



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

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

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

PROCESSO Nº. 115834/2009-5

Fernando de Souza Savian - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Eletrônica
LE/CCR/CRS/INPE-MCT
Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas
LFSMIM/CCR/CRS/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/CCR/INPE – MCT
e-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

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

Santa Maria, 30 de Junho de 2010



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

PROJETO

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

PROCESSO: 115834/2009-5

Relatório elaborado por **FERNANDO DE SOUZA SAVIAN** relatando as
atividades executadas por:

Fernando de Souza Savian - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
e-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

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

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Dr. Nalin Babulal Trivedi – Co-Orientador
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT
e-mail: trivedi@dge.inpe.br



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsista:

Fernando de Souza Savian

Curso de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Processo:

PIBIC/INPE – CNPq/MCT 115834/2009-5

Orientador:

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra

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

Co-Orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch

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

Dr. Nalin B.Trivedi

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

Colaboradores:

Eng. Cassio Espindola Antunes

Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Lic. Josemar de Siqueira

Licenciado em Física pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Willian Rigon Silva

Acadêmico do Curso de Física Bacharelado – UFSM

Andirlei Claudir da Silva

Acadêmico do Curso de Física Licenciatura – UFSM

Tardelli Steckel

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica - UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório de Eletrônica – LE/CRS/CCR/INPE - MCT

Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFS-MIM/CRS/CCR/INPE – MCT.

Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/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: 29/05/2010 18:15

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch
Natanael Rodrigues Gomes

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

Cidade: Santa Maria

Telefone: 33012026

CEP: 97110970

UF: RS

Fax: 33012030

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 - O-ES/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: 46
Ademar Michels	Jean Pierre Raulin
Alan Prestes	Joao Paulo Minussi
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez	Jose Humberto Andrade Sobral
Alisson Dal Lago	Juliano Moro
Antonio Claret Palerosi	Lucas Ramos Vieira
Barclay Robert Clemesha	Mangalathayil Ali Abdu
Caitano Luiz da Silva	Marcelo Barcellos da Rosa
Carlos Roberto Braga	Marco Ivan Rodrigues Sampaio
Cassio Espindola Antunes	Marcos Vinicius Dias Silveira
Clezio Marcos De Nardin	Nalin Babulal Trivedi
Cristiano Max Wrasse	Natanael Rodrigues Gomes
Cristiano Sarzi Machado	Nelson Jorge Schuch
Delano Gobbi	Nivaor Rodolfo Rigozo
Eurico Rodrigues de Paula	Odim Mendes Junior
Ezequiel Echer	Osmar Pinto Junior
Fabiano Luis de Sousa	Otavio Santos Cupertino Durão
Fábio Augusto Vargas dos Santos	Pawel Rozenfeld
Fernanda de São Sabbas Tavares	Petrônio Noronha de Souza
Fernando Luís Guarnieri	Polinaya Muralikrishna
Gelson Lauro Dal' Forno	Rafael Lopes Costa
Hisao Takahashi	Rajaram Purushottam Kane
Ijar Milagre da Fonseca	Severino Luiz Guimaraes Dutra
Jean Carlo Santos	Walter Demetrio Gonzalez Alarcon
Estudantes	Total: 22
Carlos Pinto da Silva Neto	Igor Freitas Fagundes
Cássio Rodinei dos Santos	Lucas Antunes Tambara
Claudio Machado Paulo	Lucas Lopes Costa
Dimas Irion Alves	Lucas Lourencena Caldas Franke
Edson Rodrigo Thomas	Luciano Homercher Dalsasso
Eduardo Escobar Bürger	Nikolas Kemmerich
Eduardo Weide Luiz	Rubens Zolar Gehlen Bohrer
Felipe Cipriani Luzzi	Tardelli Ronan Coelho Stekel
Fernando de Souza Savian	Thalis José Girardi
Guilherme Grams	William do Nascimento Guareschi
Guilherme Simon da Rosa	Willian Rigon Silva
Técnicos	Total: 2
Fernando Sobroza Pedroso - Graduação - \Outra Função	
Henrique Sobroza Pedroso - Graduação - Analista de Sistemas	

Linhas de pesquisa	Total: 4
<ul style="list-style-type: none">• AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA• Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR• MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO• MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL	



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

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	46
Estudante(s)	22
Técnico(s)	2



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](#)
- [Cassio Espindola Antunes](#)
- [Clezio Marcos De Nardin](#)
- [Cristiano Sarzi Machado](#)
- [Ezequiel Echer](#)
- [Fabiano Luis de Sousa](#)
- [Fernando Luís Guarnieri](#)
- [Ijar Milagre da Fonseca](#)
- [Jean Pierre Raulin](#)
- [Jose Humberto Andrade Sobral](#)
- [Lucas Ramos Vieira](#)
- [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](#)





[Rafael Lopes Costa](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Dimas Irion Alves](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Fernando de Souza Savian](#)
[Guilherme Grams](#)
[Guilherme Simon da Rosa](#)
[Igor Freitas Faqundes](#)
[Lucas Antunes Tambara](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)
[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



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](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[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:

[Claudio Machado Paulo](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Edson Rodrigo Thomas](#)
[Fernando de Souza Savian](#)
[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)
[Luciano Homercher Dalsasso](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)
[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.

AGRADECIMENTOS

Sou extremamente grato ao meu Orientador, Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra. Agradeço ao meu Co-orientador Dr. Nelson Jorge Schuch por ter proporcionado ótimas condições para o desenvolvimento e conclusão do Projeto de Pesquisa aqui referido, além de ser de importância fundamental em minha motivação durante o Projeto de Pesquisa, e ao meu Co-orientador, Dr. Nalin Babulal Trivedi, pela grande dedicação e paciência demonstradas durante todo o período do Projeto de Pesquisa.

Da mesma maneira, sou muito grato aos meus colegas de Laboratórios, que jamais mediram esforços para me auxiliar em todos os momentos, demonstrando grande amizade e companheirismo. São eles: Willian Rigon Silva, Andirlei Claudir da Silva e Tardelli Steckel. Não é possível deixar de agradecer a dois grandes amigos, que concluíram seu período de Iniciação Científica e Graduação, e hoje estão em outras etapas de suas vidas: o Engenheiro Eletricista Cássio Espindola Antunes e o Físico Licenciado Josemar de Siqueira. Eles foram de importância fundamental para o andamento desse Projeto de Pesquisa.

Agradeço aos meus pais, José Flores Savian e Fátima Marilusa de Souza Savian, que me apoiaram não apenas no período deste Projeto de Pesquisa, mas desde o início da minha caminhada, me mostrando os caminhos corretos a seguir.

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários do CRS/CCR/INPE – MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que permitiu seguir minha caminhada na Iniciação Científica e Tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e à Sra. Egídia Inácio da Rosa, Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, pelo constante apoio, alertas, e sua incansável preocupação com toda burocracia e datas limites do Programa com os bolsistas de I. C. & T do CRS/CCR/INPE-MCT.

A todos, muito obrigado.



Sumário

RESUMO	2
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	3
1.1. OBJETIVOS PRINCIPAIS	3
1.2. O TEMA	3
1.3. A ORGANIZAÇÃO	4
CAPÍTULO 2. CAMPO GEOMAGNÉTICO	6
2.1. ASPECTOS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO	6
2.2. INTERAÇÕES TERRA-SOL	9
2.3. MAGNETOSFERA TERRESTRE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.0
2.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS)	112
CAPÍTULO 3. MAGNETÔMETROS.....	13
3.1. MAGNETÔMETRO DE FLUXO SATURADO	13
3.1.1. Sensores Fluxgate	15
CAPÍTULO 4. RESULTADOS PRELIMINARES	17
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO E PERFECTIVAS DO PROJETO	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	24
ANEXOS	26
ANEXO A	27



Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.....	6
Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol.	9
Figura 2.3 – Composição da Magnetosfera.	11
Figura 2.4 - Cinturão de Radiação de Van Allen.	11
Figura 2.5 - Mapa magnético da Terra. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul em azul. O triângulo vermelho mostra a localização de seu centro no ano 2000..	Erro!
Indicador não definido.2	
Figura 3.1 – Classificação dos magnetômetros.	13
Figura 3.2 – Saturação do núcleo.	14
Figura 3.3 – Núcleo Linear.....	15
Figura 3.4 – Dois núcleos em barra.	16
Figura 3.5 – Núcleo em anel.....	17
Figura 4.1 – Sensor fluxgate linear.....	17
Figura 4.2 – Circuito magnetômetro fluxgate com sensor linear	18
Figura 4.3 – As três saídas do circuito conectadas respectivamente nos canais 1 (azul), 2 (amarelo) e 3 (verde), além do aterramento (branco).....	19
Figura 4.4 – Gráfico das medidas obtidas para o dia 18/19 de Junho de 2010	20
Figura 4.5 – Tabela relativa ao primeiro minuto de medições do dia 18/19 de Junho de 2010	21
Figura 4.6 – Gráfico medidas obtidas para o dia 20/21 de Junho de 2010.....	21
Figura 4.7 – Tabela relativa ao primeiro minuto de medições do dia 20/21 de Junho de 2010	22

Resumo

O Campo Magnético da Terra tem o seu monitoramento continuamente realizado por instrumentos chamados magnetômetros, seja em estações na superfície terrestre ou no Geoespaço (balões, sondas, satélites e plataformas espaciais como a ISS). Dentre os vários tipos existentes, o Projeto de Pesquisa tem como principal objetivo a análise e o desenvolvimento de magnetômetros de núcleo toroidal, saturado (fluxgate). Seu princípio de funcionamento é baseado na resposta magnética apresentada por materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade, quando submetidos periodicamente a um campo de saturação. O magnetômetro fluxgate é composto por três sensores ortogonais entre si, que em operação são orientados nas direções Norte – Sul, (componente X), Leste – Oeste, (componente Y), e vertical, apontando para o centro da Terra, (componente Z). Quando o eixo Norte – Sul é colocado no meridiano geomagnético durante a instalação e operação local, o que é bastante comum, podem ser determinadas as componentes HDZ. Durante o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa foi montado e analisado o circuito completo de um magnetômetro de núcleo toroidal saturado. O circuito é dividido em três partes. Primeiro faz-se necessário gerar um sinal periódico de frequência f , que possa saturar o núcleo ferromagnético. Na segunda parte do circuito, utiliza-se o circuito integrado 4053 para comparar o sinal de excitação com o sinal detectado. Por fim, a diferença entre cada par de sinais obtido na saída do CI 4053 é integrada pelo circuito integrador. Com o circuito impresso em uma placa, reduzido da melhor maneira possível nas condições técnicas do Laboratório, visando diminuir massa e tamanho, o circuito encontra-se em fase de testes. Testes foram efetuados em bancada de Laboratório no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT. Após a primeira fase de testes e dos devidos ajustes, o circuito e o sensor serão transferidos e testados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE-MCT, (29,4 ° S, 53,8 ° W, 480 m, a.n.m.), que é um local que apresenta níveis muito baixos de interferência eletromagnética. Resultados são apresentados.

Capítulo 1. Introdução

1.1. Objetivos Principais

Através do Programa de Iniciação Científica, Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, foram planejadas e realizadas atividades do Projeto de Pesquisa: “**DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO A BORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO**”. Os objetivos principais do Projeto são: estudar técnicas de medição das variações do Campo Magnético Terrestre para realizar estudos na área da Geofísica Espacial; 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 aluno 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/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, SMS, (29°, 43 S, 53°,82 W), RS, Brasil, no âmbito da Parceria: INPE – UFSM.

1.2. O Tema

A instrumentação de magnetômetros *fluxgate* tem sua implementação baseada nas propriedades magnéticas de certos materiais ferromagnéticos que apresentam uma histerese com ponto de saturação elevado. A alta permeabilidade dos materiais utilizados na confecção dos núcleos é essencial para a detecção do campo magnético que se deseja medir.

Existem diversos modelos de magnetômetros disponíveis atualmente, cada um com suas peculiaridades. Para cada tipo de estudo ou pesquisa que se deseja realizar existem diversas técnicas, geometrias de sensores, diferentes circuitos eletrônicos, etc.

Entre os tipos de aplicações, encontra-se a observação de fenômenos Geomagnéticos e interações da Terra com o Espaço Exterior, mas, além disso, aplicações em outras áreas, como biomedicina, prospecção mineral, operações militares, análise estrutural de materiais, entre outros.

Os magnetômetros *fluxgate* ou de núcleo saturado são conhecidos por serem magnetômetros de baixo ruído, tendo em vista que não apresentarem altos níveis de interferências ou sinais indesejados nas medidas. Os magnetômetros do tipo *fluxgate*, com geometria de núcleo em anel, ou toroidal, podem ser utilizados tanto em bases ou observatórios terrestres quanto em balões, satélites ou veículos espaciais devido a seu bom desempenho e facilidade de operação.

1.3. A Organização

O presente Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica está organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2, O Campo Geomagnético:** A seção se dedica ao estudo teórico do Campo Magnético da Terra, detalhando a sua interação com o vento solar, seus aspectos, a magnetosfera terrestre e as variações geomagnéticas, ainda com um breve estudo sobre as pulsações geomagnéticas.
- **Capítulo 3, Magnetômetros:** O capítulo aborda de uma forma geral os diversos tipos de magnetômetros, entretanto dando ênfase ao magnetômetro de núcleo saturado (*fluxgate*), explicando também sua geometria. Os métodos de detecção e análise do sinal são abordados.
- **Capítulo 4, Resultados Obtidos:** No capítulo 5, são demonstrados os resultados obtidos no período entre Julho de 2009 e Junho de 2010. Está comentado o desenvolvimento do Projeto, assim como resultados das medições feitas até o momento.
- **Capítulo 5, Conclusões e Perspectivas do Projeto:** No último capítulo, conclusões a respeito de todo o Projeto feito durante o ano de Bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica são feitas, além de ser apresentada uma visão geral das pretensões para que os trabalhos futuros sejam realizados com o mesmo sucesso que este foi.
- **Referências Bibliográficas:** Na seção, são citadas as fontes bibliográficas usadas como auxílio durante o Projeto de Pesquisa.

Capítulo 2. O Campo Geomagnético

2.1. Aspectos do Campo Geomagnético

O Campo Geomagnético da Terra, em pontos próximos à superfície, pode ser representado por um dipolo magnético localizado no centro da Terra. De acordo com a Figura 2.1, é possível notar o Campo Geomagnético livre de interações com o espaço exterior como, por exemplo, o Vento Solar.

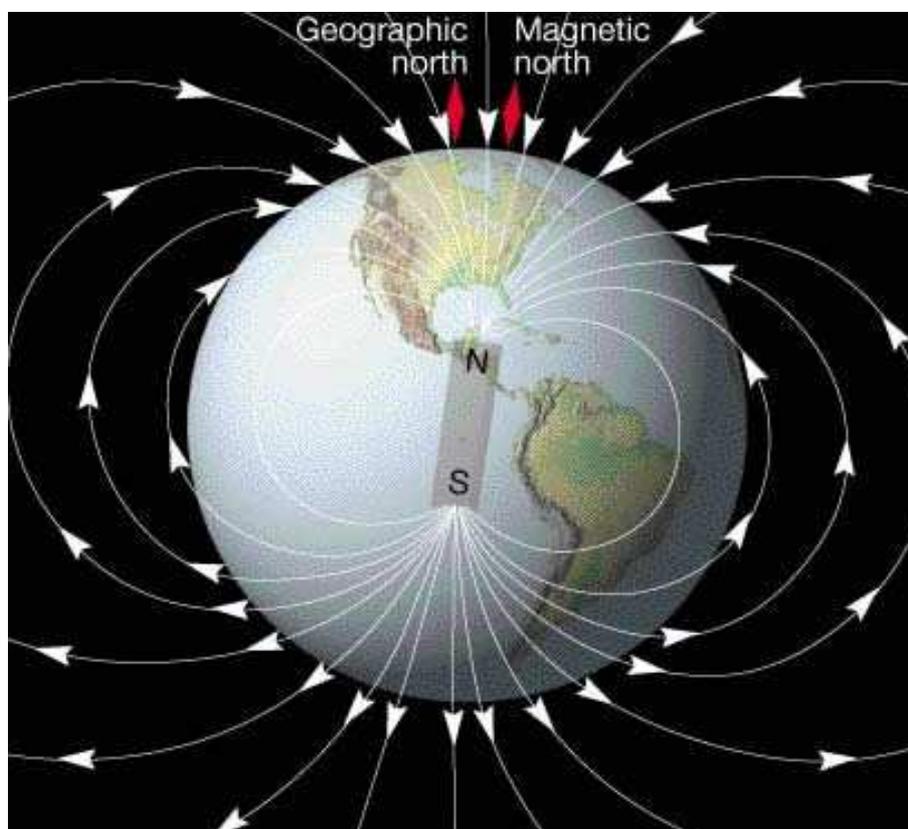


Figura 2.1 – Representação do dipolo magnético colocado no centro da Terra.

Fonte: <http://www.esoterikha.com/grandes-misterios/triangulo-das-bermudas/images/campo-magnetico.jpg>

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

Os elementos lineares adotados para o Campo Geomagnético 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.

O Campo Magnético da Terra é descrito pelas equações de Maxwell, representadas abaixo, como qualquer outro campo eletromagnético.

Lei de Ampère

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

Lei de Faraday

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

Lei de Gauss

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

Condição solenoidal (Lei de Gauss para o campo magnético)

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

onde μ é a permeabilidade magnética no vácuo, $\partial \mathbf{D} / \partial t$ é a corrente de deslocamento, \mathbf{E} é o campo elétrico e ρ é a densidade de carga elétrica.

O Campo Geomagnético tem sua origem nas correntes que circulam no interior da Terra (campo principal), no material magnetizado da crosta, nas correntes que circulam nas camadas ionizadas da alta atmosfera e nas correntes induzidas na crosta terrestre. 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 B_i é o campo de origem estritamente interna da Terra; B_e é o campo de origem externa, cuja produção ocorre fora da região da ionosfera e B_j é o campo cuja produção ocorre dentro da ionosfera, então $B_i + B_e$ podem ser representados por um potencial escalar. Na prática, os dados usados para determinar V são selecionados para minimizar B_j e o V resultante assume uma boa representação de $B_i + B_e$.

Também é possível, de uma outra maneira, deixar clara esta abordagem:

- $\mathbf{B} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_t$ (Eq. 2.16),

Onde $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_i$ (campos de variação temporal mais rápida)

- $\mathbf{B} = \mathbf{B}_d + \mathbf{B}_r + \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_t$ (Eq. 2.17),

Onde $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_d + \mathbf{B}_r$ (campo dipolar e campo residual)

- $\mathbf{B} = \mathbf{B}_d + \mathbf{B}_r + \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_i$ (Eq. 2.18).

A observação do magnetismo associado às manchas solares levou Joseph Larmor, em 1919, à idéia de que o campo era produzido por fluidos condutores com movimentos convectivos em um processo de *dínamo auto-sustentado*. Segundo a hipótese do *dínamo*, o Campo Magnético Terrestre seria a manifestação do campo magnético gerado

pela circulação de correntes na região entre o manto inferior e o núcleo externo da Terra (composto principalmente ferro e níquel) a aproximadamente 2900km de profundidade.

O Campo Magnético Terrestre é variável no tempo e no espaço, apresentando uma configuração dipolar. O eixo do dipolo Geomagnético 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, como já mostrado anteriormente na Figura 2.1.. A linha que passa pelo centro da Terra junto ao eixo do dipolo, intercepta a superfície em dois pontos chamados de *pólos geomagnéticos*.

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

2.2. Interações Terra-Sol

O Campo Geomagnético sofre interações com o Sol. Campos magnéticos muito intensos formam-se na superfície do Sol, as chamadas manchas solares. Quando os campos magnéticos se tornam muito intensos, ocorrem as “ejeções de massa coronal” do Sol, em todas as direções, lançando plasma solar em todas as direções, o chamado vento solar. Devido à interação do Campo Magnético Terrestre com o vento solar emitido continuamente pelo Sol, a forma das linhas do Campo Geomagnético assemelha-se a cauda longa de um cometa, como mostra a Figura 2.2.

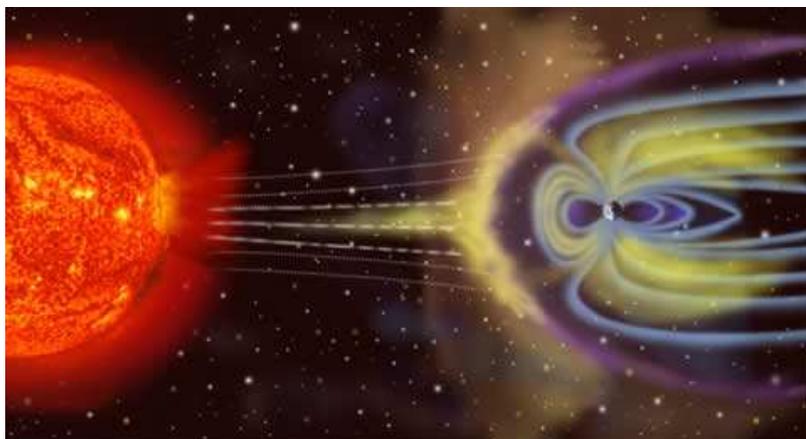


Figura 2.2 – Configuração do campo geomagnético devido a interação com Sol.

Fonte: <http://www.esoterikha.com/grandes-misterios/triangulo-das-bermudas/images/campo-magnetico-terra.jpg>

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.

2.3. 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 2.3 apresenta a composição da Magnetosfera.

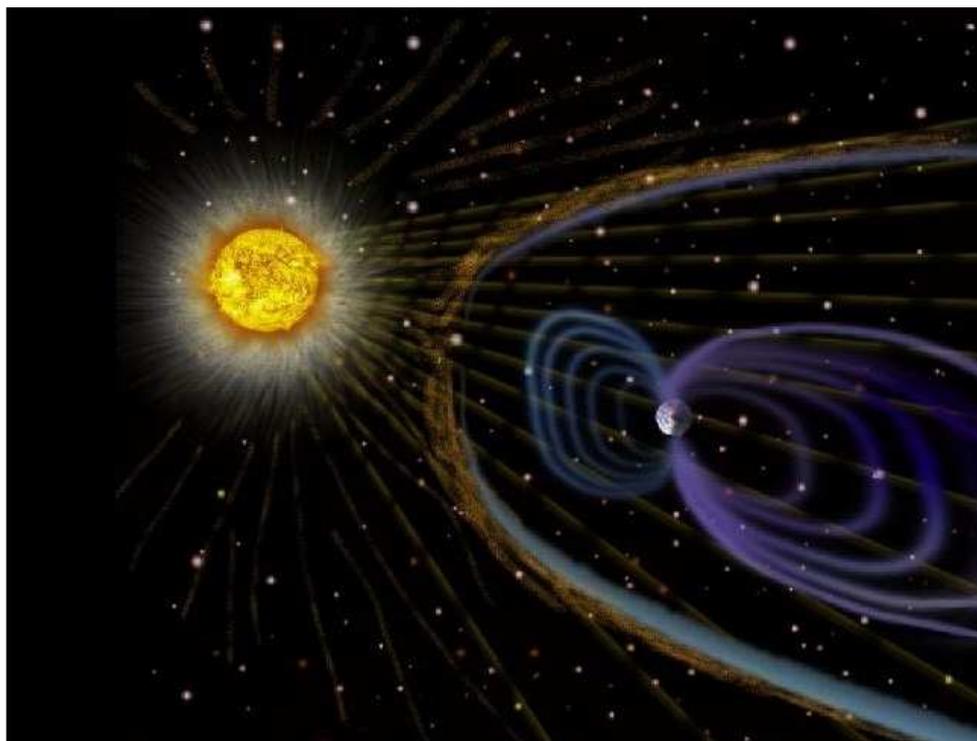
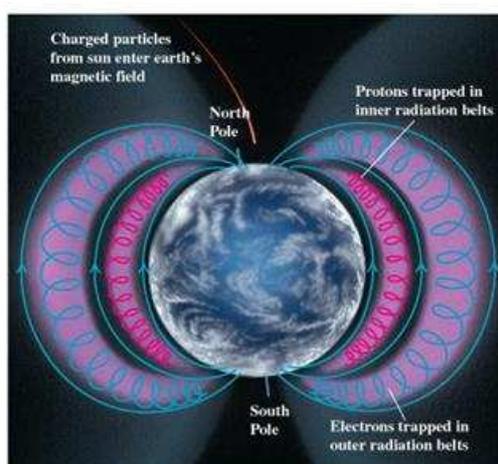


Figura 2.3 – Composição da Magnetosfera.

Fonte:

<http://www.diaadia.pr.gov.br/tvpndrive/arquivos/Image/conteudos/imagens/2fisica/3campo2.jpg>

Grupos de partículas ionizadas são aprisionados em regiões conhecidas *cinturões de radiação de Van Allen* (Figura 2.4), seguindo em trajetória espiral as linhas de campo polares.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Figura 2.4 - Cinturão de Radiação de Van Allen.

Fonte: http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a_21_arquivos/image035.jpg

2.4. Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) foi descoberta na década de 1950. Esta região apresenta atualmente a área de menor intensidade do campo geomagnético ao longo da superfície terrestre (Figura 2.5).

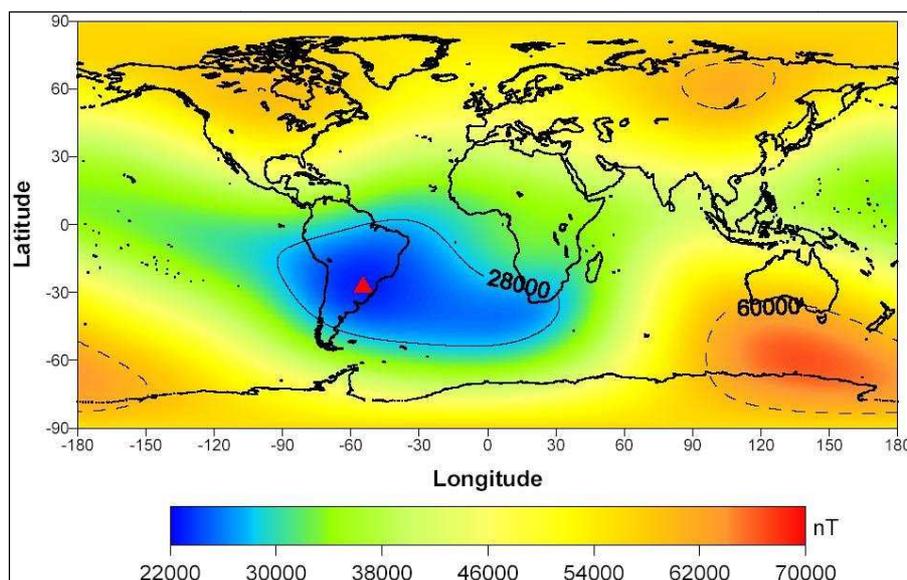


Figura 2.5 - Mapa magnético da Terra. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul em azul. O triângulo vermelho mostra a localização de seu centro no ano 2000.

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

A AMAS 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 da 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.

Capítulo 3. Magnetômetros

Diversos tipos de magnetômetros foram sendo desenvolvidos ao longo do tempo. Cada magnetômetro possui propriedades únicas, que o torna mais adequado a aplicações específicas. Estas aplicações podem variar desde a detecção da presença ou variação de campo até a medição precisa das propriedades vetoriais e escalar dos campos. Como ilustrado na Figura 3.1, é possível dividir os magnetômetros em dois grupos, os magnetômetros escalares e os magnetômetros vetoriais.

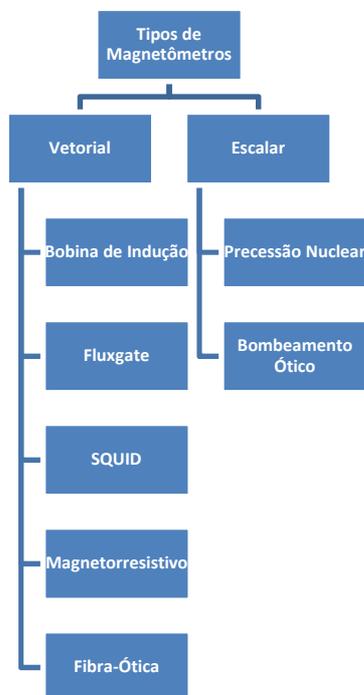


Figura 3.1 – Classificação dos magnetômetros.
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

Os magnetômetros escalares medem apenas a intensidade do campo magnético, enquanto os magnetômetros vetoriais medem a intensidade do campo magnético em cada uma das três direções que formam o vetor campo geomagnético.

3.1. Magnetômetro de fluxo saturado

Os Magnetômetros do tipo fluxgate medem a magnitude e direção de Campos Magnéticos. Estes equipamentos têm seu funcionamento baseado no surgimento de uma

força eletromotriz nos terminais de uma bobina detectora. Essa força tem origem devido à variação de fluxo magnético referente a um campo H_{ext} , o qual se deseja. Conseqüentemente, se não existe variação de fluxo magnético, nenhuma *fem* (força eletromotriz induzida) é gerada.

Os núcleos dos magnetômetros de fluxo saturado são feitos de determinadas ligas magnéticas moles com alta permeabilidade, fazendo com que as linhas de campo externo concentrem-se no seu interior. Dessa forma, o fluxo que atravessa a bobina detectora ao redor desse núcleo será muito grande. Se por alguma razão a permeabilidade do núcleo diminuir repentinamente, o campo deixará de se concentrar dentro da espira e o fluxo total diminuirá, conforme mostra a Figura 3.2. Nesse instante, a variação do fluxo magnético induz uma força eletromotriz na bobina e uma conseqüente tensão induzida nos seus terminais, proporcional ao campo externo.

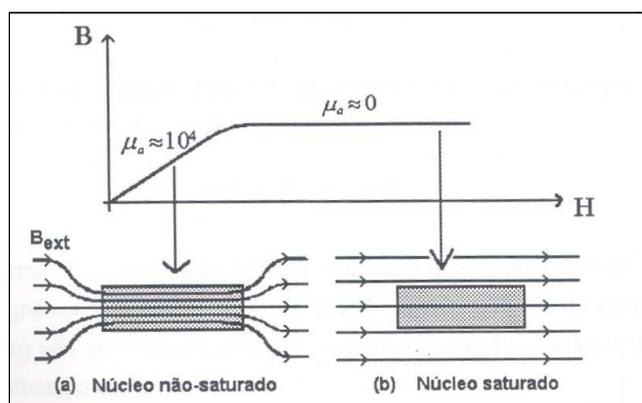


Figura 3.2 – Saturação do núcleo

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. 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 a 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 colocado envolvendo o núcleo e a bobina de excitação. Dessa forma o secundário detecta a variação do fluxo magnético no momento em que a permeabilidade do núcleo muda. Cada vez que o núcleo passa

da condição de saturado para não saturado, ou vice-versa, as linhas de campo magnético que cortam as espiras da bobina detectora induzem pulsos. Desta forma, dois pulsos são gerados a cada ciclo, obtendo-se um sinal com frequência duas vezes maior que a frequência de excitação. A amplitude e a fase de cada harmônico do sinal presente no secundário são proporcionais à magnitude e à polaridade do campo magnético externo presente ao longo do eixo do enrolamento secundário.

3.1.1. 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 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, entre outros.

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 está representado na Figura 3.3. 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.

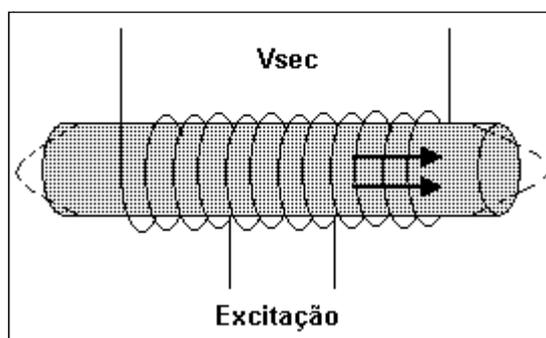


Figura 3.3 – Núcleo linear.
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

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.

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.

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 3.4.

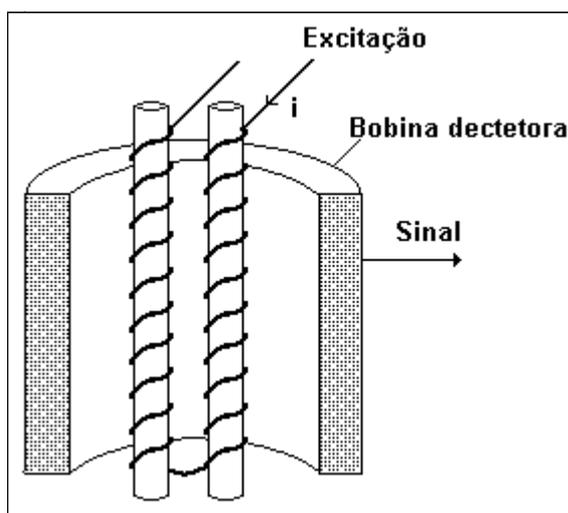


Figura 3.4 – Dois núcleos em barra.
Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

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.

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

Os **sensores em anel** ou **toroidais** funcionam de maneira análoga ao sensor com dois núcleos lineares em antiparalelo, podendo ser considerado como duas semicircunferências unidas, como representado na Figura 3.5. Devido a este tipo de geometria, os efeitos desmagnetizantes sofridos pelo núcleo são bastante reduzidos, visto que o caminho magnético é fechado, “circular”.

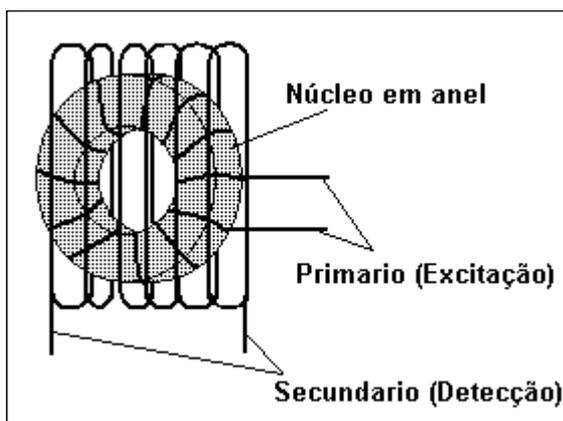


Figura 3.5 – Núcleo em anel.

Fonte: Laboratório de Magnetosferas – CRS/INPE - MCT.

Capítulo 4. Resultados Preliminares

Com o estudo dos sensores *fluxgate* linear e toroidal e suas peculiaridades obteve-se um grande conhecimento na área de instrumentação em geofísica. Foi feito o estudo a fundo de ambos os circuitos, tanto para o sensor linear (Figura 4.1) como para o sensor de núcleo toroidal.

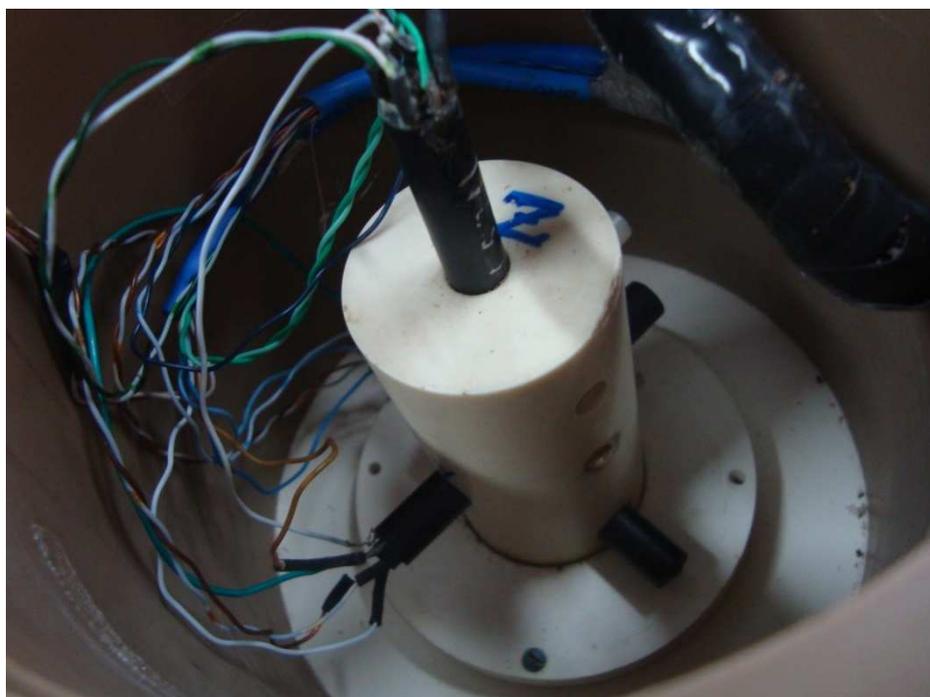


Figura 4.1 – Sensor fluxgate linear

Testes com o circuito magnetômetro *fluxgate* com sensor linear (Figura 4.2), desenvolvido pelo ex-aluno de I.C.&T., o atual Eng. Cassio Espíndola Antunes, foram realizados em bancada no Laboratório de Física Solar, Meio Inter-Planetário e Magnetosferas, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT. Apesar de certas interferências magnéticas, foi possível obter os gráficos das variações magnéticas.

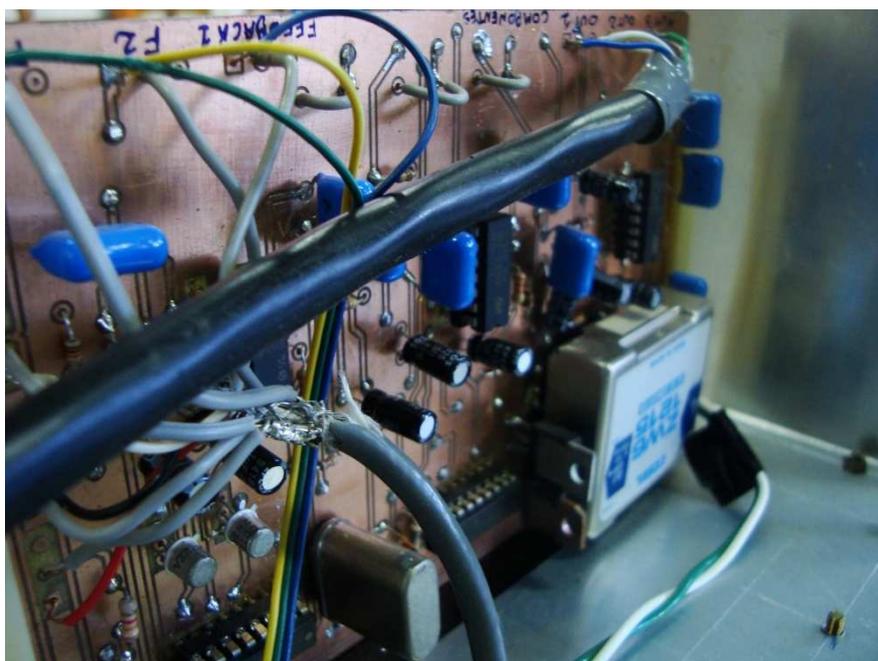


Figura 4.2 - Circuito magnetômetro fluxgate com sensor linear, desenvolvido pelo ex-aluno de I.C.&T., o atual Eng. Cassio Espíndola Antunes

Foi utilizado um *high resolution data logger* (PicoLog ADC-16) para auxiliar na obtenção as medidas. As três saídas do circuito foram conectadas respectivamente nos canais 1, 2 e 3, como mostra a Figura 5.3. Esses canais foram renomeados para H, D e Z, as componentes do Campo Geomagnético, e foi feita a devida troca de escala, na qual 1V equivale a 10000nT. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão de 12V.

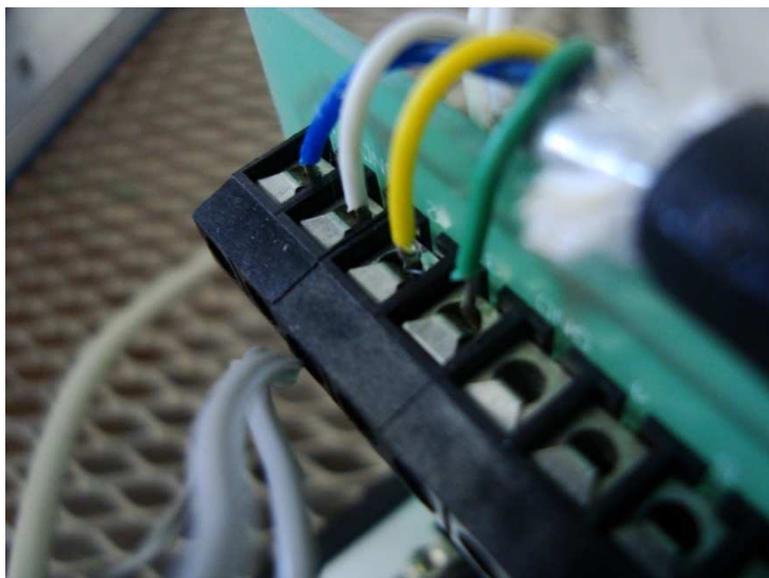


Figura 4.3 - As três saídas do circuito conectadas respectivamente nos canais 1 (azul), 2 (amarelo) e 3 (verde), além do aterramento (branco).

Os resultados obtidos foram de dois dias distintos: 18/19 e 20/21 de Junho de 2010. No dia 18/19 de Junho, as medições foram feitas no período entre 15h30min do primeiro dia e 16h do segundo dia. No dia 20/21 de Junho, as medições foram feitas no período entre 15h30min do primeiro dia às 15h30min do segundo dia. Como as medições foram feitas no âmbito do Laboratório de Física Solar, Meio Inter-Planetário e Magnetosferas, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT, crê-se que elas não têm grande precisão devido às interferências magnéticas. Devido a esse fato, na próxima etapa do Projeto os testes se concentrarão no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE-MCT, local livre de maiores interferências. As medições obtidas são mostradas nas Figuras 4.4 e 4.5 para o dia 18/19 de Junho de 2010 e nas Figuras 4.6 e 4.7 para o dia 20/21 de Junho de 2010.

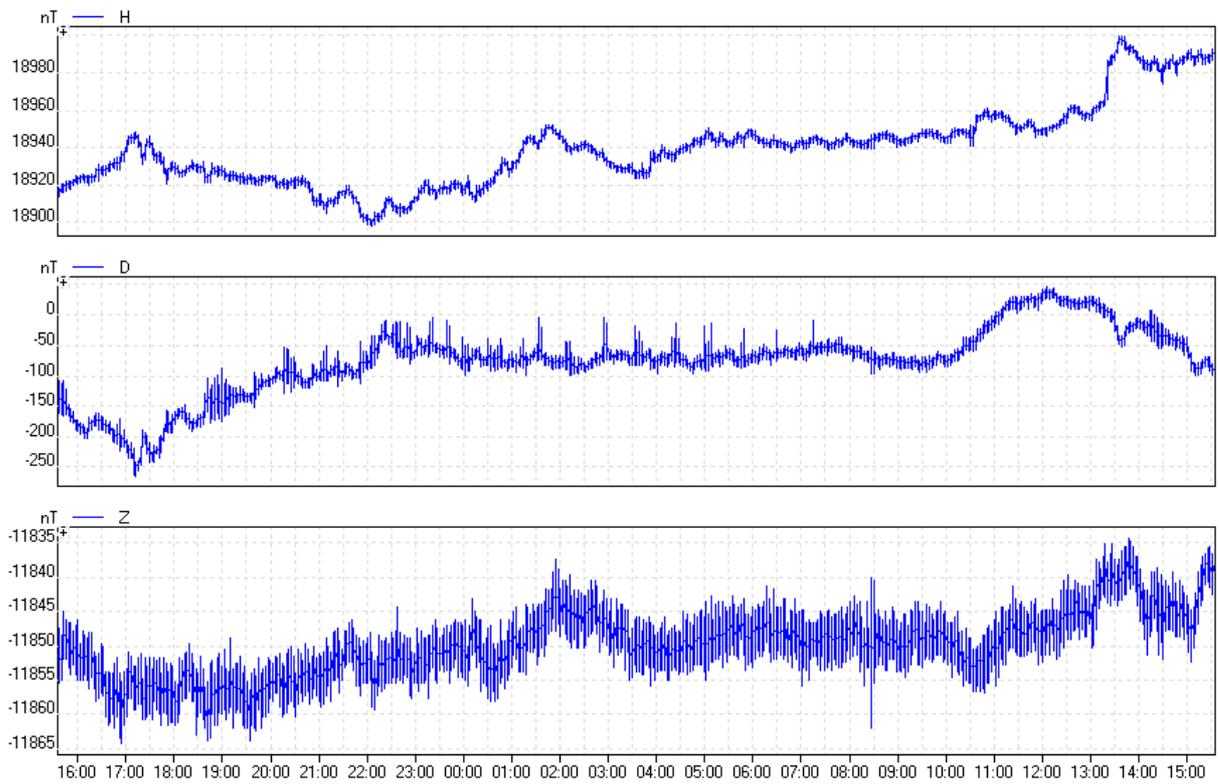


Figura 4.4 – Gráfico das medidas obtidas para o dia 18/19 de Junho de 2010

Time Seconds	H (nT)	D (nT)	Z (nT)
2	18917,37	-134,28	-11853,21
4	18917,37	-128,56	-11853,21
6	18916,61	-143,05	-11850,92
8	18918,52	-128,56	-11850,92
10	18918,90	-120,93	-11848,25
12	18918,13	-126,65	-11848,25
14	18918,13	-141,15	-11851,68
16	18917,75	-141,15	-11853,59
18	18917,75	-147,25	-11853,59
20	18917,75	-132,75	-11853,21
22	18918,52	-128,56	-11852,83
24	18918,13	-128,56	-11850,54
26	18918,52	-133,90	-11851,30
28	18917,37	-137,33	-11852,45
30	18917,37	-130,08	-11852,83
32	18916,99	-130,08	-11852,83
34	18917,75	-125,51	-11851,68
36	18916,99	-131,23	-11851,68
38	18916,99	-131,23	-11851,68
40	18916,99	-131,23	-11851,68
42	18918,90	-131,23	-11851,68
44	18918,90	-131,23	-11851,68
46	18915,46	-135,81	-11854,35
48	18919,66	-137,71	-11850,92
50	18919,66	-138,09	-11848,63
52	18917,75	-142,29	-11848,63
54	18917,75	-142,29	-11846,34
56	18919,66	-142,29	-11850,54
58	18920,80	-148,01	-11849,39
60	18919,66	-144,58	-11853,59

Figura 4.5 – Tabela relativa ao primeiro minuto de medições do dia 18/19 de Junho de 2010

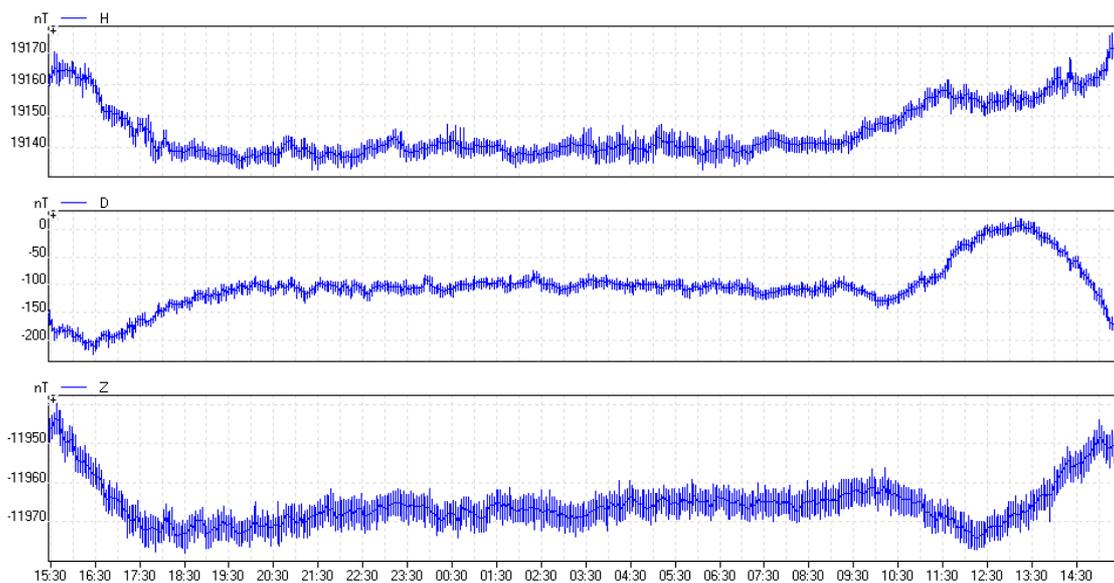


Figura 4.6 – Gráfico medidas obtidas para o dia 20/21 de Junho de 2010

Time Seconds	H (nT)	D (nT)	Z (nT)
2	19161,13	-164,80	-11945,14
4	19161,13	-164,80	-11941,71
6	19163,81	-164,42	-11943,24
8	19163,42	-159,08	-11945,14
10	19161,13	-159,08	-11946,67
12	19161,13	-159,08	-11946,67
14	19162,28	-156,79	-11944,76
16	19162,28	-156,79	-11944,38
18	19162,28	-159,46	-11944,38
20	19162,28	-159,46	-11943,62
22	19162,28	-155,64	-11943,62
24	19161,90	-155,64	-11944,00
26	19161,52	-155,64	-11946,29
28	19161,52	-154,50	-11946,29
30	19161,52	-155,64	-11946,29
32	19161,52	-154,50	-11945,14
34	19162,28	-154,88	-11945,14
36	19162,28	-151,45	-11945,14
38	19160,37	-154,88	-11945,14
40	19160,37	-155,26	-11948,96
42	19161,13	-156,02	-11944,00
44	19161,90	-154,12	-11944,00
46	19162,66	-154,50	-11945,53
48	19161,90	-154,12	-11945,91
50	19163,42	-152,21	-11945,91
52	19160,75	-151,06	-11945,91
54	19160,75	-152,21	-11945,91
56	19160,75	-152,59	-11945,14
58	19162,28	-159,46	-11944,76
60	19164,19	-154,88	-11945,91

Figura 4.7 – Tabela relativa ao primeiro minuto de medições do dia 20/21 de Junho de 2010

Houve dificuldades na tentativa de realização de testes com o sensor toroidal. Foi obtida a curva de histerese do núcleo do sensor, provando assim que o problema estava no circuito. O circuito do magnetômetro *fluxgate* com núcleo toroidal está sendo analisado e alternativas estão sendo estudadas para que na próxima etapa do Projeto de Pesquisa, onde se deseja por em funcionamento ambos os magnetômetros (linear e toroidal), de modo a comparar seus resultados (Capítulo 5).

Capítulo 5. Conclusão e Perfectivas do Projeto

No Relatório foram abordados os resultados da segunda fase do Projeto referente aos estudos experimentais e a construção do circuito de um magnetômetro fluxgate, com núcleo linear desenvolvido no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CCR/INPE – MCT, pelo ex-aluno de I. C. & T. Eng. Cassio Espíndola Antunes, sistema magnetômetro fluxgate para estudos do Campo Geomagnético na AMAS.

Apesar de o sistema magnetômetro não se encontrar operando na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, livre de ruídos excessivos, foi possível a obtenção de medidas de variações do Campo Geomagnético no Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFSMIM/CRS/CCR/INPE – MCT dando continuidade aos testes do protótipo do magnetômetro de baixo ruído.

Com o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa, o aluno teve a oportunidade de ampliar seus conhecimentos nas grandes áreas de Eletrônica e Geofísica Espacial, aprimorando suas habilidades técnico-científicas. A aquisição desse conhecimento é muito importante para a sequência do Projeto de Pesquisa, assim como para o desenvolvimento profissional do aluno.

Após a segunda etapa do Projeto de Pesquisa, as perspectivas futuras são realizar testes do magnetômetro *fluxgate* com núcleo linear no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, local que possui um nível de ruídos muito baixo. Pretende-se fazer o mesmo processo de testes com o sensor fluxgate de núcleo toroidal, comparando assim os resultados obtidos e aproveitando-se das peculiaridades de cada um deles.

Com o devido funcionamento do magnetômetro, pretende-se realizar um longo período de testes com o sensor no Observatório Espacial do Sul, com objetivo de se obter dados durante períodos magnéticos calmos e perturbados a fim de determinar a linearidade, sensibilidade e confiabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Campbell, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [2]. Kabata, Wanderlí. **Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos**. São José dos Campos, SP – 2000.
- [3]. Amarante, J. A. A. **General Topics on Geomagnetism and Studies of the Occurrence of Micropulsations in São José dos Campos**. Relatório interno do INPE / LAFE – 48, 1966.
- [4]. Barbosa, Maria José Faria. **Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas**. São José dos Campos, SP – 2003.
- [5]. Acuña, M. H. And Pellerin, J. **A Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer, IEEE Trans.** On Geosci. Electronics, vol GE-7, p.252-260, 1969.
- [6]. Merrill, R.T. – **The Earth's Magnetic Field, (International geophysics series)**, 1983 Academic Press, London
- [7]. Sociedade Brasileira de Física – **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, Vol. 12 e 13
- [8]. Prindahl, F., **Instrumentos Geomagnéticos, Publicações do Observatório Nacional**, Publicação Especial, N^o 09, 1986.
- [9]. Felch, E. P. and Potter, J. L., **Preliminary Development of a Magnetometer Current Standard**, *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 Clarendon Press, Oxford, 1972.

- [14]. PINTO, Jr. O. e GONZALEZ, W. D. **Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 51, nº 5, 351-365, 1989.
- [15]. Jacobs, J.A.; Kato, Y.; Matsushita, S.; Troitskaya, V.A. **Classification of Geomagnetic Micropulsations**. Journal of Geophysical Research, **69**(1):180–181, Jan. 1964.
- [16]. Zanandrea, A. **Estudo das Micropulsações Geomagnéticas em Latitudes Muito Baixas, no Brasil**. INPE, São José dos Campos, 1999.
- [17]. Zanandrea, A. **Micropulsações Geomagnéticas em Santa Maria – RS**. INPE, São José dos Campos, maio de 1999.
- [18] Samson, J.C. **Geomagnetic Pulsations and Plasma Waves in the Earth's Magnetosphere**. In: Jacobs, J.A. ed., Geomagnetism, London, Academic Press, **4**:481–592, 1991.



ANEXOS



ANEXO A

Títulos e resumos de trabalhos apresentados e ou submetidos.

O bolsista publicou 9 trabalhos, sendo 3 como primeiro autor e 6 como co-autor no Período do Projeto de Pesquisa.

01 – SAVIAN, F. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; RIGON, W. S. ; SILVA, A. C. ; SIQUEIRA, J. . **ELECTRONIC CIRCUIT OF A TOROIDAL CORE FLUXGATE MAGNETOMETER.** In: 2010 The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu, Brasil. AGU 2010, 2010.

02 - SAVIAN, F. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. . **DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO A BORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS - MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO.** In: Seminário de Iniciação Científica do INPE, 2010, São José dos Campos, SP, Brasil. Anais do SICINPE 2010, 2010.

03 - SAVIAN, F. S. ; LOPES, R. V. F. ; ANTUNES, C. E. ; SIQUEIRA, J. ; SCHUCH, N. J. ; RIGON, W. S. . **UTILIZAÇÃO DE MAGNETÔMETRO PARA NAVEGAÇÃO DE BORDO EM UM CUBESAT - SICINPE 2009.** In: 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009, Santa Maria, RS, Brasil. Anais da 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009.

04 – SILVA, A. C. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; FRIGO, E. ; SIQUEIRA, J. ; SAVIAN, F. S. ; RIGON, W. S. . **RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE SOLAR E VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS.** In: 24º Salão de Iniciação Científica – UFSM, 2009, Santa Maria, RS, Brasil. Anais da 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009.

05 – RIGON, W. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; SILVA, A. C. ; 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 2009.** In: 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009, Santa Maria, RS, Brasil. Anais da 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009.

06 – SILVA, A. C. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; RIGON, W. S. ; SAVIAN, F. S. . **SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY RELATIONSHIP BETWEEN THE SOLAR ACTIVITY AND GEOMAGNETIC VARIATIONS.** . In: 2010 The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu, Brasil. AGU 2010, 2010.

07 – RIGON, W. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; SILVA, A. C. ; SAVIAN, F. S.. **SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY ANALYSES OF PC5 GEOMAGNETIC PULSATIONS VARIATION WITH SOLAR CYCLE.** In: 2010 The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu, Brasil. AGU 2010, 2010.

08 – SILVA, A. C.; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B.; RIGON, W. S.; SAVIAN, F. S.. **RELATIONSHIP BETWEEN THE SOLAR ACTIVITY AND GEOMAGNETIC VARIATIONS IN THE REGION OF THE SOUTH ATLANTIC GEOMAGNETIC ANOMALY –SAMA.** In: COSPAR 2010, Bremen, Germany, 2010.

09 - RIGON, W. S. ; DUTRA, S. L. G. ; SCHUCH, N. J. ; TRIVEDI, N. B. ; SILVA, A. C. ; SAVIAN, F. S.. **SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY ANALYSES OF PC5 GEOMAGNETIC PULSATIONS VARIATION WITH SOLAR CYCLE.** In: COSPAR 2010, Bremen, Germany, 2010.

O Bolsista também apresentou o trabalho intitulado **COMPARISON BETWEEN TWO DIFFERENT WAYS OF ATTITUDE DETERMINATION IN THE NANOSATC-BR CUBESAT** na IAGA 2009, que ocorreu em Sopron, Hungria, entre 23 e 30 de Agosto de 2009.

DEVELOPMENT OF A TOROIDAL CORE FLUXGATE MAGNETOMETER ELECTRONIC CIRCUIT

FERNANDO DE SOUZA SAVIAN [1]; SEVERINO LUIZ GUIMARÃES DUTRA [2];
NELSON JORGE SCHUCH [1]; NALIN BABULAL TRIVEDI [2]; ANDIRLEI CLAUDIR DA
SILVA [1]; WILLIAN RIGON SILVA [1]

[1] Southern Regional Space Research Center - CRS/INPE - MCT, in collaboration with the Santa Maria Space Science Laboratory - LACESM/CT- UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

[2] National Institute for Space Research - DGE/CEA/INPE - MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

Abstract

Theoretically, fluxgate magnetometers are classified as variometers, because they measure magnetic fields' variations. They are mainly used in Geophysics, to obtain the magnitude and the vector directions of Earth Geomagnetic Field,

Its operation is based on an *emf* (electromotive force) induction in the coil detector terminals. This force arises when there is a magnetic flux (\mathbf{B}) variation from an external magnetic field (\mathbf{H}_{ext}) to be measured. No *emf* is generated if there isn't variation of \mathbf{H}_{ext} .

The ring core fluxgate magnetometer electronic circuit has three steps. First, is necessary to generate a periodical signal with frequency f that saturates the ferromagnetic core. Two pulses are generated in each excitation cycle, where the non-saturated core becomes saturated. Therefore, the detected signal in the second coil will be $2f$. In the second part of the circuit, there is an integrated circuit (IC 4053) to compare the excitation with the detected signals. This circuit generates in its outs two signals, whose frequencies correspond to the second harmonic of the detected signal. Thirdly, the difference between each pair of the obtained signals, in the IC 4053's out, is integrated by an integrator circuit. So, is possible to obtain the linearity relationship between the detected signal and the variation of the measured magnetic field.

This work consists in identify and explain the three steps of the electronic circuit used in the prototype of a toroidal core fluxgate magnetometer, obtaining data for the Geomagnetic Field variation. The activities are being developed at the INPE's Southern Regional Space Research Center.

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS DE BAIXO RUÍDO A BORDO DE SATÉLITES CIENTÍFICOS - MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO SATURADO

Fernando de Souza Savian¹ (UFSM – CRS/CCR/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Severino Luiz Guimarães Dutra² (Orientador – DGE/CEA/INPE-MCT)

Nelson Jorge Schuch³ (Co-orientador – CRS/CCR/INPE-MCT)

Nalin Babulal Trivedi⁴ (Co-Orientador – DGE/CEA/INPE – MCT)

RESUMO

O Campo Magnético da Terra tem o seu monitoramento continuamente realizado por instrumentos chamados magnetômetros, seja em estações na superfície terrestre ou no Geoespaço (balões, sondas, satélites e plataformas espaciais como a ISS). Dentre os vários tipos existentes, o Projeto de Pesquisa tem como principal objetivo a análise e o desenvolvimento de magnetômetros de núcleo toroidal, saturados (*fluxgate*). Seu princípio de funcionamento é baseado na resposta magnética apresentada por materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade, quando submetidos periodicamente a um campo de saturação. O magnetômetro *fluxgate* é composto por três sensores ortogonais entre si, que em operação são orientados nas direções Norte – Sul, (componente *X*), Leste – Oeste, (componente *Y*), e vertical, apontando para o centro da Terra, (componente *Z*). Quando o eixo Norte – Sul é colocado no meridiano geomagnético durante a instalação e operação local, o que é bastante comum, podem ser determinadas as componentes *HDZ*. Durante o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa foi montado e analisado o circuito completo de um magnetômetro de núcleo toroidal saturado. O circuito é dividido em três partes. Primeiro faz-se necessário gerar um sinal periódico de frequência, *f*, que possa saturar o núcleo ferromagnético. Na segunda parte do circuito, utiliza-se o circuito integrado 4053 para comparar o sinal de excitação com o sinal detectado. Por fim, a diferença entre cada par de sinais obtido na saída do CI 4053 é integrada pelo circuito integrador. Com o circuito impresso em uma placa, reduzido da melhor maneira possível nas condições técnicas do Laboratório, visando diminuir massa e tamanho, o circuito encontra-se em fase de testes. Testes estão sendo efetuados em bancada de Laboratório no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT. Após a primeira fase de testes e dos devidos ajustes, o circuito e o sensor serão transferidos e testados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE-MCT, (29,4 ° S, 53,8 ° W, 480 m, a.n.m.), que é um local que apresenta níveis muito baixos de interferência eletromagnética. Resultados são apresentados.

¹ Aluno do Curso de Engenharia Elétrica da UFSM, vinculado ao LACESM/CT – UFSM, atuando no Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Geomagnéticas do CRS.

E-mail: fsavian@lacesm.ufsm.br

² Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT.

E-mail: dutra@dge.inpe.br

³ Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT.

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

⁴ Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT.

E-mail: trivedi@dge.inpe.br