunto com a vista frontal da bobina de excitação e da bobina de detecção CRS/INPE - MCT. ....	37
Figura 4.3 – Núcleo ferromagnético toroidal ....	37
Figura 4.4a – Magnetômetro Fluxgate. ....	38
Figura 4.4b – Magnetômetro Fluxgate. ....	38
Figura 4.5 – Circuito de excitação.....	40
Figura 4.6 – Circuito integrado multiplexador.....	41
Figura 4.7 – Circuito Integrador.....	42
Figura 5.1 – Esquema de montagem e circuito para obtenção de curvas histerese.....	43
Figura 5.1 – Integrador de milher.....	44
Figura 5.2.....	44
Figura 5.3 - Curva de histerese para frequência de 4kHz para uma corrente 21,84 mA rms. ....	46
Figura 5.4 - Curva de histerese para frequência de 6 kHz para uma corrente 20,77 mA rms. ....	47
Figura 5.5 - Curva de histerese para frequência de 8kHz para uma corrente 19,51 mA rms. ....	47



Figura 5.6 - Curva de histerese para frequência de 12kHz para uma corrente 16,5 mA rms. ....49

Figura 5.7 - Curva de histerese para frequência de 15kHz para uma corrente 13,82 mA rms. ....49



## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 - Classificação Morfológica.....	16
Tabela 2 - Classificação Genética. ....	17
Tabela 3 - Classes de magnetômetros segundo seus princípios físicos.....	19

## Resumo

Os magnetômetros de núcleo saturado ou “Fluxgate Magnetometer” são dispositivos que medem a magnitude e direção de campos magnéticos, estáticos ou alternados. Seu funcionamento está baseado nas propriedades magnéticas de certos materiais ferromagnéticos que apresentam uma histerese com um ponto de saturação elevado. A alta permeabilidade dos materiais utilizados na confecção dos núcleos é essencial para a detecção do campo magnético que se deseja mensurar. Entre os tipos de aplicações encontram-se principalmente a observação de fenômenos Geomagnéticos resultantes das interações Sol e Terra, do vento solar com a atmosfera ionizada.

Os fenômenos que ocorrem no Campo Geomagnético podem afetar 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.

No Relatório apresenta-se o Projeto, desenvolvimento e a construção de um magnetômetro do tipo *fluxgate* de baixo custo e ruído, com núcleo toroidal, para estudos do Campo Geomagnético. Nesta etapa do Projeto fez-se um estudo da curva de histerese do material que constitui o núcleo do sensor para que possamos determinar a topologia do circuito de detecção mais apropriado a ser implementado com o sensor.

## CAPÍTULO 1

### 1.1. Introdução

Existem vários modelos de magnetômetros disponíveis para pesquisa atualmente, cada um com suas peculiaridades. São equipamentos aplicados na análise estrutural de materiais, em biomedicina, prospecção mineral e em operações militares e principalmente no estudo das variações do campo geomagnético. Para cada tipo de estudo ou pesquisa que se deseja realizar existem diversas técnicas, geometrias de sensores, diferentes circuitos eletrônicos, etc.

Os magnetômetros *fluxgate* 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. Os 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.

A evolução ao longo do tempo no desenvolvimento dos magnetômetros de um núcleo, dois núcleos e finalmente com o núcleo em anel, possibilitou a construção de magnetômetros com maior sensibilidade e mais precisos e que ocupassem menor volume, requerendo menos corrente para que houvesse a saturação do material magnético dos núcleos. Desenvolvimentos recentes melhoraram significativamente o nível de ruído nos sensores e os problemas de *offset*.

Os principais objetivos do Projeto são 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 a bordo de satélites científicos, utilizando sistemas “*fluxgate*” de três componentes com o sensor em anel, 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/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, SMS, (29°, 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/CRS/INPE – MCT;
- Desenvolvimento de conhecimentos de Instrumentação Geomagnética através de construção e operação de magnetômetros de baixo ruído para pesquisas espaciais.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão sobre o Campo Geomagnético, mostrando as suas principais características e os fenômenos que ocorrem devido à interação Sol-Terra;
- O Capítulo 3 apresenta um breve estudo sobre os vários tipos de magnetômetros utilizados atualmente em diferentes áreas de aplicação, como também o estudo da geometria dos sensores fluxgate e os vários tipos de métodos de detecção e análise do sinal empregado nos magnetômetros Fluxgate;
- O Capítulo 4 apresenta uma descrição das características dos três sensores *fluxgate* utilizado no projeto e cada estágio do circuito que será implementado para o magnetômetro tipo *fluxgate*;
- O Capítulo 5 apresenta o método utilizado para se obter as curvas de histerese e a análise dos resultados obtidos nesta etapa do projeto;
- O Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as perspectivas para as etapas futuras do projeto.

## 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.

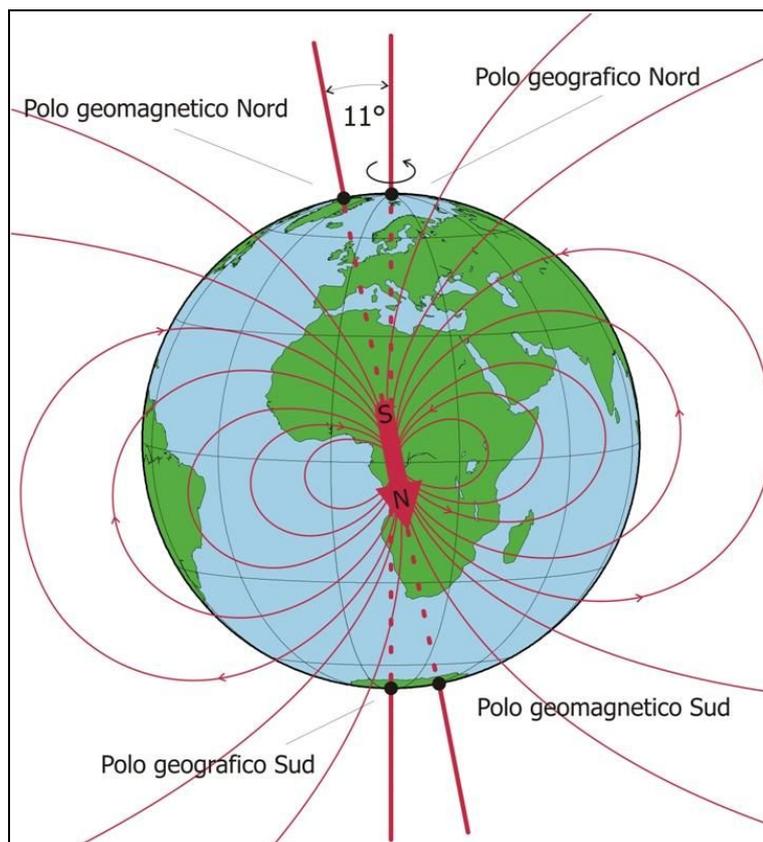
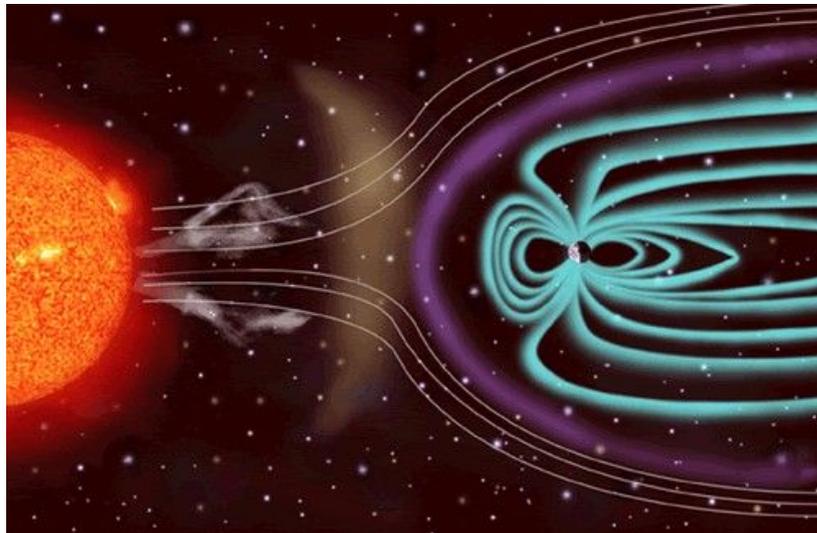


Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.  
Fonte: [www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra/](http://www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra/)

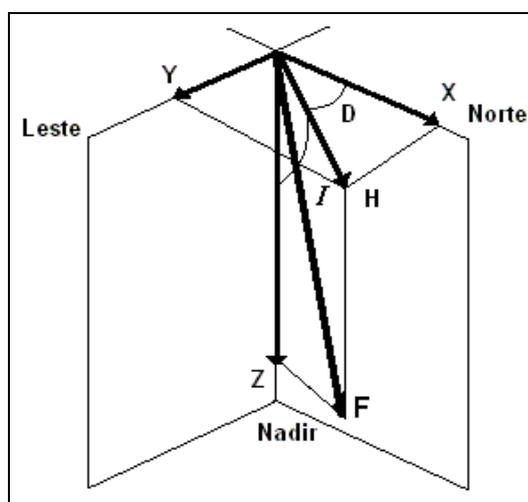
Devido a interação do Campo Magnético Terrestre com o vento solar emitido continuamente pelo Sol, em todas as direções, a forma das linhas do Campo Geomagnético assemelha-se a cauda longa de um cometa, como mostra a figura 2.2.



**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,  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  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:  $\varphi = \pi/2 - \theta$ ).

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

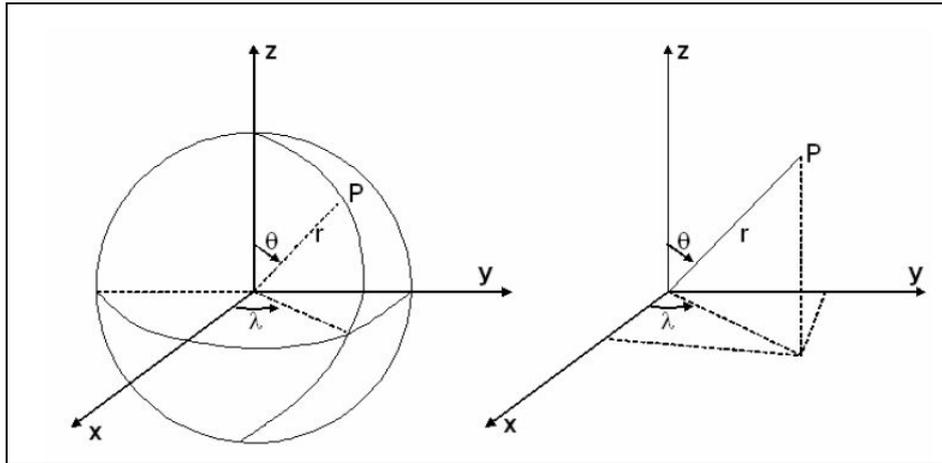


Figura 2.4 - Representação das coordenadas esféricas.

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

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

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

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

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

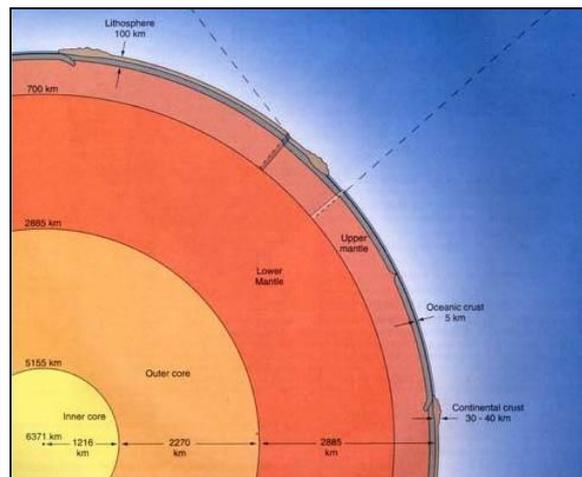
$$Y = \frac{1}{\sin \theta} \sum \sum P_n^m [mA_n^m \sin m\lambda - mB_n^m \cos m\lambda] \quad (\text{Eq. 2.22})$$

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

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

A observação do magnetismo associado às manchas solares levou Joseph Larmor, em 1919, à idéia de que o campo era produzido por fluidos condutores com movimentos convectivos em um processo de *dinamo 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.

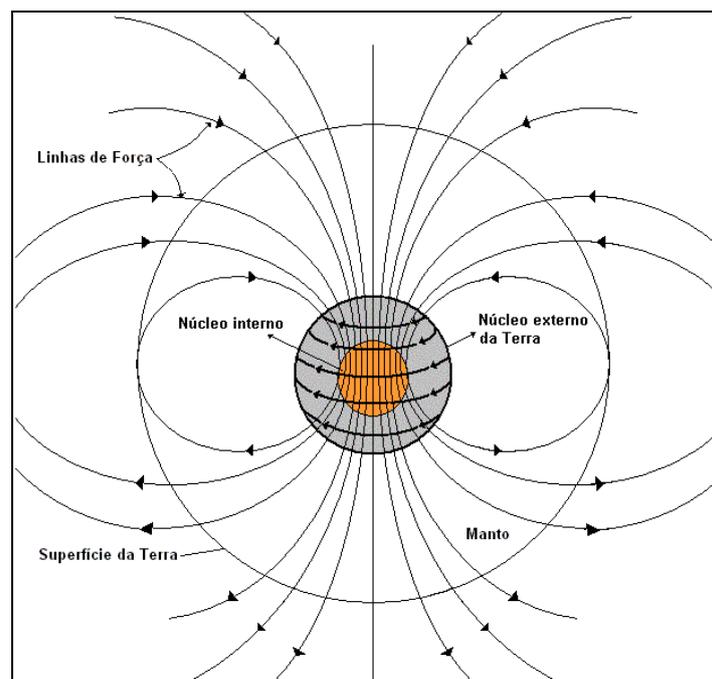
O Campo Geomagnético, em qualquer posição da superfície da Terra é a soma de três componentes com origens distintas: o campo interno, cuja produção ocorre no núcleo externo da Terra; o campo crustal, cujas fontes são os materiais magnetizados e induzidos encontrados na crosta e o campo externo, produzido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

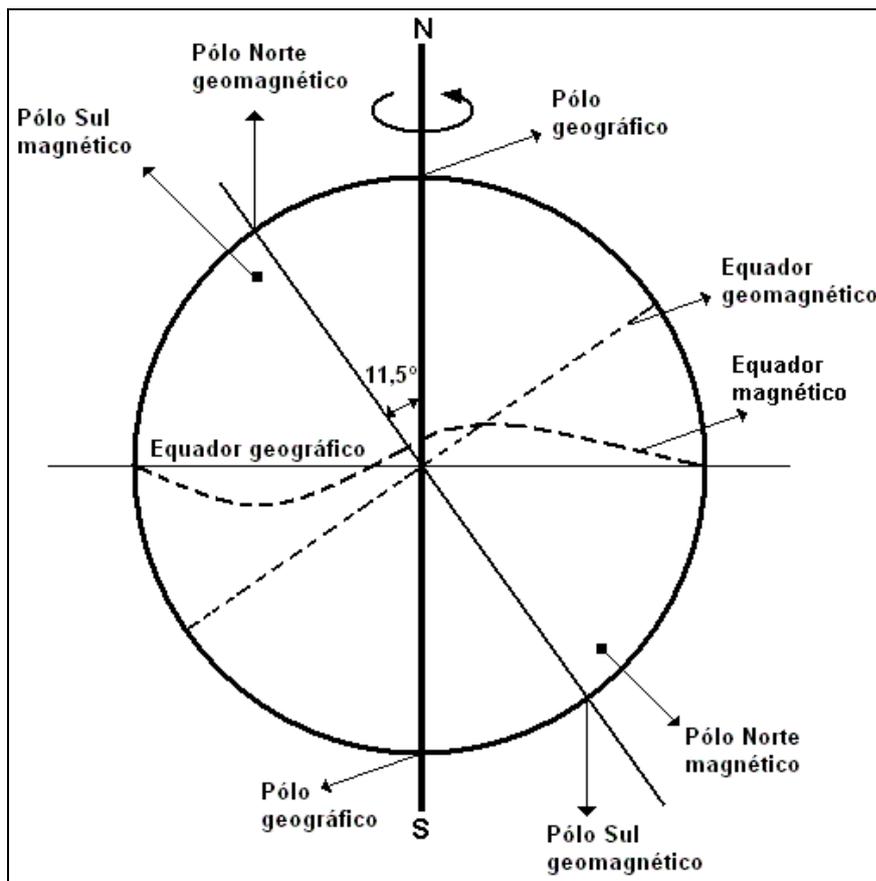
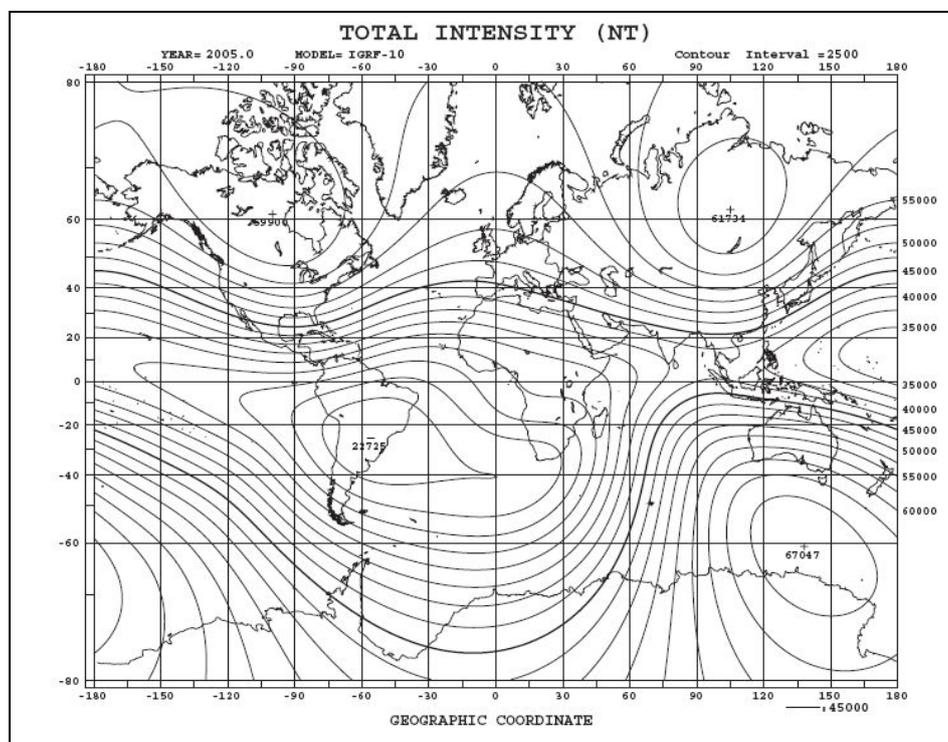


Figura 2.7 – Localização dos polos geográficos, geomagnéticos e magnéticos; do equador geográfico, geomagnético e equador magnético.

Fonte: Figura modificada de Hartann 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.

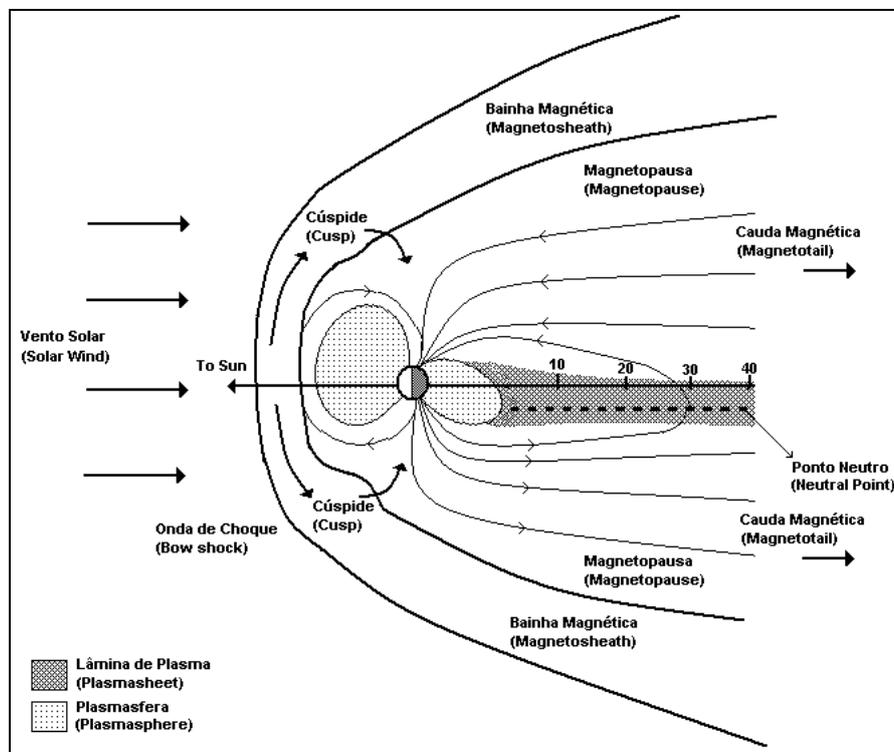


Figura 2.9 – Composição da Magnetosfera.

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.

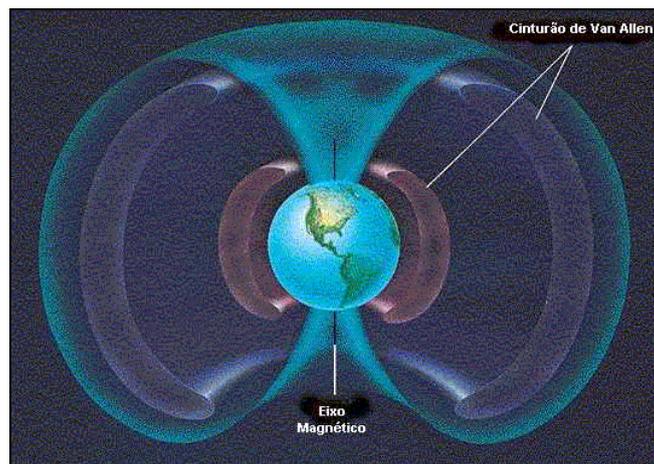


Figura 2.10 - Cinturão de Radiação de Van Allen.

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

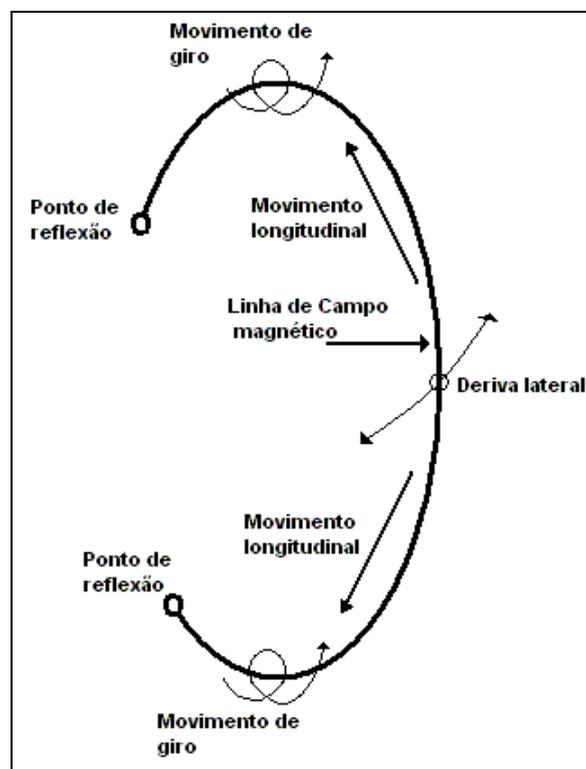


Figura 2.11 - Movimentos de carga elétrica na presença do Campo Magnético.

### **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  $S_q$  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 pulsações regulares ou contínuas e pulsações irregulares designadas por Pc e Pi, respectivamente.

As Pc são pulsações 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.

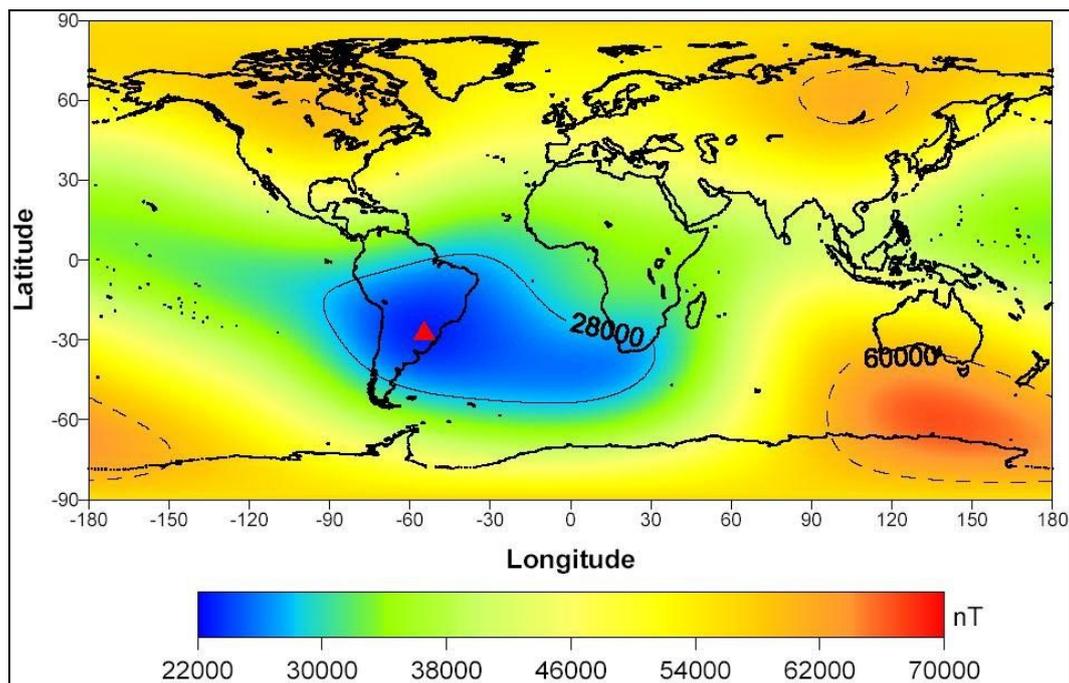
**Tabela 2 - Classificação Genética.**

<b>Banda</b>	<b>Contínuas</b>	<b>Impulsivas</b>
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 tranferencia 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

#### 3.1. Magnetômetros utilizados nas medidas do Campo Geomagnético

Como vimos no Capítulo 2 há vários instrumentos magnetômetros, cada um com suas peculiaridades, para medidas de campos magnéticos. Estes equipamentos têm aplicações em diversas áreas, como no caso do geomagnetismo há uma distinção básica entre os magnetômetros, que está entre os equipamentos que efetuam medidas absolutas (magnetômetros) e os que efetuam medidas de variações do campo geomagnético (variômetros). Na prática os fabricantes não fazem esta distinção e normalmente chamam a todos de magnetômetros, mesmo aqueles que efetuam a função de variômetros [Jacobs, 1987].

Como discutido, os magnetômetros são classificados como vetoriais e escalares. Porém, outras diferenças podem ser utilizadas para classificação que é aquela que leva em conta os princípios físicos envolvidos na medida. Os sensores magnéticos, utilizados na medida do campo geomagnético, podem ser classificados em 5 grupos. A tabela 3 apresenta esta classificação.

**Tabela 3 - Classes de magnetômetros segundo seus princípios físicos.**

CLASSE	TIPO	SENSIBILIDADE
Torção	Magnetômetros/Variômetros	0,01 – 1 nT
Ressonância magnética nuclear	Magnetômetros/Variômetros	0,2 – 1 nT
Fluxgates	Variômetros	0,01 – 0,4 nT
Indução	Magnetômetros/Variômetros	$10^{-5}$ – $10^{-3}$ nT
Supercondutores	Variômetros	$10^{-5}$ – $10^{-3}$ nT

Fonte: Jacobs, 1987, p. 66 – 67.

Os sensores foram sendo desenvolvidos de maneira a se adequar às necessidades de medidas nas diferentes faixas do espectro geomagnético. Para a captação das variações do campo geomagnético na faixa das pulsações geomagnéticas, deve-se utilizar magnetômetros (bobinas) de indução, que utilizam o princípio físico da

indução eletromagnética para detecção das variações do campo geomagnético [Barbosa, 2003].

### 3.2. Magnetômetro de fluxo saturado (*Fluxgate Magnetometer*)

Os Magnetômetros do tipo fluxgate medem a magnitude e direção de Campos Magnéticos. São equipamentos que 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*  $B \times H^1$  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.

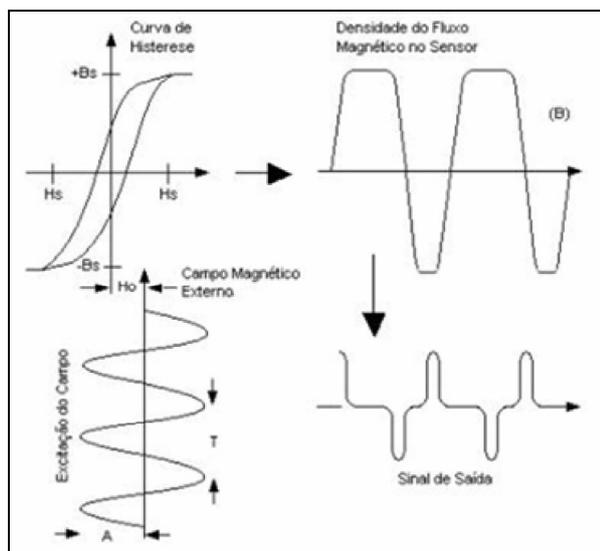


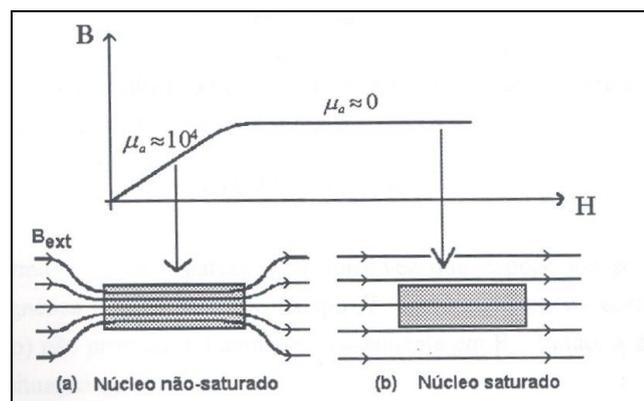
Figura 3.2 – Forma de detecção do Campo Magnético.  
Fonte: Kabata, W.; Magnetômetros Fluxgate para Satélites Científicos

<sup>1</sup> Na seção 3.2.1 será discutido o processo de magnetização de um material magnético e a sua curva de *histerese*  $B \times H$ .

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 deixara de se concentrar dentro da espira e o fluxo total diminuirá, conforme mostra a figura 3.3. Nesse instante, a variação do fluxo magnético induz uma força eletromotriz na bobina e uma conseqüente tensão induzida nos seus terminais, variação esta que é proporcional ao campo externo.



**Figura 3.3 – Saturação do núcleo.**

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

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

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

### 3.2.1. Magnetização de materiais ferromagnéticos e suas curvas de Histerese

No interior da matéria, ocorrem as chamadas correntes microscópicas, formadas pelos movimentos das cargas eletrônicas nos átomos, que se comportam como pequenos dipolos magnéticos. Quando um campo magnético externo age sobre uma porção de matéria, este exerce forças sobre os dipolos, alinhando-os frente ao campo aplicado, produzindo um campo induzido chamado de *Magnetização*, que se superporá ao primeiro. Desta maneira, podemos expressar o campo resultante como

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde  $\mathbf{H}$  é o campo magnético externo,  $\mathbf{M}$  é a magnetização induzida no material e  $\mu_0$  é a constante chamada de permeabilidade magnética do material, e representa fisicamente a permeabilidade com que o material tem à passagem do fluxo magnético.

O campo magnético gerado por um pequeno dipolo, a grandes distâncias, pode ser totalmente descrito através de seu momento de dipolo que é definido como o produto da intensidade de um de seus pólos pela distância que os separa,  $m = pl$ . A magnetização de um material pode ser definida macroscopicamente como a soma vetorial de todos os momentos de dipolos num pequeno elemento de volume dividido por  $\Delta V$ , no limite em que  $\Delta V$  seja muito pequeno macroscopicamente, mas ainda contenha um número estatisticamente muito grande de dipolos. Assim, temos que

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i \mathbf{m}_i \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Se os momentos de dipolos  $M$  estão distribuídos aleatoriamente no material, todos com sentidos diferentes, a magnetização será zero e o material estará no estado desmagnetizado, na presença de um campo magnético externo  $H$ , haverá um alinhamento dos dipolos em relação ao sentido do campo aplicado. Quando todos os dipolos ficarem alinhados, todos com o mesmo sentido, a magnetização atinge um valor de saturação, mesmo se continuarmos aumentando o campo externo  $H$ .

A magnetização de saturação depende da natureza do material e pode ser interpretada como a densidade volumétrica de dipolos que o material contém, na região em que está sendo calculada. A dependência entre  $M$  e  $H$  é da forma

$$M = \chi H \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde  $\chi$  é a constante chamada de susceptibilidade magnética, que representa em termos físicos o quanto que o material é susceptível de ser magnetizado. Fazendo a substituição da Eq. 3.2 na Eq. 3.1 teremos a seguinte relação

$$B = \mu_0(H + \chi H)$$

ou

$$B = \mu_0 H(1 + \chi) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Assim, conforme o material magnético e suas propriedades (permeabilidade e susceptibilidade) podemos classificá-los como *Diamagnéticos*, *Paramagnéticos* e *Ferromagnéticos*.

Os materiais *Ferromagnéticos* são materiais que apresentam magnetização espontânea mesmo na ausência de campo aplicado e na presença deste assume grande magnetização na mesma direção do campo. Esta magnetização espontânea varia com a temperatura. Atingindo um máximo a  $T = 0$  K e cai a zero a uma temperatura  $T_c$ , temperatura denominada *Curie*<sup>2</sup>.

Para este tipo de material o efeito resultante dos momentos magnéticos do material é muito maior que nos casos de paramagnetismo ou diamagnetismo. Isto é devido à proximidade dos dipolos no material que provoca um melhor acoplamento entre mesmos. Visto ao microscópio, os materiais ferromagnéticos são divididos em inúmeras regiões magnéticas chamadas de domínios magnéticos. Cada domínio está magneticamente saturado, isto é, os dipolos que se encontram dentro do domínio tem mesmo sentido (Figura 3.4).

---

<sup>2</sup> Acima da temperatura de *Curie* ( $T_c$ ) o material é paramagnético e abaixo de ( $T_c$ ) é ferromagnético.  $T_c$  depende do tipo de material.

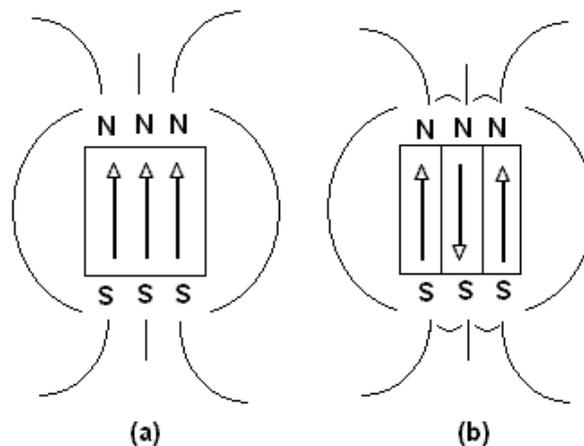


Figura 3.4 – (a) corpo magnetizado com um único domínio; (b) corpo magnetizado com estrutura multi-domínios.

Num corpo ferromagnético desmagnetizado todos os domínios estão orientados aleatoriamente (Figura 3.5 - a) de maneira a resultar uma magnetização nula do material (do corpo ferromagnético).

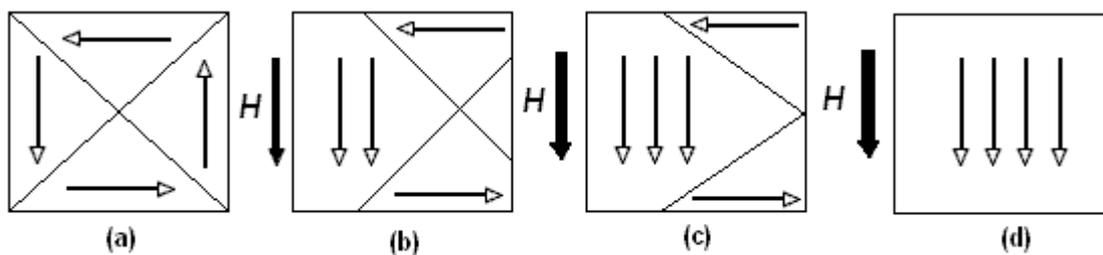


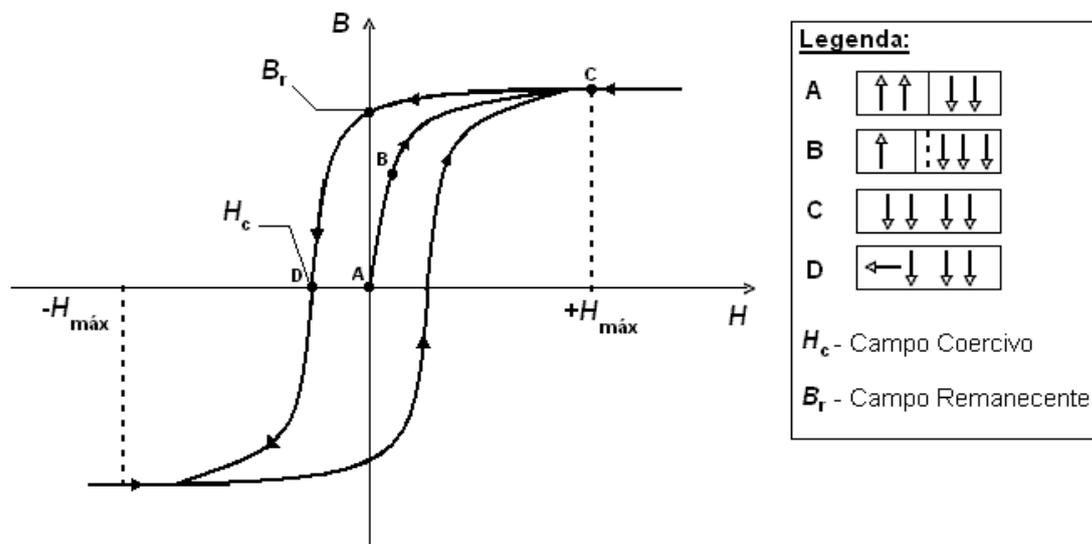
Figura 3.5 – Movimento das paredes dos domínios de uma amostra ferromagnética sujeita a um campo crescente  $H$ . (a) material ferromagnético desmagnetizado; (d) material ferromagnético saturado.

Cada domínio está limitado por paredes (ou paredes *Bloch*, Figura 3.6), que são regiões onde, o vetor momento magnético muda o sentido, quando um corpo ferromagnético está sujeito a um campo magnético, os domínios que não tem a mesma orientação do campo aplicado irão tender a se alinharem com este. Portanto, o alinhamento dos dipolos que e estão em direções diferentes do campo aplicado resulta num movimento das paredes dos domínios, fazendo com que estes diminuam seus volumes em favor daqueles que estão na mesma orientação do campo aplicado (Figura 3.5 – b e c), até encontrarem uma nova condição de equilíbrio estável em que o movimento então cessa. Quando o material ferromagnético atinge a saturação, todos os domínios têm a mesma orientação que a do campo aplicado.



O fato de a curva tender para a horizontal nas vizinhanças do ponto *C* indica que a magnetização *M* aproxima-se do seu valor de saturação  $M_s$ , quando todos os dipolos estão todos alinhados. E quando, a partir da saturação, diminuimos de intensidade de *H* até inverter a seu sentido, observa-se que a volta da curva não coincide com a ida, ou seja, a magnetização não segue um mesmo percurso na “ida” e na “volta”. A origem deste fenômeno está na perda de energia do sistema, devido aos deslocamentos irreversíveis das paredes dos domínios que dissipam, em forma de calor, parte da energia magnética.

Quando *H* é nulo, o valor do campo magnético efetivo é chamado de **campo residual ou remanência  $B_r$** , (Figura 3.7). A remanência representa o valor da indução magnética remanente, quando  $H = 0$ , e depende da história magnética do material. A medida que a intensidade do campo *H* vai aumentando no sentido oposto do inicial, o campo magnético resultante *B* diminui gradualmente até zero. O valor de *H* necessário para reduzir *B* a zero é chamada de **força coerciva ou campo coercivo  $H_c$**  (Figura 3.6), isto é, o campo coercivo é o campo externo necessário para inverter o sentido da magnetização.



**Figura 3.7 – Diagrama da curva de histerese  $B \times H$  para um determinado material ferromagnético. Os pontos A, B, C e D representam como seriam os movimentos dos dipolos magnéticos quando ocorrem o processo de magnetização e de histerese do material ferromagnético.**

A magnetização de uma amostra ferromagnética não se comporta, em geral, de forma linear com relação ao campo magnético externo. Assim, dependendo do campo magnético externo e da história pregresso da amostra, isto é, do modo pelo qual ela foi preparada.

Os materiais ferromagnéticos se dividem em dois tipos – materiais “duros” e “moles”. No caso dos materiais ferromagnéticos moles a magnetização se comporta de forma aproximadamente linear com o campo magnético externo para campos fracos ou moderados, e quando o campo externo é desligado, a magnetização também se anula. Esses materiais não retêm uma magnetização residual, isto é, não sofrem o processo de histerese. O diagrama de um material ferromagnético mole é apresentado na figura 3.8.

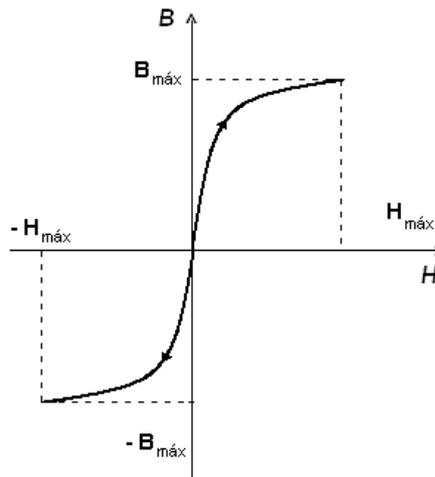


Figura 3.8 – Diagrama da magnetização de um material ferromagnético “mole”.

Os materiais ferromagnéticos duros retêm uma magnetização residual mesmo quando o campo externo é nulo, eles apresentam um comportamento não linear característico, como podemos ver na figura 3.9, que apresenta a histerese de um material ferromagnético duro, como uma amostra de aço, por exemplo.

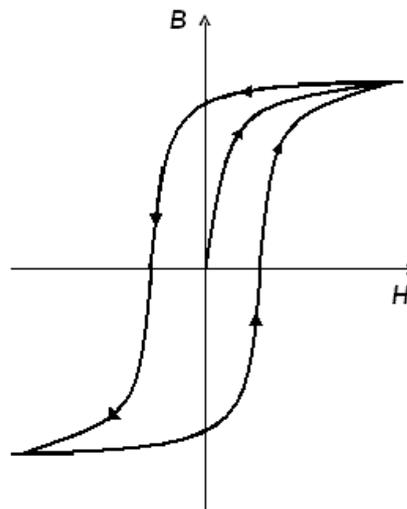


Figura 3.9 - Diagrama da magnetização de um material ferromagnético “duro”.

### 3.2.2. 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.

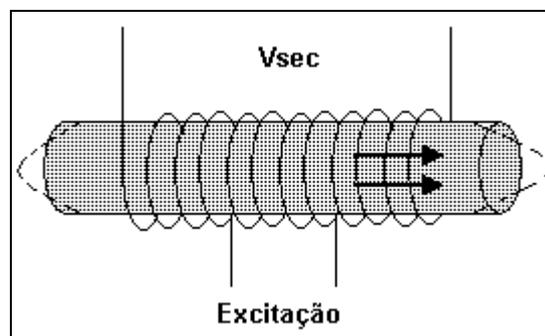


Figura 3.4 – Núcleo linear.

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:

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

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  $H_{ext}$ .

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

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

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

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.

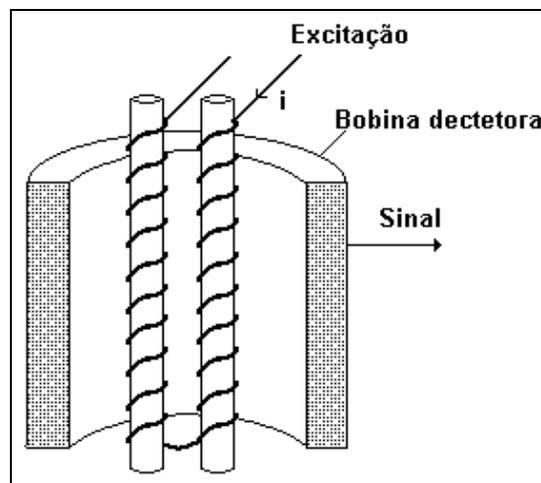


Figura 3.5 – Dois núcleos em barra.

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 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”.

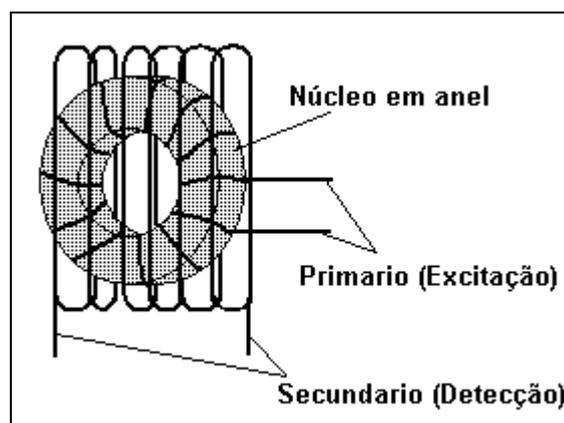


Figura 3.6 – Núcleo em anel.

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;

### ***3.3. 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.

#### **3.3.1. 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.

### **3.3.2. 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.

### **3.3.3. 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.

### **3.3.4. Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado**

São muitas as discussões e dúvidas 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. 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.

### **3.3.5. 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 para o Projeto foi um magnetômetro fluxgate de três eixos com núcleo magnético em anel. O sensor em si é formado pelo núcleo toroidal e por duas bobinas, uma de excitação e outra de detecção do campo magnético externo, que neste caso é o campo geomagnético. Cada sensor é ortogonal entre si, formando um eixo coordenado que é ajustado as componentes **H**, **D** e **Z** do Campo Geomagnético, como é apresentado na Figura 4.1.

O núcleo é enrolado pela bobina de excitação ao longo de toda sua circunferência, cobrindo toda área superficial possível formando um toroide (Figura 4.1). Ao redor do toroide, fica a bobina de detecção que é enrolada num suporte não magnético (Figura 4.2-a). Esta é responsável por captar a variação de fluxo magnético externo gerado através da variação da permeabilidade do núcleo do sensor, conforme discutido na seção 3.2.2.

As bobinas excitação estão ligadas em série entre si para que desta forma possamos obter a mesma corrente de excitação para as três bobinas. A figura 4.3-a apresenta um dos sensores, utilizados para estudo, separadamente com as bobinas

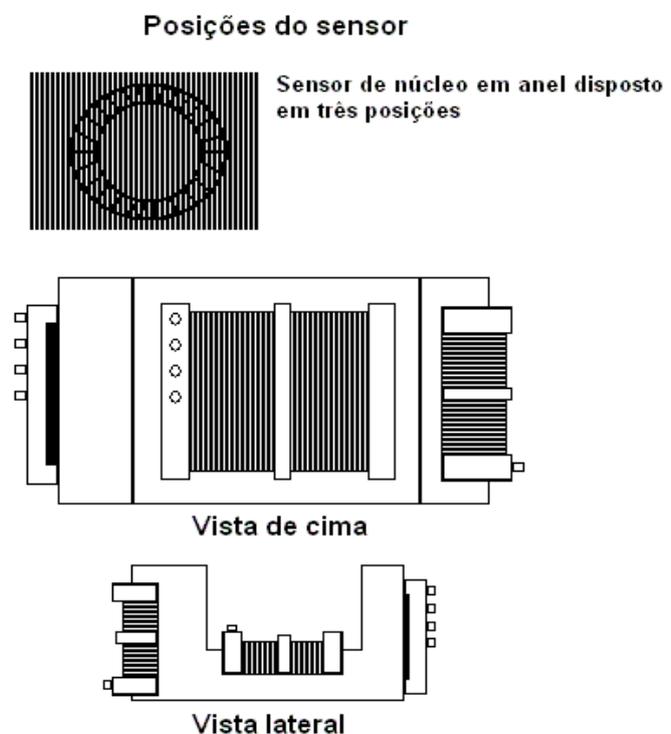
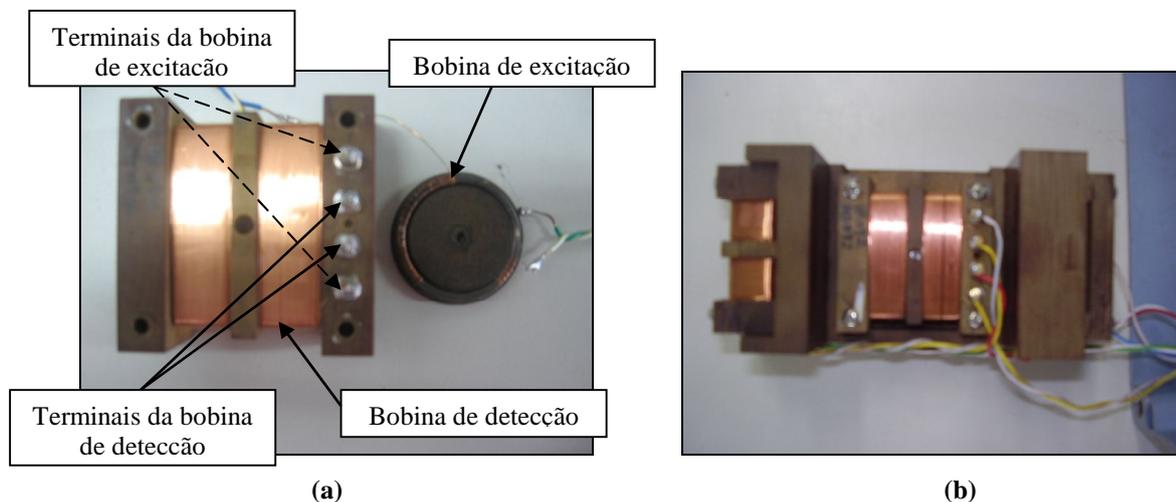


Figura 4.1 - Desenho esquemático dos três sensores do magnetômetro fluxgate. Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

excitação e detecção e com seus respectivos terminais. Na Figura 4.3-b podemos ver os três sensores montado em um suporte não magnético e o um único sensor fora do arranjo.



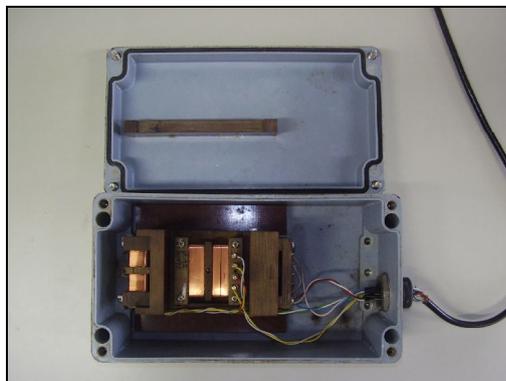
**Figura 4.2** – (a) mostra um dos sensores completo separado do conjunto com a vista frontal da bobina de excitação e da bobina de detecção montados sobre o material não magnético. (b) mostra o conjunto dos três sensores montados ortogonais entre si para cada componente do campo geomagnético. Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

O núcleo ferromagnético utilizado neste magnetômetro é feito de uma liga metálica de Permalloy com alta permeabilidade magnética. Sua geometria toroidal garante que o caminho magnético percorrido pelo campo de excitação seja fechado, abrandando assim os efeitos de desmagnetização do núcleo e tornando a saturação do material mais fácil de ser alcançada. Outra vantagem do núcleo em anel é que o ruído é reduzido, pois não existem os efeitos de bordas, regiões que geralmente servem como “antenas” para ruídos externos. A Figura 4.3 apresenta um dos núcleos, com a bobina excitação, utilizado para estes estudos.



**Figura 4.3** – Núcleo ferromagnético toroidal

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 4.4 – a,b).



**Figura 4.4a – Magnetômetro Fluxgate.**



**Figura 4.4b – Magnetômetro Fluxgate.**

## **4.2 – Circuito Eletrônico**

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

Utilizando um sinal de frequência  $f$  na saturação do núcleo, dois pulsos são gerados a cada ciclo de excitação em que o núcleo passa do estado de não-saturado a

saturado. Portanto o sinal detectado no secundário será um sinal  $2f$ , com frequência dobrada em relação ao sinal de excitação  $f$ .

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

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

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

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

#### **4.2.1 – Circuito e Sinal de Excitação**

O circuito de excitação consiste basicamente em um cristal oscilador e um circuito integrado divisor de frequência, que no Projeto optou-se pelo CI 4060. O cristal fornece para o integrado certa frequência de oscilação para que seja gerado o sinal de excitação. Para este tipo de sensor com núcleo em anel, foi utilizado cristais com frequências entre 5,0KHz a 9,0KHz. Sendo que os cristais que apresentaram melhor sinal de excitação foram os cristais de 6,0KHz e 7,2KHz.

O esquema de montagem dos componentes para o circuito de excitação é mostrado na figura 4.6 abaixo. Onde EX é à saída do sinal da excitação para cada eixo dos sensores ligados em série do magnetômetro.

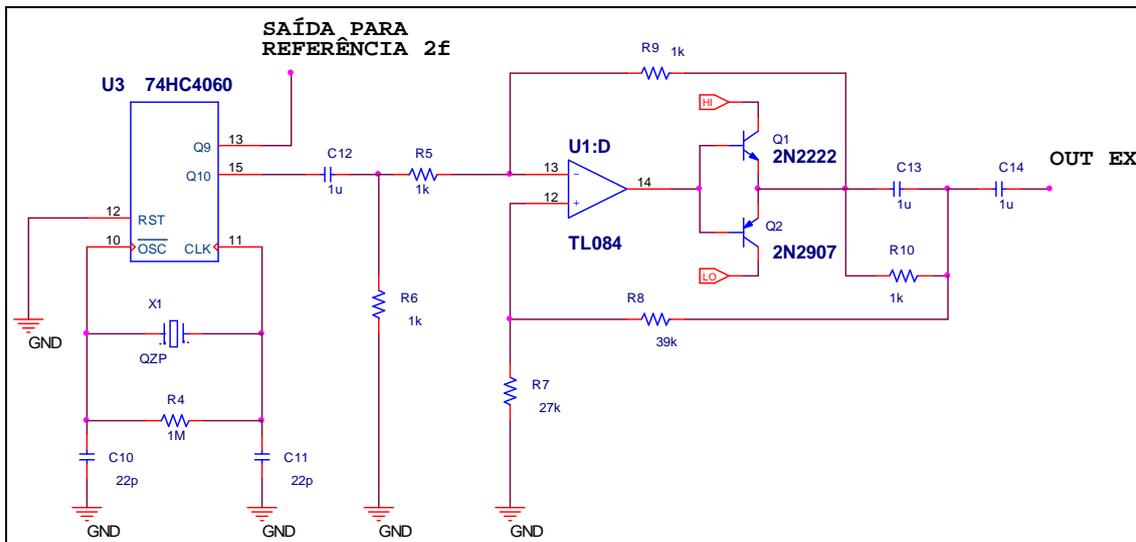


Figura 4.5 – Circuito de excitação.

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

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 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.

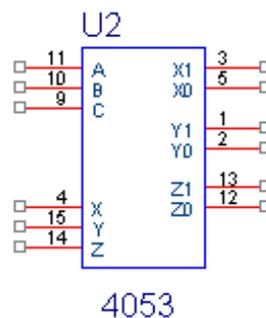
#### 4.2.2 – Comparação dos Sinais

Nesta etapa, no circuito, finalmente é 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 4.6 – Circuito integrado multiplexador.**

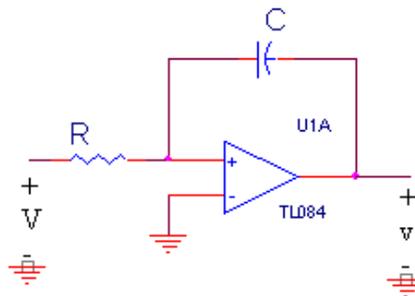
Nos pinos 11, 10 e 9 é inserido o sinal  $2f$  de referência. Os pinos 4, 15 e 14 são a entrada dos sinais vindo da bobina detectora. Os pares 3,5; 1,2 e 13,12 são os pares de saída.

#### **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 4.7 – Circuito Integrador.**

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

## CAPÍTULO 5

### 5.1. Método e Resultado da análise das curvas de histerese

#### 5.1.1 Método

Para a determinação das curvas de histerese foi utilizado o método do anel de Rowland modificado. A Figura 5.1 apresenta o esquema de montagem do circuito de testes de magnetização do núcleo. Este método consiste em aplicar um campo  $H$  alternado senoidal no núcleo do sensor através de um enrolamento  $N_1$ , que magnetiza periodicamente o material. O sinal induzido no enrolamento  $N_2$ , resultante da variação de fluxo sobre o mesmo, é integrado eletronicamente, gerando um sinal proporcional ao campo  $B$  resultante da soma do campo aplicado  $H$  e da magnetização  $M$  segundo a eq. (3.1) e através da Lei de Faraday.

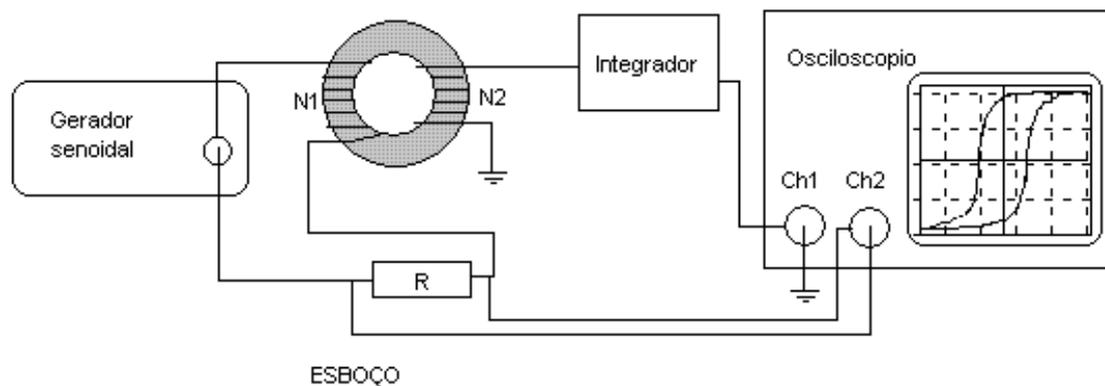


Figura 5.1 – Esquema de montagem e circuito para obtenção de curvas histerese.

O resistor  $R$  tem baixo valor de resistência e é utilizado em série com o enrolamento  $N_1$  para que seja feita a medida indireta da corrente que satura o núcleo. Sabendo-se que o resistor é um elemento linear, pela Lei de Ohm temos que,

$$V = R \cdot I \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$I = \frac{V}{R}, \quad (\text{Eq. 5.2})$$

portanto, é possível obter-se a forma da corrente que passa através do enrolamento  $N_1$ , medindo-se a tensão sobre o resistor  $R$ . A medição indireta da corrente sobre o resistor  $R$  resulta em um sinal diretamente proporcional ao campo  $H$  aplicado, já que a corrente sobre o resistor está em fase com o campo gerado pela bobina  $N_1$ . Um integrador de

Miller, Figura 5.2, com resistência variável foi utilizado para gerar a integral do sinal induzido no enrolamento  $N_2$ .

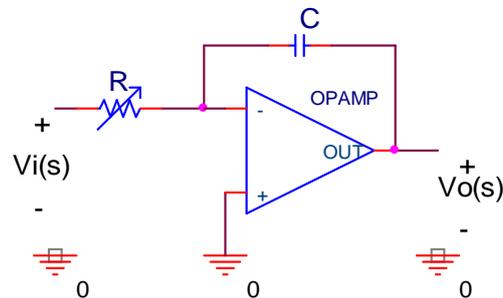


Figura 5.2 – Integrador de miller.

O ganho negativo do integrador em função da frequência  $s$  é dado pela equação [20]:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$G(s) = -\frac{1}{RCs} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Nesta montagem do circuito integrador, foi utilizado um resistor variável de forma que fosse possível ajustar o ganho do integrador para que o mesmo se aproximasse de  $G(s)=1$  para cada frequência de excitação testada. Dessa maneira os valores medidos não estão sendo amplificados nem atenuados pelo integrador. Por fim, ambas as medições, na saída do integrador e da diferença de potencial sobre o resistor, são conectados à dois canais de um osciloscópio digital (Figura 5.3). Assim, foi possível visualizar as curvas de histerese das amostras em tempo real diretamente sobre a tela do equipamento. Através do software Wintek32 2.0 foi possível fazer a aquisição das curvas de histerese obtidas no osciloscópio.



Figura 5.3

No canal 1 do osciloscópio é medida a tensão  $v_p$  sobre o resistor, que indiretamente nos dá o comportamento do campo magnético  $H$ . O canal 2 por sua vez mede a tensão  $v_s$  de saída do integrador. O osciloscópio foi então configurado para obtermos uma visualização de forma que o eixo horizontal represente o canal 1 e mostre as informações do campo  $H$ . De maneira análoga o eixo vertical mostra as informações do canal 2 do osciloscópio, que corresponde a indução magnética  $B$ .

O eixo horizontal e vertical foi calibrado segundo as equações abaixo,

$$H = \frac{N}{L} \frac{v_p}{10,2} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$B = \frac{1}{G} \frac{RC}{NA} v_s, \quad (\text{Eq. 5.2})$$

onde  $N$  representa o número de espiras da bobina de excitação e o  $A$  representa a área da espira onde passa o fluxo magnético.

### 5.1.2. Resultado da análise das curvas de histerese

O teste realizado com o núcleo do sensor do magnetômetro teve como finalidade a compreensão do fenômeno do ciclo de histerese, que ocorre em materiais ferromagnéticos discutido na seção 3.2.1, com relação às diferentes faixas de frequência de saturação do núcleo ferromagnético. Através da análise qualitativa dos resultados obtidos no teste, buscamos a melhor relação entre frequência e a curva de histerese  $B \times H$ . Para isto, determinamos cinco faixas de frequências de saturação com os seguintes valores 4 kHz, 6 kHz, 8 kHz, 12 kHz e 15 kHz. Estes valores foram escolhidos segundo os estudos realizados em outras literaturas com relação à frequência de saturação para esse tipo de sensor (*fluxgate* com núcleo toroidal).

Assim, a nossa análise está baseada nas características magnéticas que podemos obter da curva de histerese. Estas características são a área da curva de histerese que pode nos informar a energia dissipada durante o ciclo e também em fatores que podemos observar diretamente e que são importantes para o material, tais como: o campo coercivo ( $H_c$ ) e a magnetização remanente ( $Br$ ).

Nos gráficos a seguir, mostraremos as curvas de histerese para as respectivas faixas de frequências já mencionadas. Para cada caso faremos os cálculos de valores aproximados do campo externo  $H$  pela equação 5.1. Também procuramos obter valores aproximados do campo magnético remanente ( $B_r$ ) e do campo coercivo ( $H_c$ ) através das equações 5.1 e 5.2. Com relação à área da curva de histerese, não será possível obter valores numéricos, pois o método que foi utilizado não nos permite obter tais informações. Para isto seriam necessários outros métodos de análise mais precisos da curva de histerese para os materiais ferromagnéticos. Assim, a análise da área da curva de histerese será feita pela leitura dos gráficos, juntamente com os cálculos de  $H$ ,  $H_c$  e  $B_r$ .

### Primeiro caso

Para frequência: 4 kHz

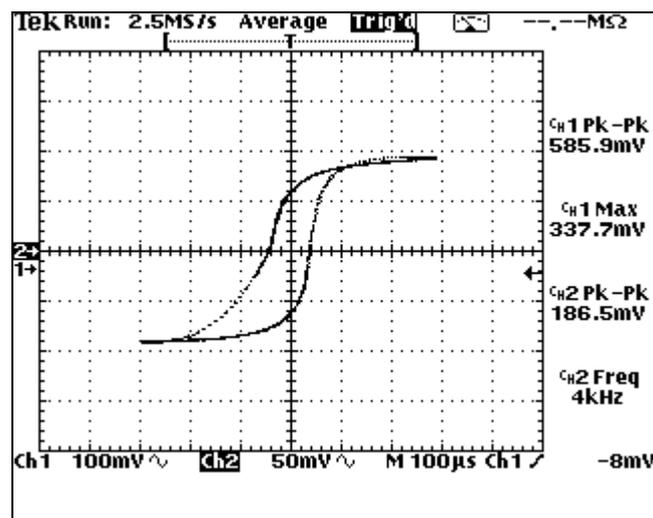


Figura 5.4 - Curva de histerese para frequência de 4kHz para uma corrente 21,84 mA rms.

Campo externo  $H$ :

$$H = 0,085 \text{ A/m}$$

Campo coercivo  $H_c$ :

$$H_c = 0,013 \text{ A/m}$$

Campo remanescente  $B_r$ :

$$B_r = 9,307 \text{ mT}$$

### Segundo caso

Para frequência: 6 kHz

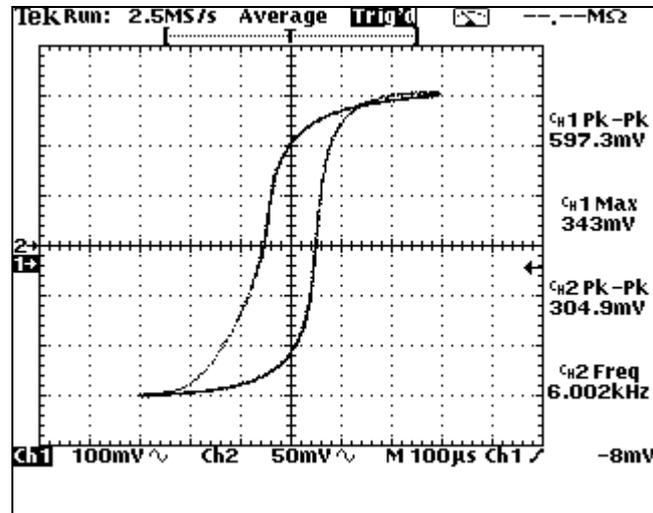


Figura 5.5 - Curva de histerese para frequência de 6 kHz para uma corrente 20,77 mA rms.

Campo externo  $H$ :

$$H = 0,0864 \text{ A/m}$$

Campo coercivo  $H_c$ :

$$H_c = 0,015 \text{ A/m}$$

Campo remanescente  $B_r$ :

$$B_r = 9,489 \text{ mT}$$

### Terceiro caso

Para frequência: 8 kHz

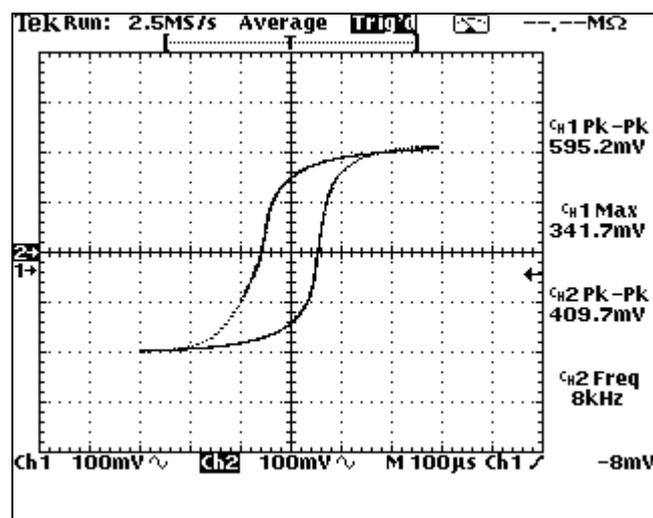


Figura 5.6 - Curva de histerese para frequência de 8kHz para uma corrente 19,51 mA rms.

Campo externo  $H$ :

$$H = 0,0861 \text{ A/m}$$

Campo coercivo  $H_c$ :

$$H_c = 0,0168 \text{ A/m}$$

Campo remanescente  $B_r$ :

$$B_r = 9,991 \text{ mT}$$

### Quarto caso

Para frequência: 12 kHz

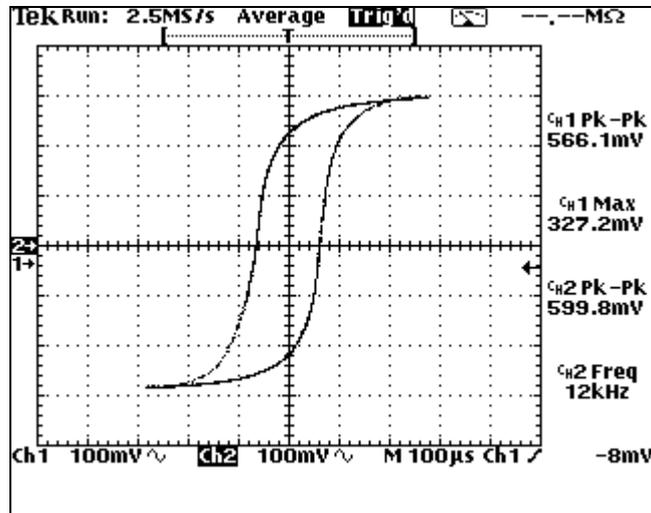


Figura 1.7 - Curva de histerese para frequência de 12kHz para uma corrente 16,5 mA rms.

Campo externo  $H$ :

$$H = 0,0825 \text{ A/m}$$

Campo coercivo  $H_c$ :

$$H_c = 0,0184 \text{ A/m}$$

Campo remanescente  $B_r$ :

$$B_r = 9,809 \text{ mT}$$

### Quinto caso

Para frequência: 15 kHz

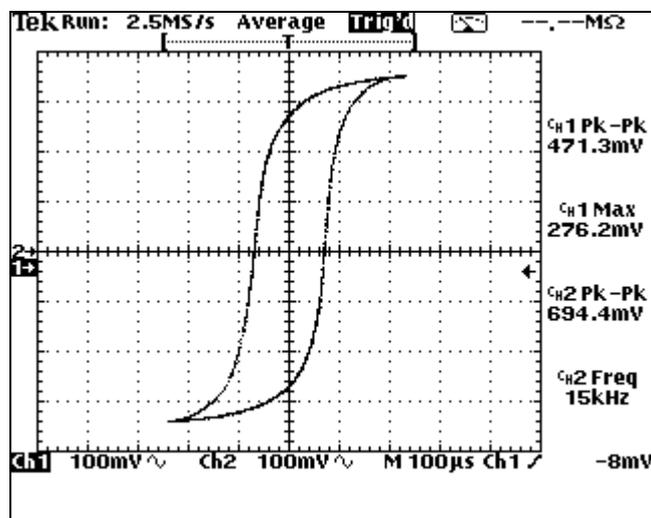


Figura 5.8 - Curva de histerese para frequência de 15kHz para uma corrente 13,82 mA rms.

Campo externo  $H$ :

$$H = 0,0696 \text{ A/m}$$

Campo coercivo  $H_c$ :

$$H_c = 0,0206 \text{ A/m}$$

Campo remanescente  $B_r$ :

$$B_r = 0,0108 \text{ T}$$

Pode-se observar que conforme aumentamos os valores das frequências a curva de histerese varia. Esta variação podemos perceber pelos cálculos  $B_r$  e  $H_c$  e fazendo a

comparação entre os gráficos com relação ao tamanho das curvas de histerese. Para os gráficos entre 4 kHz à 8kHz nota-se uma não simetria das curvas de histerese. Isto pode ocorrer devido ao offset. Nas curvas de histerese para frequência de 12kHz e 15kHz a curva torna-se simétrica e não havendo alguma distorção no sinal. Porém, verificamos que para a frequência de 12kHz o valor de  $B_r$  é menor do que para o campo remanescente para frequência 8kHz. E isso nos indica que aproximadamente para frequência de 12kHz a área da curva de histerese é menor e conseqüentemente a dissipação de energia para movimentação dos dipolos é menor e o campo coercivo  $H_c$  sendo maior do que para os valores abaixo de 12kHz. Para frequência de 15kHz notamos que o campo  $B_r$  e  $H_c$  são maiores e a área da curva de histerese maior do que para as outras faixas de frequência e conseqüentemente tendo maior dissipação de energia na magnetização dos dipolos magnético. Assim, obtivemos uma boa relação com a curva de histerese para frequência de 12kHz.

## CAPÍTULO 6

### **6.1. Conclusão**

As conclusões obtidas com nossos estudos com a magnetização e o fenômeno de histerese em materiais ferromagnético nos trouxeram dois bons resultados: o melhor entendimento do funcionamento de um sensor magnético com relação a variação da permeabilidade e a magnetização do núcleo ferromagnético, proporcionando assim uma melhor compreensão do funcionamento de cada etapa do circuito. E a comprovação da variação da curva de histerese  $B \times H$  em função da frequência. Vimos através das medições que a curva de histerese sofre influência da frequência conforme aumentamos o valor da frequência de saturação. Porém, foi notado nos resultados experimentais algumas distorções nas curvas de histerese, isto é, falta de simetria que não pode ser explicada pela teoria que foi apresentada na seção 3.2.1, necessitando maiores estudos.

Com o desenvolvimento do 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.

### **6.2. Perspectivas do Projeto**

Acabada a etapa de testes com o núcleo do sensor, pretende-se avançar nos estudos da configuração do circuito de excitação, baseados nos testes realizados nesta presente etapa. Obtendo um bom funcionamento de cada etapa 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/INPE – MCT, obtendo dados de períodos magnéticos calmos e perturbadas para comprovar a linearidade, sensibilidade e confiabilidade do novo equipamento desenvolvido no CRS/INPE - MCT.

## REFERÊNCIAS

- [1]. Campbell, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [2]. Kabata, Wanderlí. **Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos**. São José dos Campos, SP – 2000.
- [3]. Amarante, J. A. A. **General Topics on Geomagnetism and Studies of the Occurrence of Micropulsations in São José dos Campos**. Relatório interno do INPE / LAFE – 48, 1966.
- [4]. Barbosa, Maria José Faria. **Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas**. São José dos Campos, SP – 2003.
- [5]. Acuña, M. H. And Pellerin, J. **A Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer**, **IEEE Trans.** On Geosci. Electronics, vol GE-7, p.252-260, 1969.
- [6]. Merrill, R.T. – **The Earth's Magnetic Field, (International geophysics series)**, 1983 Academic Press, London
- [7]. Sociedade Brasileira de Física – **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, Vol. 12 e 13
- [8]. Prindahl, F., **Instrumentos Geomagnéticos, Publicações do Observatório Nacional**, Publicação Especial, N<sup>o</sup> 09, 1986.
- [9]. Felch, E. P. and Potter, J. L., **Preliminary Development of a Magnetometer Current Standart, Tras.** Am. Inst. Elect. Engrs, vol. 66, p.641-651, 1953.
- [10]. Jankowski, J e C. Sucksdorff. **Guide for magnetic measurements and observatory practice**, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder, 1996.
- [11]. Crasto, R.V.Palha. **Magnetômetro de Fluxo saturado (Fluxgate) em arranjo gradiométrico para detecção de dutos e cabos**. Rio de Janeiro, RJ – 2003.
- [12]. KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.
- [13]. AKASOFU, S. e CHAPMAN, S. **Solar-Terrestrial Physics**, 889p., Oxford at the Claredon Press, Oxford, 1972.
- [14]. PINTO, Jr. O. e GONZALEZ, W. D. **Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 51, n<sup>o</sup> 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]. Zananndrea, A. **Estudo das Micropulsações Geomagnéticas em Latitudes Muito Baixas, no Brasil**. INPE, São José dos Campos, 1999.
- [17]. Zananndrea, 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.
- [19] CORRÊA, M. A.; **Magnetoimpedância e dinâmica da Magnetização em nanoestruturas Ferromagneto / cu (ag) / Ferromagneto**. Tese de Doutorado – UFSM.
- [20] – FILHO, S. N.; **Filtros seletores de sinais**; Editora da UFSC, Florianópolis, 1998.

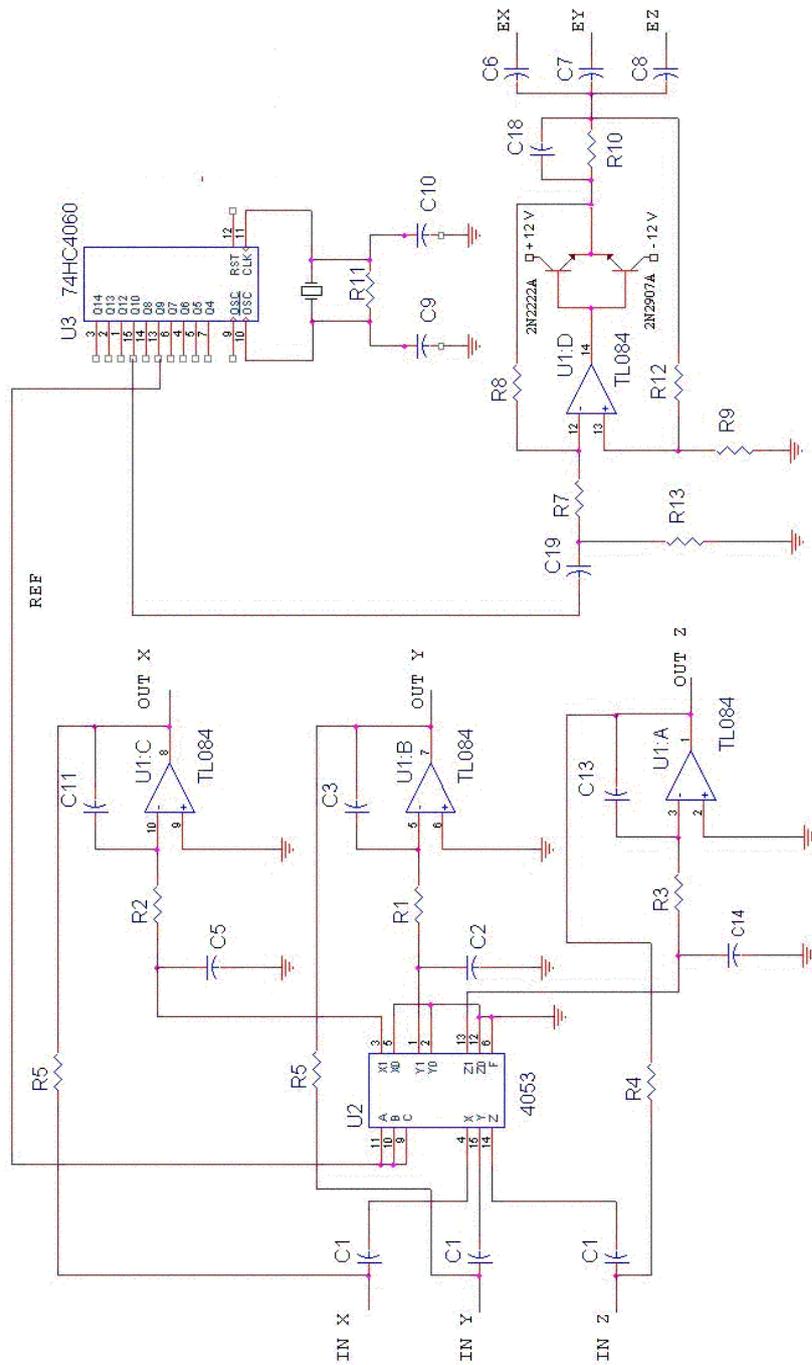


## ANEXOS



## **ANEXO A**

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





## **ANEXO B**

**Títulos e resumos de trabalhos apresentados e ou submetidos.**

**No período o bolsista publicou 5 trabalhos, sendo 2 como primeiro autor e foi co-autor de 3 trabalhos científicos que foram apresentados em congressos de Iniciação Científica:**

1. ANTUNES, C. E. ; SCHUCH, N. J. ; SIQUEIRA, J. ; SANTOS, L. S. ; TRIVEDI, N. B. .  
Three axis fluxgate magnetometer with ring core development for studies and monitoring the South Atlantic Magnetic Anomaly - SAMA. In: 37th COSPAR Scientific Assembly, 2008, Montreal. 37th COSPAR Scientific Assembly Abstracts, 2008.
2. SIQUEIRA, J. ; SCHUCH, N. J. ; ANTUNES, C. E. ; SANTOS, L. S. ; TRIVEDI, N. B. ; DUTRA, S. L. G. . Experimental studies with a fluxgate magnetometer of toroidal core at south of Brazil. In: 37th COSPAR Scientific Assembly, 2008, Montreal. 37th COSPAR Scientific Assembly Abstracts, 2008.
3. SIQUEIRA, J. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. .  
DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO ABORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO. In: XXIII Jornada Acadêmica Integrada da UFSM, 2008, Santa Maria. Anais XXIII JAI, 2008.
4. FERNANDO, ; LOPES, R. V. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; ANTUNES, C. E. ; SIQUEIRA, J. ; SILVA, W. R. . CONCEITOS DE NAVEGAÇÃO DE BORDO DE CUBESATS ATRAVÉS DE MAGNETÔMETROS. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA, 2008, Campina Grande, PB. Anais SBGEA, 2008.
5. ANTUNES, C. E. ; SCHUCH, N. J. ; SIQUEIRA, J. ; TRIVEDI, N. B. . COMPARATIVE STUDIES BETWEEN LINEAR-CORE FLUXGATE MAGNETOMETER AND RING-CORE FLUXGATE MAGNETOMETER DATA RECORD IN THE SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY REGION. In: 59th International Astronautical Congress, 2008, Glasgow, Escócia. Anais 59th IAC, 2008.
6. SAVIAN, F. S. ; SCHUCH, N. J. ; LOPES, R. V. F. ; TRIVEDI, N. B. ; ANTUNES, C. E. ; **SIQUEIRA, J.** ; RIGON, W. S. . Conceitos de Navegação de Bordo de Cubesats através de Magnetômetros. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, 2008, Campina Grande. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica e Aeronomia, 2008.
7. RIGON, W. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; **SIQUEIRA, J.** ; ANTUNES, C. E. ; SAVIAN, F. S. . Variação com o ciclo solar das pulsações geomagnéticas de períodos longos (1,0 - 10 mHz) na região da anomalia magnética do atlântico sul - AMAS - SICINPE 2008. In: 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008, Santa



Maria. Anais da 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008.

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.

**Jornada academica integrada – JAI, santa maria, 2007.**

**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 em Congressos e Eventos  
no período de desenvolvimento do Projeto**



