



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDOS EXPERIMENTAIS VISANDO O  
DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS  
GEOMAGNÉTICAS – MAGNETÔMETRO DE NÚCLEO  
SATURADO**

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

**PROCESSO Nº102067/2006-6**

Sandro Fettermann Bertagnolli (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE-  
CNPq/MCT)

E-mail: [sandrob@lacesm.ufsm.br](mailto:sandrob@lacesm.ufsm.br)

Dr. Nalin B. Trivedi (OMV/ON - MCT, Orientador)

E-mail: [ntrivedi@on.br](mailto:ntrivedi@on.br)

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/CIE/INPE-MCT, Co-Orientador)

E-mail: [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Santa Maria, Julho de 2007.**



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:**

### **Bolsistas:**

**Sandro Fettermann Bertagnoli**

Acadêmico de Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia

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

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Processo:**

PIBIC/INPE – CNPq/MCT 102067/2006-6

### **Orientador:**

**Dr. Nalin B.Trivedi**

Observatório Magnético de Vassouras – OMV/ON – MCT

### **Co-Orientador:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

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

### **Colaboradores:**

**Cássio Espindola Antunes**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

**Fagner Chagas Rother**

Acadêmico do Curso de Física – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

**Josemar Siqueira**

Acadêmico do Curso de Física – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

---



*Relatório Final de Atividades*

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

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

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

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

---

## Relatório Final de Atividades



## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



**Estudantes** [Página Inicial](#)


### Grupo(s) de que participa

Nome do grupo	Nome do líder	Status	Instituição	Data de envio
<a href="#">Astrofísica - Radioastronomia</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>	Aguardando certificação	INPE	14/06/2007
<a href="#">Clima Espacial, Magnetosferas, Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>	Certificado	INPE	18/06/2007


**Notas:**

- Apenas os grupos certificados podem fazer parte das bases censitárias;
- Pesquisadores ou estudantes sem currículo Lattes, mesmo sendo integrantes de grupos certificados, não são visualizados na busca textual da base corrente e não são incluídos nas bases censitárias.

[Como salvar consulta](#)



## Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Grupo de Pesquisa  
**Astrofísica - Radioastronomia**

Aguardando  
certificação  
da instituição  
?

Identificação	Recursos Humanos	Linhas de Pesquisa	Indicadores do Grupo
<b>Identificação</b>			
<b>Dados básicos</b>			
Nome do grupo: Astrofísica - Radioastronomia			
Status do grupo: <b>aguardando certificação pela instituição</b>			
Ano de formação: 1986			
Data da última atualização: 14/06/2007 18:19			
Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - <a href="mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br">nelson.schuch@pq.cnpq.br</a> Natanael Rodrigues Gomes - <a href="mailto:natanael.gomes@lagesm.ufsm.br">natanael.gomes@lagesm.ufsm.br</a>			
Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Astronomia			
Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE			
órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE		Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS	
<b>Endereço</b>			
Logradouro: Caixa Postal 5021			
Bairro: Camobi		CEP: 97110970	
Cidade: Santa Maria		UF: RS	
Telefone: 33012026		Fax: 33012030	
E-mail: <a href="mailto:njschuch@lagesm.ufsm.br">njschuch@lagesm.ufsm.br</a>		Home page: <a href="http://">http://</a>	
<b>Repercussões dos trabalhos do grupo</b>			



## Relatório Final de Atividades

O Grupo de Pesquisa - Astrofísica e Radioastronomia do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, colabora com pesquisadores do: INPE, CRAAM-Universidade P. Mackenzie, DMB/CB/USP e LACESM-UFSM. Linhas de Pesquisas: ASTROFÍSICA E RADIOASTRONOMIA, ANTENAS E MECATRÔNICA E ELETRÔNICA E RADIOFREQÜÊNCIA. Áreas de interesse da Astrofísica: Sistema Solar, Galáctica e Extra-Galáctica; Cosmologia Observacional; Alta Energia; Partículas & Campos; Relativística & Gravitacão; Exobiologia. Instrumentação Radioastronômica: Objetiva a instalação de rádio-interferômetro de longa linha-de-base e estações do Sistema LOFAR no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS, banda de frequência 10-240 MHz. Objetivos: Mapear o Hemisfério Sul, com superposição no Hemisfério Norte, comparando com os levantamentos: (Universidade de Cambridge-6C,7C,7C(G)), NVSS(NRAO-VLA Sky Survey) LOFAR, analisando a Esfera Celeste entre 10-240 MHz; Cosmologia Observacional, contagem de rádio-fontes a níveis fracos de densidades de fluxo em baixas frequências; Pesquisar fontes variáveis, como pulsares e radiofontes de natureza não sincrotrônica; Procura por radiofontes gigantes, radiogaláxias e por aglomerados de radiofontes, a exemplo de aglomerados de galáxias; Procura de radiofontes com o interior "morto", com lóbulos ativos; Procura de emissões no contínuo entre 110-240 MHz de regiões galácticas HII, complexas, não compactas; Procura de aglomerados e superaglomerados de galáxias, procura de evidência de matéria intergaláctica na forma de rádio-halos; Procura de variabilidade de radiofontes em baixas frequências; Mapear a Galaxia e as Nuvens de Magalhães entre 110 e 240 MHz; Pesquisar a Radiação Cósmica de Fundo entre 110-240 MHz, Meio Interestelar, Radiação não-térmica de planetas - Júpiter, Vento Solar e Clima Espacial; Cintilação Interplanetária. Vice-Líderes: Natanael R. Gomes, Ademar Michels.

**Recursos humanos****Pesquisadores** **Total: 11**

<a href="#">Ademar Michels</a>	<a href="#">Natanael Rodrigues Gomes - (líder)</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch - (líder)</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Norberto Ulisses de Vasconcellos Oliveira</a>
<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>	<a href="#">Orimar Antonio Battistel</a>
<a href="#">José Williams dos Santos Vilas Boas</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>	

**Estudantes** **Total: 19**

<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>
<a href="#">Cleomar Pereira da Silva</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>
<a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>	<a href="#">Roben Castagna Lunardi</a>
<a href="#">Jean Carlos Daroit</a>	<a href="#">Rodrigo Gerlach Silva</a>
<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Samuel Martins da Silva</a>
<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>	<a href="#">Sandro Fettermann Bertagnoli</a>
<a href="#">Luzia Lux Lock</a>	<a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>
<a href="#">Marcelo dos Santos Zastawny</a>	<a href="#">Tardelli Ronan Coelho Stekel</a>
<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>
<a href="#">Micael da Silva Bacellar</a>	

**Técnicos** **Total: 3**

Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica  
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação  
Koiti Ozaki - Graduação - Analista de Sistemas

**Linhas de pesquisa** **Total: 3**

- [Antenas e Mecatrônica](#)
- [Astrofísica e Radioastronomia](#)
- [Eletrônica e Radiofrequência](#)

**Empresas associadas ao grupo** **Total: 0****Indicadores de recursos humanos do grupo**

	<b>Integrantes do grupo</b>	<b>Total</b>
Pesquisador(es)		11
Estudante(s)		19
Técnico(s)		3

Names grafados em vermelho: integrantes sem Currículo Lattes ou com inconsistências nos dados de identificação entre os formulários de Currículo e de Grupo de Pesquisa.

Fechar



Relatório Final de Atividades



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa  
Eletrônica e Radiofrequência

Linha de pesquisa

Eletrônica e Radiofrequência

Nome do grupo: [Astrofísica - Radioastronomia](#)

Palavras-chave: Antenas, Rádio Telescópios, Rádio Interferômetros; Eletrônica, Radiofrequência; Fibra Óptica, Transmissor, Navegação, Imageamento; Processamento de Sinais, Dispositivos Eletrônicos; Rádio Receptores Analógicos - Digitais; Sistemas Correlacionadores de Sinais;

Pesquisadores:

[José Williams dos Santos Vilas Boas](#)  
[Natanael Rodrigues Gomes](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Norberto Ulisses de Vasconcelos Oliveira](#)

Estudantes:

[Cleomar Pereira da Silva](#)  
[Eduardo Cereffa Dalla Favera](#)  
[Luzia Lux Lock](#)  
[Marcelo dos Santos Zastawny](#)  
[Micael da Silva Bacellar](#)  
[Roben Castagna Lunardi](#)  
[Sandro Fettermann Bertagnoli](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)  
[Tiago Jaskulski](#)

Árvore do conhecimento:

Engenharias; Engenharia Elétrica; Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos; Circuitos Eletrônicos;  
Engenharias; Engenharia Elétrica; Medidas Elétricas, Magnéticas e Eletrônicas; Instrumentação; Instrumentação Eletrônica;  
Engenharias; Engenharia Elétrica; Telecomunicações; Radionavegação e Radioastronomia;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

Coordena ações de desenvolvimento em: ELETRÔNICA: Engenharia Eletrônica, inovação de: circuitos e dispositivos eletrônicos para sistemas de: controle e automação, processamento de sinais, de potência e de equipamentos eletrônicos. RADIOFREQUÊNCIA: Engenharia de Telecomunicações e Rádio-Frequência, sistemas de: processamento digital de sinais, fibras ópticas, circuitos, receptores/transmissores analógicos/digitais, navegação e imageamento, rádio-enlaces. Vice-Líder: Natanael R. Gomes

Fechar



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Grupo de Pesquisa

Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br



Identificação

Recursos Humanos

Linhas de Pesquisa

Indicadores do Grupo

Identificação

Dados básicos

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

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 18/06/2007 11:07

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - [nelson.schuch@pq.cnpq.br](mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br)  
Ademar Michels - [michels@ct.ufsm.br](mailto:michels@ct.ufsm.br)

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

Cidade: Santa Maria

Telefone: 33012026

E-mail: [njschuch@lagesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lagesm.ufsm.br)

CEP: 97110970

UF: RS

Fax: 33012030

Home page: <http://>



## Relatório Final de Atividades

## Repercussões dos trabalhos do grupo

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

## Recursos humanos

## Pesquisadores

Total: 26

<a href="#">Ademar Michels</a> - (líder)	<a href="#">Jean Carlo Santos</a>
<a href="#">Alan Prestes</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>
<a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a>	<a href="#">Joao Paulo Minussi</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Mangaiathayil Ali Abdu</a>
<a href="#">Barclay Robert Clemesha</a>	<a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>
<a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a>	<a href="#">Nalin Babulau 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> - (líder)
<a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a>	<a href="#">Osmar Pinto Junior</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a>	<a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>
<a href="#">Fernando Luis Guarnieri</a>	<a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>
<a href="#">Hisao Takahashi</a>	<a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>

## Estudantes

Total: 25

<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Marcelo dos Santos Zastawny</a>
<a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>
<a href="#">Cézar Augusto Daroit</a>	<a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a>
<a href="#">Cleomar Pereira da Silva</a>	<a href="#">Micael da Silva Bacellar</a>
<a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>
<a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>	<a href="#">Pablo Fernando Carlesso</a>
<a href="#">Fagner Chagas Rother</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>
<a href="#">Jean Carlos Daroit</a>	<a href="#">Rodrigo Gerlach Silva</a>
<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Samuel Martins da Silva</a>
<a href="#">Josemar de Siqueira</a>	<a href="#">Sandro Fettermann Bertagnolli</a>
<a href="#">Juliano Moro</a>	<a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>
<a href="#">Lilian Piecha Moor</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>
<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>	

## Técnicos

Total: 4

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

## Linhas de pesquisa

Total: 4

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

## Empresas associadas ao grupo

Total: 0

## Indicadores de recursos humanos do grupo

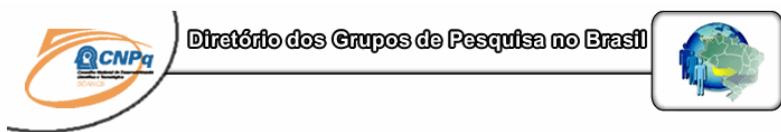
	Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)		26
Estudante(s)		25
Técnico(s)		4

Names grafados em vermelho: integrantes sem Currículo Lattes ou com inconsistências nos dados de identificação entre os formulários de Currículo e de Grupo de Pesquisa.

Fechar



## Relatório Final de Atividades



### Linha de Pesquisa MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

#### Linha de pesquisa

#### MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

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

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

#### Pesquisadores:

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

#### Estudantes:

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

#### 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;

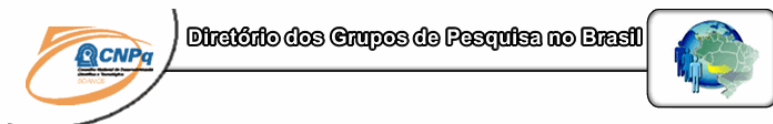
#### Setores de aplicação:

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 Babulal Trivedi.

Fechar



### Linha de Pesquisa NANOSATC-BR

#### Linha de pesquisa

#### NANOSATC-BR

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

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

#### Pesquisadores:

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

#### Estudantes:

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





## Relatório Final de Atividades

[Rafael Lopes Costa](#)  
[Rodrigo Gerlach Silva](#)  
[Samuel Martins da Silva](#)  
[Sandro Fettermann Bertagnoli](#)  
[Silvano Lucas Prochnow](#)  
[Tiago Jaskulski](#)

**Árvore do conhecimento:**

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

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

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

Fechar



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao meu mentor Sr. Nelson Jorge Schuch pelo apoio dado no decorrer dessa jornada para minha formação tanto científica e pessoal. Ao Dr. José Carlos Becceneri, Coordenador do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do INPE/MCT e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo incentivo profissional e apoio financeiro para realização dos trabalhos técnicos e científicos do Projeto de Pesquisa.

Ao meu Orientador Dr. Nalin Babulal Trivedi e aos meus colegas de Laboratório que me ajudaram a me adaptar a essa nova rotina de conhecimentos e me deram suporte para eventuais dúvidas sobre o assunto referido. Ao CRS/CIE/INPE-MCT pela infra-estrutura dos laboratórios que nos dão total liberdade para realizar nossas pesquisas teóricas e práticas.

Gostaria de efetuar um agradecimento especial ao Engenheiro Eduardo Andrighetto, pelo apoio e as informações do Projeto por ele desenvolvido na Fase I e que foram de extrema importância para a realização deste relatório.

---



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>18</b>
INTRODUÇÃO .....	18
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>19</b>
ATIVIDADES DO BOLSISTA SANDRO F. BERTAGNOLLI .....	19
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>20</b>
ESTUDO FÍSICO.....	20
3.1 FUNDAMENTOS GEOFÍSICOS .....	20
3.1.1 – Campo Magnético Terrestre.....	20
3.1.2 – Elementos do Campo Geomagnético .....	20
3.1.3 – Magnetosfera .....	22
3.1.4 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) .....	23
3.1.5 – Campo Principal .....	25
3.1.6 – Variações Diurnas .....	26
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>27</b>
ESTUDO INSTRUMENTAL.....	27
4.1 - INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS .....	27
4.1.1 – Classificação dos Magnetômetros.....	27
4.1.2 – Magnetômetros Fluxgate .....	28
4.1.2.1 – Princípio de Funcionamento .....	28
4.1.2.2 – Ferromagnetismo .....	30
4.1.2.3 – Geometria dos Sensores .....	31
4.1.2.3.1 – O Núcleo linear.....	32
4.1.2.3.2 – O Núcleo em Anel .....	33
4.1.2.4 – Equacionamento do Sensor .....	34
4.1.3 – Métodos de Detecção .....	36
4.1.3.1 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado.....	36
4.1.3.2 – O Sensor e a Bobina de Realimentação.....	37
4.1.3.3 – Magnetômetro Fluxgate Curto Circuitado .....	38
4.1.3.4 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado.....	38
4.1.3.5 – Magnetômetro de Harmônicos Pares.....	40
4.1.3.6 – Ruído.....	40

---



*Relatório Final de Atividades*

<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>42</b>
IMPLEMENTAÇÃO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE.....	42
5.1 – Caracterização do Sensor Magnético.....	42
5.2 – Excitação da Bobina Primária .....	43
5.3 – Processamento do Sinal .....	46
5.3.1 – Primeiro Estágio: Circuito de Conversão – Corrente/Tensão .....	48
5.3.2 – Segundo Estágio: Multiplexador Analógico.....	50
5.3.3 – Terceiro Estágio: Integrador .....	52
5.3.4 – Próximos estágios. ....	54
5.4 Montagem do Sistema .....	55
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>57</b>
PERSPECTIVAS FUTURAS.....	57
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>58</b>
CONCLUSÃO .....	58
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – ELEMENTOS DO VETOR MAGNÉTICO.....	21
FIGURA 3.2 – INTERAÇÃO SOL TERRA.....	22
FIGURA 3.3 – IDENTIFICAÇÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS. 24	
FIGURA 3.4 – CONFIGURAÇÕES DOS PERFIS DE MESMA INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO.....	24
FIGURA 3.5 – CARTA MAGNÉTICA MUNDIAL, 2005 .....	25
FIGURA 4.1 – MAGNETÔMETRO FLUXGATE PARA MEDIDA DIRECIONAL DO CAMPO GEOMAGNÉTICO .....	30
FIGURA 4.2 – HISTERESE FERROMAGNÉTICA $BXH$ .....	31
FIGURA 5.2 – SENSOR BARRA LINEAR.....	43
FIGURA 5.1 – ARRANJO VETORIAL .....	43
FIGURA 5.3 – SINAL AJUSTADO PELO CI 4060 RESPONSÁVEL PELA EXCITAÇÃO DO PRIMÁRIO .....	43
FIGURA 5.4 – SINAL FORNECIDO PELO CI 4060 COM O DOBRO DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO.....	44
FIGURA 5.5 – TENSÃO SOBRE O ENROLAMENTO PRIMÁRIO DO SENSOR .....	45
FIGURA 5.6 – CIRCUITO DE EXCITAÇÃO COMPLETO UTILIZADO.....	46
FIGURA 5.7 – SINAL DE TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA SENSORA POSITIVO.....	47
FIGURA 5.8 – SINAL DE TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA SENSORA NEGATIVO.....	47
FIGURA 5.9 – RELAÇÃO ENTRE OS PULSOS DE CORRENTE DA BOBINA PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA .....	48
FIGURA 5.10 – CIRCUITO DERIVADOR.....	49
FIGURA 5.12 – SINAL DE SAÍDA DO CIRCUITO DERIVADOR PARA O SEGUNDO ESTÁGIO ..	50
FIGURA 5.13 – FORMAS DE ONDA OBTIDAS EM CADA PAR DAS TRÊS SAÍDAS DO CI 4053 51	
FIGURA 5.14 – IMPLEMENTAÇÃO DO CI 4053.....	52

---



*Relatório Final de Atividades*

<b>FIGURA 5.16 – CIRCUITO INTEGRADOR IMPLEMENTADO NO TERCEIRO ESTÁGIO .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 5.17 – CIRCUITO INTEGRADOR IMPLEMENTADO NO TERCEIRO ESTÁGIO .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 5.18 – BANCADA PARA INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA DO LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS DO CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRS/CIE/INPE – MCT .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 5.19 – PROTOBOARD COM OS COMPONENTES ELETRÔNICOS NA ESQUERDA E ARRANJO VETORIAL DOS SENSORES NA DIREITA. ....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO A – CIRCUITO ELETRÔNICO DO MAGNETÔMETRO EM FASE DE DESENVOLVIMENTO NO LABORATÓRIO DE MAGNETOSFERAS DO CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS - CRS/CIE/INPE - MCT.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO B – PUBLICAÇÕES E CERTIFICADOS.....</b>	<b>63</b>

---



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES MAGNÉTICOS SEGUNDO SEUS PRINCÍPIO FÍSICOS. ....	27
---	----

## RESUMO

A instrumentação de magnetômetros de núcleo saturado está baseada nas propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética. A variação da saturação magnética criada por uma bobina de excitação na região não linear da curva de histerese  $B \times H$  gera na saída do sensor um sinal com alto conteúdo harmônico, fundamental para a detecção do Campo.

O Segundo harmônico é proporcional ao campo magnético ambiente, sendo então, altamente influenciado pelo Campo Geomagnético, assim pode-se desprezar as demais componentes harmônicas em comparação. O sinal de saída do magnetômetro é obtido através da comparação deste segundo harmônico com o do sinal de excitação que provoca a saturação do fluxo magnético no núcleo, de forma a obter a diferença de fase ou de amplitude entre os dois resultando puramente na variação do Campo Magnético o qual se deseja detectar.

Várias são as aplicações encontradas para este dispositivo, dentre elas, podem ser citadas as prospecções minerais, testes não destrutivos de materiais, avaliação das interferências nos enlaces de radiocomunicações, controle de navegação para veículos, aplicações em Biomagnetismo e principalmente estudos em Geofísica Espacial. Quando o registro eletrônico de um campo magnético é necessário, normalmente sistemas do

---





*Relatório Final de Atividades*

tipo fluxgate são escolhidos para a implementação de magnetômetros, sendo incorporados em muitos satélites e nos mais modernos observatórios espaciais.

Com base nisso, objetiva-se desenvolver estudos experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas e estudar técnicas de medições das variações do Campo Geomagnético para realizar estudos na área de Geofísica Espacial, junto aos Laboratórios do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Muitas técnicas e instrumentos de medidas foram desenvolvidos, com o objetivo de se estudar o comportamento do campo Geomagnético e suas variações. Os instrumentos utilizados para se medir o campo Geomagnético são denominados magnetômetros, instrumentos que podem ser classificados de várias maneiras.

Este relatório visa mostrar a primeira etapa de montagem de um Magnetômetro do tipo Fluxgate de núcleo saturado em barra linear no Laboratório de Magnetosferas no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT.

No Capítulo 3 é abordado um estudo físico do Campo Geomagnético e de suas componentes para uma maior compressão da medida física medida pelo instrumento.

O Capítulo 4 se baseia na teoria da instrumentação de magnetômetros mostrando equacionamento e métodos de detecção do Campo Geomagnético.

Para finalizar o principal Capítulo, o 5, mostra as primeiras etapas da construção do instrumento, com os estágios ilustrados e explicados para se conseguir uma melhor implementação do magnetômetro fluxgate.

---

## CAPÍTULO 2

### ATIVIDADES DO BOLSISTA SANDRO F. BERTAGNOLLI

Durante o Projeto na área de instrumentação de magnetômetros, desenvolvido no Laboratório de Magnetosferas do CRS/CIE/INPE-MCT e no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE-MCT, o bolsista desenvolve e participa das seguintes atividades:

- O Bolsista Sandro F. Bertagnolli estudou o relatório de estágio com o título: Desenvolvimento de Instrumentação para medidas Geomagnéticas – Magnetômetro de Núcleo Saturado-, realizado pelo ex-colega Eduardo Andrighetto, o qual foi substituído no Projeto e bolsa para dar continuidade aos trabalhos na área de instrumentação geomagnética (dezembro de 2005).
  - O Bolsista começou a fase de montagem de um novo protótipo de Magnetômetro de núcleo saturado linear Fluxgate em bancada no Laboratório de Magnetosferas no CRS/CIE/INPE – MCT.
  - Participou de Congressos e Seminários apresentando o instrumento já implementado pelo Engenheiro Eduardo Andrighetto.
  - Familiarizou-se com programas que ajudaram na montagem do circuito proposto e realizou cursos sobre programa de aquisição de dados, tais como IDL.
  - Participou de atividades relacionadas ao instrumento, de auxílio na instalação de outros tipos de magnetômetros da parceria Japão – Brasil no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT.
-

# CAPÍTULO 3

## ESTUDO FÍSICO

### 3.1 FUNDAMENTOS GEOFÍSICOS

#### 3.1.1 – Campo Magnético Terrestre

O Planeta Terra é envolvido por um grande campo o qual apresenta importantes características magnéticas. Como exemplo, pode-se citar a orientação da agulha de uma bússola ilustrando assim uma classe de fenômenos geofísicos referente a esse campo. Um outro fenômeno magnético que pode ser citado é a grande atração que alguns minerais, como a magnetita, tem um pelo outro. O estudo destes fenômenos representa respectivamente as ciências do Geomagnetismo e Magnetismo.

Deste campo, 99% do seu total é conhecido com Campo Principal do Campo Geomagnético, e supostamente é originado por correntes elétricas que circulam na parte líquida do núcleo da Terra. O resto do Campo Geomagnético é considerado como fruto de correntes elétricas presentes nas regiões ionizadas ao redor do planeta.

#### 3.1.2 – Elementos do Campo Geomagnético

Podemos dizer que o Campo Geomagnético é um campo vetorial, já que provoca a orientação da agulha de uma bússola a uma determinada direção, com magnitude, direção e sentido. A intensidade total do vetor magnético representado pela letra (F) é independente do sistema de coordenadas, mas é comum representá-lo alinhado com as direções geográficas no sistema.

A Figura 3.1 mostra o vetor total do Campo Geomagnético (F) e suas três componentes X, Y e Z.

---

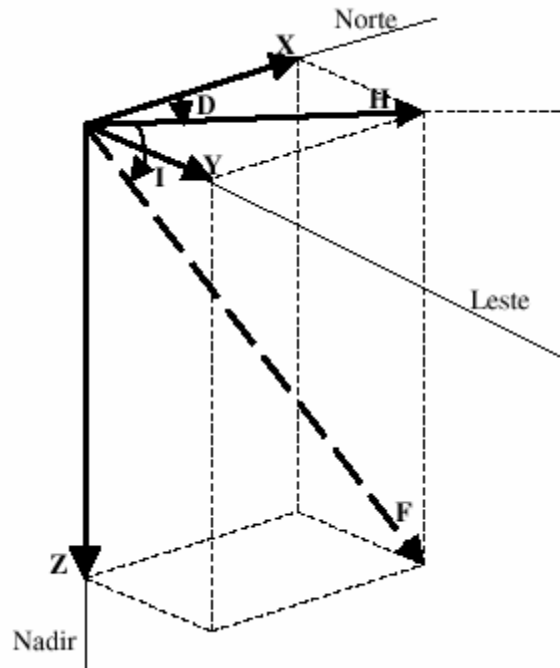


Figura 3.1 – Elementos do vetor magnético

FONTE: Maria José Faria Barbosa, 2003

**Elementos lineares:**

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

$Y$  – componente magnética leste (positiva para leste);

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

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

$F$  – intensidade total do campo magnético num determinado ponto.

**Elementos angulares:**

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

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

A função de um observatório magnético é monitorar o Campo Geomagnético e suas variações nas suas três direções, componentes  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  embora em muitas estações sejam feitas medidas das componentes  $H$ ,  $D$ , e  $Z$ .

### 3.1.3 – Magnetosfera

Quando um fluxo de plasma encontra uma região com campo magnetizado, há uma tendência entre eles de confinarem-se um ao outro, e assim o fluxo delimita o campo magnético ao redor do objeto ao qual ele é criado. A região em torno do campo tende a excluir o plasma, criando assim um buraco ou cavidade que é determinado pela densidade de energia do fluxo de plasma e o grau de magnetização do objeto. Assim acontece com o Planeta Terra, originando dentro da cavidade criada a Magnetosfera e na superfície externa dessa região a Magnetopausa. Tipicamente, na parte frontal, lado diurno, a Magnetopausa alcança uma distância aproximada de 11 raios terrestres,  $1 RT \cong 6371$  km, do centro da Terra; na lateral, chega em torno de 12 e 15  $RT$ ; e no lado noturno, ela se estende até 500  $RT$  ou mais.

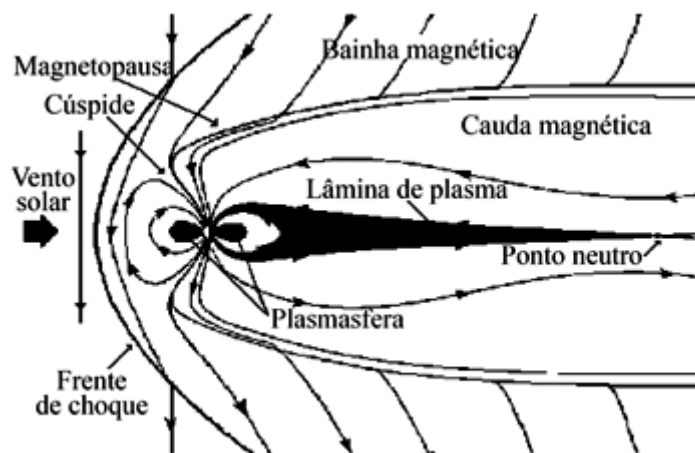


Figura 3.2 – Interação Sol Terra

FONTE: [WWW.oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere](http://WWW.oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere)

A Magnetosfera assemelha-se a cauda longa de um cometa. A dimensão da cavidade depende da intensidade do vento solar, embora grandes variações nessa intensidade, produzam, comparativamente, pequenas mudanças no tamanho da

---

*Relatório Final de Atividades*

Magnetosfera. Na Magnetosfera, próximo a Terra, muitos processos naturais importantes são dominados pelo Campo Geomagnético, fora da Magnetopausa o controle é exercido pelo Campo Magnético Interplanetário. O Campo Geomagnético influencia fortemente a dinâmica do gás ionizado e das partículas eletricamente carregadas. Na parte mais interna da Magnetosfera, acima de 50 e até uns poucos milhares de quilômetros, existe a região chamada Ionosfera. Até pontos afastados de aproximadamente 4 RT o plasma terrestre gira junto com as linhas de campo geomagnético e essa região é a Plasmasfera, cuja superfície que a delimita é chamada de Plasmopausa.

**3.1.4 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)**

Quando a AMAS foi descoberta, no final da década de 1950, sua localização se dava principalmente sobre o Atlântico Sul, por isso foi denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

Esta região com uma forma oval se caracteriza pela diminuição da intensidade do Campo Magnético Terrestre. O menor valor do campo atualmente está sobre o Sudeste brasileiro, cerca de 700 km da costa. As linhas geomagnéticas dessa região podem ser vistas ilustrativamente como uma superfície de borracha deformada pela ação de uma esfera pesada sobre ela. Essa anomalia no Campo Magnético é causada pelo fato do seu centro magnético não estar localizado no centro do núcleo terrestre, gerando um campo mais fraco na região do Atlântico Sul. Assim, de forma semelhante à região auroral, as partículas eletricamente carregadas penetram com mais facilidade na região da AMAS, atingindo camadas mais profundas da atmosfera, tornando essa região uma das mais vulneráveis do planeta aos efeitos das partículas energéticas e radiações.

---

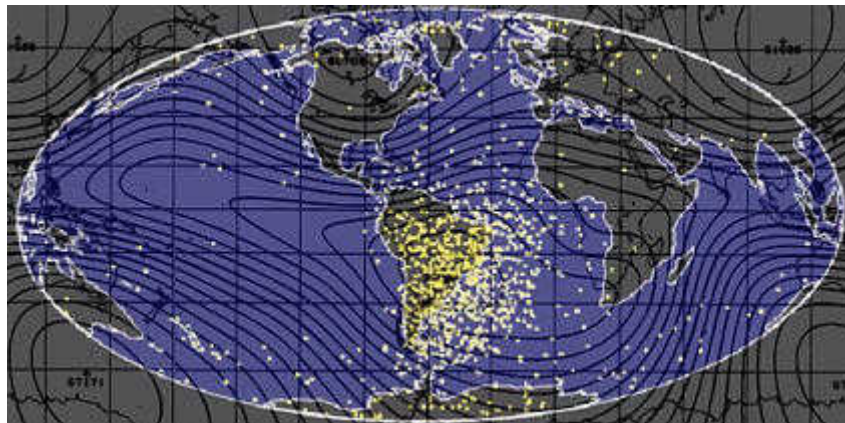


Figura 3.3 – Identificação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS

FONTE: [astro.if.ufrgs.br/esol/explorsol.htm](http://astro.if.ufrgs.br/esol/explorsol.htm)

Fazer previsões precisas do Campo Geomagnético, com o passar do tempo é praticamente impossível. Porém, analisando as mudanças que estão ocorrendo no Campo Geomagnético é possível estimar o comportamento mais provável do campo geomagnético no futuro.

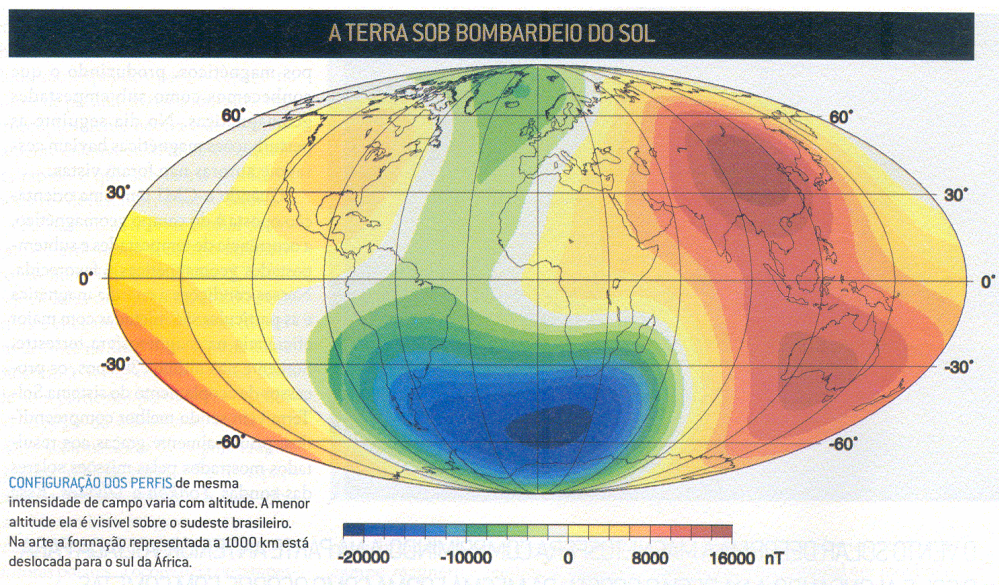


Figura 3.4 – Configurações dos perfis de mesma intensidade de campo magnético

FONTE: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23



### 3.1.5 – Campo Principal

O campo magnético em qualquer local próximo do Planeta Terra pode ser atribuído a uma combinação de quatro fontes, localizadas respectivamente no núcleo da Terra, na crosta da Terra, na Ionosfera da Terra e Magnetosfera e na contribuição devido a correntes induzidas na crosta. A magnitude do Campo Geomagnético é de aproximadamente 60.000 nT nos pólos e aproximadamente 30.000 nT no equador.

Considera-se que o manto da Terra, que é sólido e vai desde a base da Crosta até uma profundidade aproximada de 2893 km deve ser livre de fontes e que não contribui com o Campo Geomagnético. Sua temperatura, acima da temperatura Curie, temperatura acima da qual os materiais perdem suas propriedades magnéticas, elimina a possibilidade de que processos de geração de campo magnético possam ocorrer, pois os efeitos ferromagnéticos não estão presentes nesta camada da Terra.

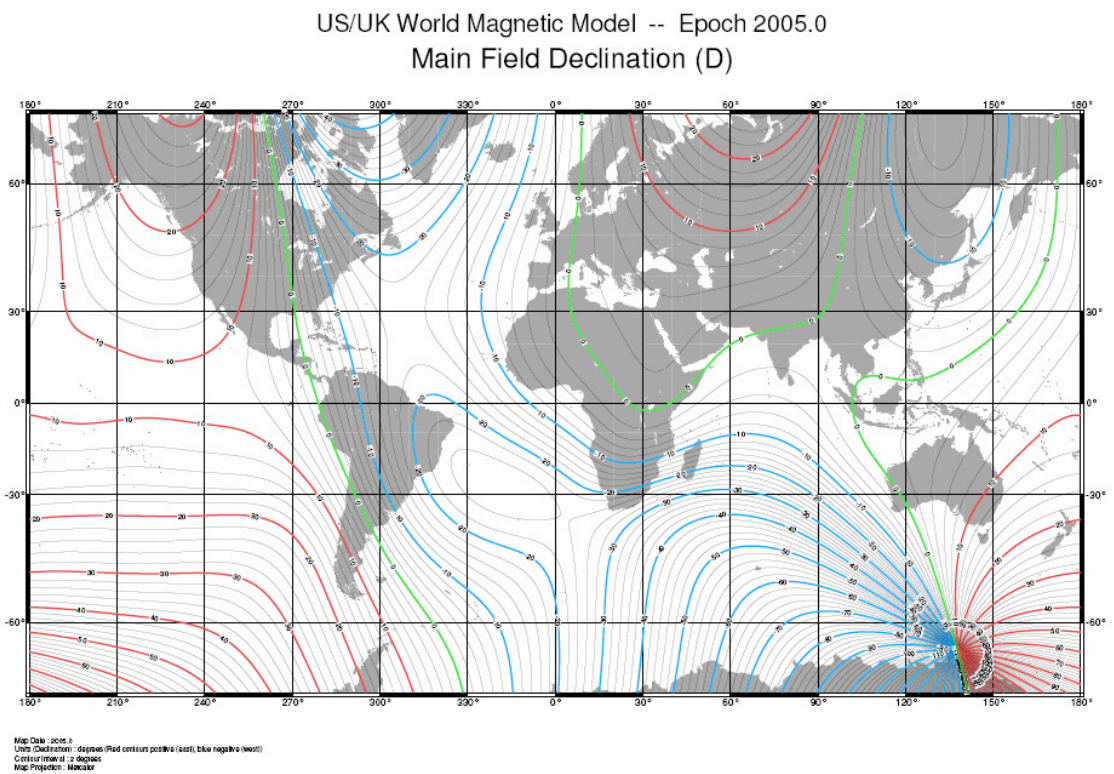


Figura 3.5 – Carta Magnética Mundial, 2005

FONTE: [www.mission-planning.com/Jan05\\_News.htm](http://www.mission-planning.com/Jan05_News.htm)

*Relatório Final de Atividades*

O Campo Geomagnético não é estável, apresentando variações temporais e espaciais com amplitudes muito inferiores à do campo magnético gerado no núcleo, em várias ordens de grandeza.

As variações geomagnéticas são classificadas em:

- Seculares, para períodos maiores que de um ano;
- Diurnas, para período de 24 horas;
- Distúrbios, quando associados a tempestades magnéticas e com períodos bastante variáveis;
- Pulsações, para períodos entre 0,2 e 1000s;
- Atmosféricas, quando períodos inferiores a 1 s;
- Produzidas pelo homem.

Sendo que as variações seculares são as únicas com origem interna ao Planeta Terra.

### **3.1.6 – Variações Diurnas**

A variação diária é causada principalmente pelas correntes fluindo na ionosfera, onde o movimento devido aos ventos e marés na atmosfera resulta na ação do dínamo, gerando campos e correntes na ionosfera. Estas variações apresentam dependência com a latitude, estação e com o ciclo solar, período de 11 anos. Em dias de pouca atividade solar, Sol calmo, ela é chamada de Variação Diurna do Campo Geomagnético ou variação *Solar Quiet*, Sq, que apresenta uma magnitude para o campo magnético na faixa desde algumas dezenas até várias centenas de nanoteslas.

---

# CAPÍTULO 4

## Estudo Instrumental

### 4.1 - INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS

#### 4.1.1 – Classificação dos Magnetômetros

Uma distinção básica está entre os equipamentos que efetuam medidas absolutas (magnetômetros) e os que efetuam medidas de variações do campo magnético (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]. Outra diferença fundamental está na natureza da medida. Instrumentos escalares medem o campo magnético sem apresentar uma referência de direção (ou seja, medem sua magnitude), enquanto os instrumentos vetoriais medem o campo em uma determinada direção (medem uma componente). Outras diferenças podem ser utilizadas para classificação, porém a maneira mais comum de classificação é aquela que leva em conta os princípios físicos envolvidos na medida. Os sensores magnéticos podem ser classificados em 5 grupos, segundo seus princípios físicos. A Tabela 1.1 apresenta esta classificação [Jacobs, 1987, p. 66–67]:

**Tabela 4.1 Classificação dos Sensores Magnéticos segundo seus principio físicos.**

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

Estes sensores foram sendo desenvolvidos de maneira a se adequar às necessidades de medidas nas diferentes faixas do espectro geomagnético. Para a captação das medidas do campo magnético visado, foi utilizado o magnetômetro fluxgate de núcleo saturado.

#### **4.1.2 – Magnetômetros Fluxgate**

##### **4.1.2.1 – Princípio de Funcionamento**

O aparecimento de uma força eletromotriz induzida, gerada pela variação do fluxo magnético, é largamente usada na detecção de campos magnéticos. Seja um campo magnético  $H_{\text{ext}}$  que se queira medir:

Colocando uma bobina com um núcleo ferromagnético imerso nesse campo, as linhas de campo se concentram ao passarem pelo núcleo devido a sua alta permeabilidade magnética. No entanto, nenhuma força eletromotriz é gerada, devido ao fluxo magnético ser constante. Nota-se, portanto, a necessidade de se ter variações nesse fluxo para se conseguir alguma medida.

A variação do fluxo magnético pode ser espontânea, se o campo que se queira medir for variável no tempo, ou provocada, onde pode ser feita a variação do fluxo indiretamente, ou pela variação da permeabilidade magnética do meio, ou pela variação da área por onde atravessam as linhas de campo. Pode-se, por exemplo, rodar uma espira num campo estático que se queira medir, a tensão induzida será proporcional ao campo, área da espira e frequência de rotação. Esses tipos de magnetômetros são conhecidos como Rotativos de Indução, e não são usados hoje em dia, para medidas de campo magnético.

Outra possibilidade de termos variações do fluxo magnético consiste em variar a permeabilidade do meio que é circundado pela bobina, o núcleo. Em outras palavras, variar a permeabilidade do núcleo da bobina.

Os magnetômetros de núcleo saturado são dispositivos que medem a magnitude e direção de campos magnéticos. São capazes de medir campos estáticos ou

---

*Relatório Final de Atividades*

alternados e tem seu funcionamento baseado nas propriedades de saturação de ligas magnéticas moles, que possibilitam o chaveamento do fluxo magnético, devido à variação da permeabilidade magnética do material usado como núcleo. Se o núcleo tiver alta permeabilidade, o campo externo será canalizado para dentro dele e o fluxo que atravessa a espira será muito grande. Se por alguma razão a permeabilidade do meio diminuir repentinamente, o campo deixará de se concentrar dentro da espira e o fluxo total diminuirá. Nesse instante, a variação de fluxo provoca uma tensão induzida, proporcional ao campo externo a que se queira medir.

O controle da permeabilidade do material é possível através de um campo magnético adicional, denominado campo magnético de excitação, gerado a partir de um enrolamento de excitação ou simplesmente enrolamento primário. Acontece que, quando não há corrente passando no primário, a permeabilidade do núcleo é a própria permeabilidade do material, que pode atingir valores altíssimos para materiais ferromagnéticos.

Se uma corrente suficientemente alta é aplicada no primário de tal forma a gerar um campo magnético  $H$  maior que o campo magnético de saturação do material  $H_s$ , então a permeabilidade do núcleo decresce para valores próximos ao da permeabilidade do vácuo, como se o núcleo tivesse desaparecido do interior da bobina.

Envolvendo todo o conjunto, bobina de excitação e núcleo, existe um enrolamento denominado “bobina detectora” ou simplesmente enrolamento secundário. Ela é a responsável pela detecção da variação do fluxo magnético. 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 fase de cada um dos harmônicos do sinal presentes nos secundário, são proporcionais à magnitude e à polaridade do campo magnético externo presente ao longo do eixo do enrolamento secundário.

---

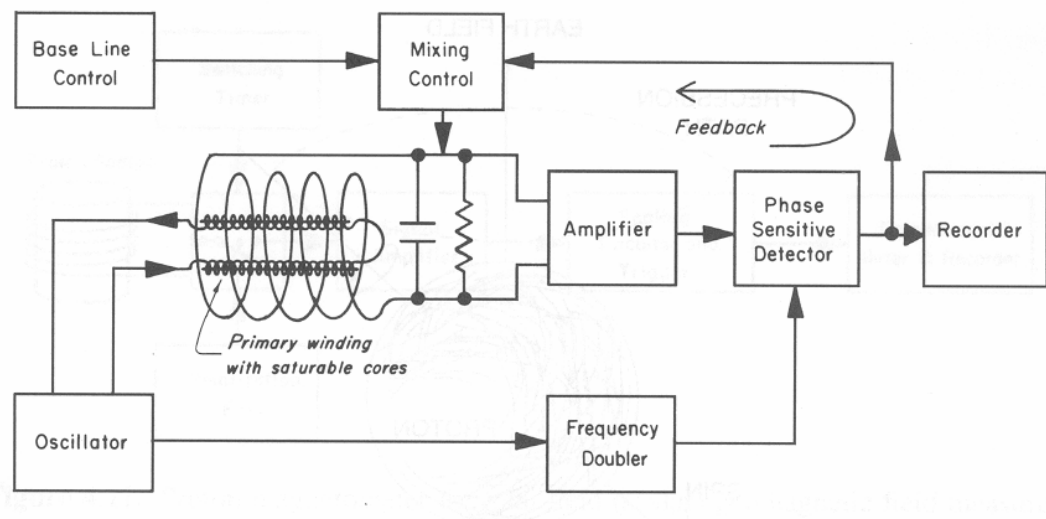


Figura 4.1 – Magnetômetro Fluxgate para medida direcional do Campo Geomagnético

FONTE: Campbell, 1997

#### 4.1.2.2 – Ferromagnetismo

O ferromagnetismo é uma propriedade que aparece em certos materiais que têm magnetização mesmo sem campo magnético aplicado. Estes materiais são chamados de ferromagnéticos. O ferromagnetismo tem origem nos momentos magnéticos atômicos dos ferromagnéticos que naturalmente tendem a alinhar-se numa mesma direção, deste modo, fornecendo uma magnetização permanente. Acima de uma determinada temperatura (temperatura Curie) este alinhamento é destruído e conseqüentemente desaparece o ferromagnetismo e o material se torna paramétrico, não existe magnetização espontânea só aparecendo com aplicação de um campo externo.

Diversos materiais são ferromagnéticos, dentre muitos se destacam o ferro, o níquel, o cobalto e o gadolínio, e algumas ligas destes materiais tais como: cobre, cromo, alumínio, e manganês.

A permeabilidade magnética, quociente do módulo da indução magnética num material pela intensidade do campo magnético aplicado:  $\mu=B/H$  – no SI tem a unidade de  $Tm/A$  e depende do campo magnético externo. Para campos suficientemente

*Relatório Final de Atividades*

grandes ela atinge valor máximo e o material é dito saturado. A curva  $B \times H$ , histerese ferromagnética, tem uma forma característica e é própria de cada material.

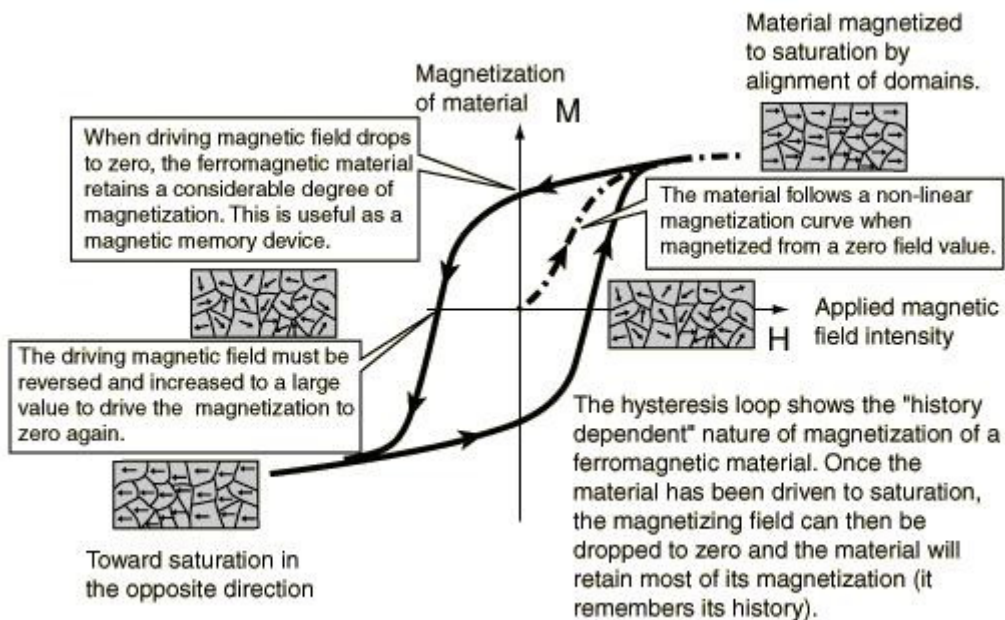


Figura 4.2 – Histerese ferromagnética  $B \times H$

FONTE: <http://www.hesston.edu/academic/faculty/nelsonk/PhysicsResearch/HardDrive/paper.htm>

Através da histerese ferromagnética algumas grandezas físicas dos materiais podem ser determinadas, tais como: indução remanescente  $B_r$ , campo coercitivo  $H_c$ , permeabilidade magnética  $\mu$ , campo de saturação  $H_s$ , susceptibilidade magnética  $\chi$ , e a energia  $E=BH$ .

#### 4.1.2.3 – Geometria dos Sensores

Embora todos os magnetômetros façam uso das propriedades não lineares de um núcleo magnético, como princípio de funcionamento básico, para cada geometria do

sensor a ser utilizado bem como forma de excitação e detecção existe uma teoria de operação a ser considerada.

#### 4.1.2.3.1 – O Núcleo linear

Um sensor construído sobre um núcleo linear consiste na configuração mais simples a ser encontrada em magnetômetros fluxgate. Basicamente, é formado pela bobina de excitação enrolada sobre uma pequena barra linear de um material ferromagnético, juntamente com a bobina detectora. Dessa forma, a bobina primária irá saturar periodicamente o núcleo ao ser excitada fazendo com que a bobina secundária induza pulsos a cada período de saturação do núcleo.

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 na bobina secundária do sensor para o primeiro caso onde a bobina de excitação não está saturando o núcleo é dado por:

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

Onde, 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:

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

Logo:

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

Para o segundo caso, onde a bobina de excitação está saturando o núcleo do sensor, temos dois campos atuando sobre ele. Tem-se o campo provocado pela bobina primária  $H_s$  e mais o campo externo  $H_{ext}$ .

---



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

E como sabemos que, para a curva de histerese de um material ferromagnético, Figura 3.2, um aumento na intensidade do campo  $H_s$  não provoca aumento na densidade do campo saturado  $B_s$ , já que estamos trabalhando na região não linear da curva. Ou seja, aplicando  $H_s$  resulta  $B_s$  e logo se aplicarmos  $H_{ext}+H_s$  também teremos  $B_s$  como resultado.

Portanto, tirando a diferença entre os fluxos nos dois instantes analisados obtém-se:

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

A partir daí se obtém a força eletromotriz induzida na bobina detectora.

#### 4.1.2.3.2 – O Núcleo em Anel

A grande vantagem de se usar um sensor fluxgate composto por um núcleo em anel é o de ter um caminho magnético fechado, reduzindo assim os efeitos desmagnetizantes. Além disso:

- As tensões internas do material são uniformemente distribuídas;
  - Permite a correção da assimetria do núcleo, pela sua rotação dentro da bobina do secundário;
  - Não existem efeitos de borda, geralmente associados com regiões de aumento de ruído;
  - Consegue-se saturar o núcleo mais rapidamente devido ao circuito magnético de excitação ser fechado;
-

#### 4.1.2.4 – Equacionamento do Sensor

Um corpo finito e arbitrário é associado a uma distribuição de magnetização volumétrica  $M$ . Se o corpo também estiver magnetizado por um campo externo  $H_{ext}$ , o campo total será:

$$H = H_{ext} + H_M \quad (4.6)$$

Onde,  $H_M$  é o campo devido à magnetização. Se assumirmos que toda a magnetização pode ser induzida temos uma relação linear:

$$M = \chi H \quad (4.7)$$

Onde a susceptibilidade é uma característica de cada material. E como:

$$H_M = -DM \quad (4.8)$$

Onde  $H_M$  e  $M$  são ambos homogêneos e paralelos ao eixo principal e ao campo externo  $H_{ext}$ .

Das equações (4.6), (4.7) e (4.8) podemos escrever que:

$$H_M = -\frac{D\chi}{1 + \chi D} H_{ext} \quad (4.9)$$

A equação (4.9) mostra que  $H_M$  é proporcional a  $H_{ext}$  e tende a desmagnetizá-lo. Assim,  $H_M$  é chamado de campo desmagnetizante e  $D$  é o fator de desmagnetização que sofre grandes variações de acordo com a geometria do sensor. O campo  $H$  interno ao sensor é:

---

$$H = \frac{H_{ext}}{1 + xD} \quad (4.10)$$

Usando a relação  $B = \mu_0(H + M)$  encontraremos:

$$B = \mu_0 \frac{1+x}{1+xD} H_{ext} = \frac{\mu_0 \mu_r}{(1+D(\mu_r - 1))} H_{ext} \quad (4.11)$$

Onde

$$\mu_r = 1 + x \quad (4.12)$$

Da equação (4.11) define-se a permeabilidade relativa aparente ( $\mu_a$ ) como sendo:

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{(1 + D(\mu_r - 1))} \quad (4.13)$$

Reescrevendo  $B$ , vem:

$$B = \mu_0 \mu_a H_{ext} \quad (4.14)$$

Portanto, se num núcleo de um material ferromagnético com uma bobina primária de  $N$  espiras, um campo externo ( $H_{ext}$ ) surgir ao longo do seu eixo, produzirá um fluxo  $BA$  na sua seção transversal  $A$ . Assim, se variarmos o fluxo da permeabilidade  $\mu_r$  do material, isso fará com que varie o fluxo total ( $\varphi = BA$ ) e assim será induzida a tensão na bobina sensora da seguinte forma:

$$V_{sec} = nAdb/dt \quad (4.15)$$

---

Inserindo a equação (4.11) em (4.15) temos a tensão induzida na bobina detectora que é a base para o magnetômetro fluxgate.

$$V_{\text{sec}} = \frac{nAB}{(1 + D(\mu_r - 1))^2} \frac{d\mu_r}{dt} \quad (4.16)$$

#### **4.1.3 – Métodos de Detecção**

Um dos métodos de detecção 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. Na detecção por pico usa-se o 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.

O magnetômetro usando a excitação de pulsos curtos mostrou que há determinados intervalos onde a tensão de saída é altamente sensível à presença do campo magnético axial.

Usa-se também o método de atraso de fase partindo 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.

O instrumento de loop aberto baseado no princípio da diferença de fase de pico, é usado onde necessita-se de baixa potência e simplicidade.

##### **4.1.3.1 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado**

Nestes magnetômetros, o sensor é usado como um detector de campo nulo colocado dentro de uma bobina de cancelamento de campo. A vantagem de se usar esta

---

*Relatório Final de Atividades*

técnica de balanceamento é que o nulo é muito mais estável do que o sensor com uma saída qualquer para algum campo axial diferente de zero.

Como em sensores reais o desacoplamento entre a bobina de excitação e a bobina sensora não é ideal, aparecem grandes componentes da frequência fundamental e seus harmônicos ímpares da corrente de excitação realimentada. Também ocorre um alto ripple na saída do detector de fase, podendo os harmônicos ímpares causar, para altos ganhos, a saturação dos amplificadores e em outros casos gerar apenas uma tensão de offset. Por isso introduz-se um filtro banda passante sintonizado no segundo harmônico da frequência de excitação, antes do detector de fases. Dos harmônicos pares, o segundo harmônico dá a maior estabilidade.

#### **4.1.3.2 – O Sensor e a Bobina de Realimentação**

Pode-se usar a bobina detectora (secundário) para gerar o campo de realimentação, porém há vantagens em se fazer a realimentação por uma bobina separada, porque:

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

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

---

Uma das maneiras de solucionar esses problemas é colocar os sensores num campo nulo de três eixos constante para evitar os efeitos de magnetização de campos transversais de outros sistemas de nulo, outros eixos.

#### **4.1.3.3 – Magnetômetro Fluxgate Curto Circuitado**

Nos magnetômetros fluxgate convencionais, a saída da bobina detectora é 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. Primdahl et al. (1989) introduziram outro método de acoplamento, curto-circuitando a bobina detectora com um conversor tensão-corrente de baixa impedância. A amplitude dos pulsos de corrente é linearmente dependente do campo medido e teoricamente independente dos parâmetros da excitação, assumindo que a corrente de excitação é grande o suficiente para saturar completamente o núcleo.

#### **4.1.3.4 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado**

O sensor fluxgate, consiste de um fluxo ferromagnético 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, onde o núcleo perde a maior parte de sua permeabilidade magnética duas vezes a cada ciclo da excitação. A geometria núcleo/secundário é aberta aos campos magnéticos externos. Já o circuito primário de excitação é fechado e desacoplado do secundário. Uma tensão alternada com segundo harmônico e também harmônicos pares de ordem mais alta ( $4f$ ,  $6f$ ,  $8f$ , etc.) da frequência de excitação é induzida na bobina secundária, pelo 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

---

*Relatório Final de Atividades*

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 distingue entre um verdadeiro campo externo, e 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. Se o sensor é 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).

O efeito atinge mais do que o ganho, bem conhecido num circuito de alto  $Q$ , isto é, uma amplificação paramétrica, como primeiramente analisada por Serson e Hannaford (Serson e Hannaford, 1956) e para circuitos de perdas suficientemente pequenas, a saída do sensor torna-se instável. Eles explicam a amplificação paramétrica e instabilidade pela consideração do efeito de corrente no secundário no instante de saturação do núcleo, quando o sensor é mais sensível ao campo externo.

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:

- Mudanças nas curvas 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 introduz ruídos adicionais na saída do sinal. Como o ruído do sensor não sintonizado é de uma a duas ordens de grandeza maior do que o ruído de entrada de um filtro/amplificador, então a relação sinal/ruído de um sensor não sintonizado será superior a que 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 simples filtrar e deixar maior o sinal vindo do secundário.

#### **4.1.3.5 – Magnetômetro de Harmônicos Pares**

Com uma configuração de um magnetômetro curto-circuitado, Primdahl (Primdahl et al.,1989) construiu e testou um magnetômetro usando como método de detecção todos os harmônicos pares. A justificativa parecia bastante razoável, já que seria usada toda a informação contida no sinal sobre o campo magnético externo e não somente a informação contida no segundo harmônico. Isso abriria a possibilidade desse tipo de detecção apresentar uma melhor razão sinal/ruído que a detecção de segundo harmônico.

O método de detecção por todos os harmônicos deveria ser melhor que o método de detecção de segundo harmônico, se o ruído em cada harmônico fosse completamente aleatório. 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. Mesmo que todos os componentes dos harmônicos pares carreguem mais informação sobre o campo medido, foi demonstrado que o método de detecção de segundo harmônico tem melhor relação sinal/ruído.

#### **4.1.3.6 – Ruído**

Para construir um bom sensor fluxgate, deve-se levar em conta a importância e possíveis causas do ruído. Como fatores necessários temos a estabilidade, a precisão, grande faixa de medida, offset (nulo ou muito baixo) e certamente baixo ruído. Geralmente o que encontramos são alguns fatores que degradam o sinal de saída a ponto de se tornar impróprio o seu uso para certas aplicações. O ruído de um núcleo magnético provém de três fontes:

---



*Relatório Final de Atividades*

- Ruído de Nyquist, também conhecido como ruído térmico ou ruído de Johnson, para uma temperatura  $T$  e uma corrente de magnetização  $I$  constantes;
- Ruído devido a mudanças na temperatura, com  $I$  constante;
- Ruído de Barkhausen, devido a mudança da corrente de magnetização.

Deve-se ter muito cuidado na escolha do material magnético com que é feito o núcleo, pois imperfeições no material causam ruído no sensor devido a magnetostricção e a incerteza da magnetização. O nível de ruído pode ser reduzido, usando uma corrente de excitação de alto pico. Chegou-se a conclusão que existem regiões dentro do material que oferecem uma maior resistência à magnetização, e por isso, correntes de excitação maiores são necessárias para magnetizá-las.

Além do material com que é feito o núcleo, a geometria do sensor também influi no ruído através do fator de desmagnetização. Com relação à frequência de excitação o ruído diminui se esta for aumentada até um certo limite, após isso com o aumento da frequência de excitação há um aumento do ruído. Componentes ruidosos ou aterramentos mal feitos podem deteriorar a resposta do fluxgate. Cuidados especiais na construção deste tipo de aparelho devem ser aplicados. Um mal enrolamento feito pode causar um acoplamento magnético entre a bobina detectora, secundário, e a bobina de excitação, primário, elevando o ruído a níveis muito acima do ruído térmico. Esse acoplamento faz com que o sensor se comporte como um transformador e parte do sinal da excitação é passada para a bobina detectora. Como no sinal de excitação pode conter harmônicos pares, isso causará o aparecimento de um offset sobreposto ao valor do campo detectado. Caso haja flutuação no sinal de excitação ou no acoplamento entre as bobinas, isso será interpretado como uma variação do campo externo.

Outra fonte de ruído é a fuga da linha de campo para fora do núcleo, que também produz um offset na saída do sensor e aumenta o ruído total. Ajustes por rotação do núcleo podem minimizar os efeitos de borda e o acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário. Um sinal de excitação com o mínimo de harmônicos pares ajuda a diminuir os efeitos do offset e do ruído total.

---

## CAPÍTULO 5

### Implementação do Magnetômetro Fluxgate

#### 5.1 – Caracterização do Sensor Magnético

Esta é a primeira etapa e a mais importante a ser considerada no projeto de um magnetômetro fluxgate. De acordo com o sensor que se escolhe para utilizar neste tipo de magnetômetro, são praticamente definidas algumas características básicas de operação para o circuito eletrônico.

O circuito eletrônico que é apresentado nesse capítulo é decorrência do fato de se ter escolhido um sensor linear para detectar o campo magnético. Dessa forma, para garantir uma boa saturação do circuito magnético presente no sensor, foi escolhida uma frequência de excitação na faixa de 1000 a 2000 Hertz, usando assim um cristal de oscilação no valor de 1.4KHz.

O sensor linear é constituído de uma barra ferromagnética com alta permeabilidade magnética e enrolada por três bobinas em que se compõem a excitação, a detecção e o feedback para a desmagnetização do núcleo, no caso do sensor implementado neste projeto, o enrolamento do feedback não foi utilizado.

Fotos do sensor linear e do arranjo mecânico utilizado para que se tenha medidas nas três direções do campo magnético, são apresentadas na Figura 5.1 e Figura 5.2.

O sensor que está sendo utilizado é fabricado por S.Smith & Sons (England) Ltd. e apresentou as seguintes indutâncias quando medidas em um 4275A Multi-Frequency LCR Meter fabricado pela Hewlett-Packard :

$$L_{\text{primário}} = 3,344\text{mH}$$

$$L_{\text{secundário}} = 430,10\text{mH}$$

---

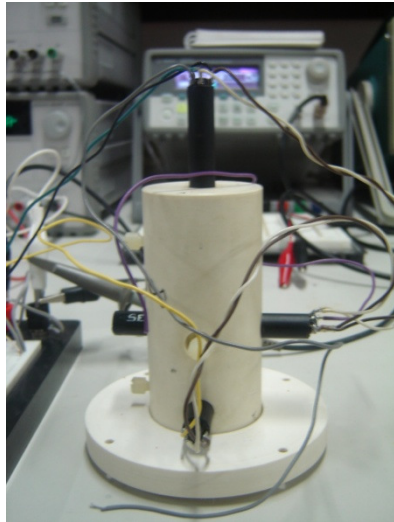


Figura 5.1 – Arranjo Vetorial



Figura 5.2 – Sensor barra linear

## 5.2 – Excitação da Bobina Primária

Para a excitação do sensor, escolheu-se uma frequência alta o suficiente para saturar o circuito magnético e que ficasse na faixa de frequências a que o este sensor melhor responde.

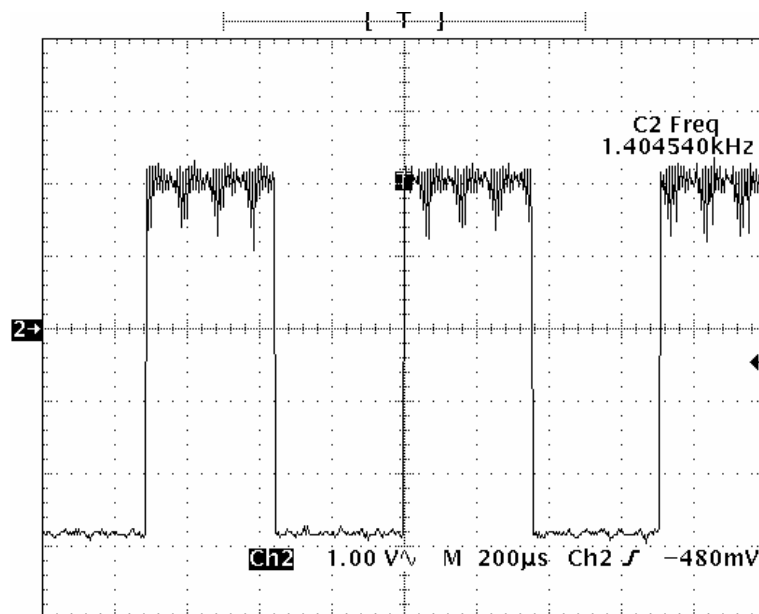


Figura 5.3 – Sinal ajustado pelo CI 4060 responsável pela excitação do primário

O circuito de excitação faz uso, assim, de um cristal oscilador de 1,44 Mhz acoplado a um divisor de freqüências, o CI 4060, que oferece em sua saída um sinal variante de 0V a 5V a 1,4 KHz. A Figura 5.3, mostra a medição em osciloscópio do sinal fornecido pelo CI 4060, sinal esse que será levemente modificado e irá excitar o primário.

Além disso, do CI 4060, é retirado o sinal com o dobro da freqüência da excitação ( $2f$ ), a fim de comparar com a freqüência da bobina sensora que da teoria sabe-se que fica por essa ordem. O sinal medido em osciloscópio da freqüência de referência para a comparação com o sinal gerado no secundário do sensor, a qual será usada mais adiante no circuito do magnetômetro, é apresentado na Figura 5.4.

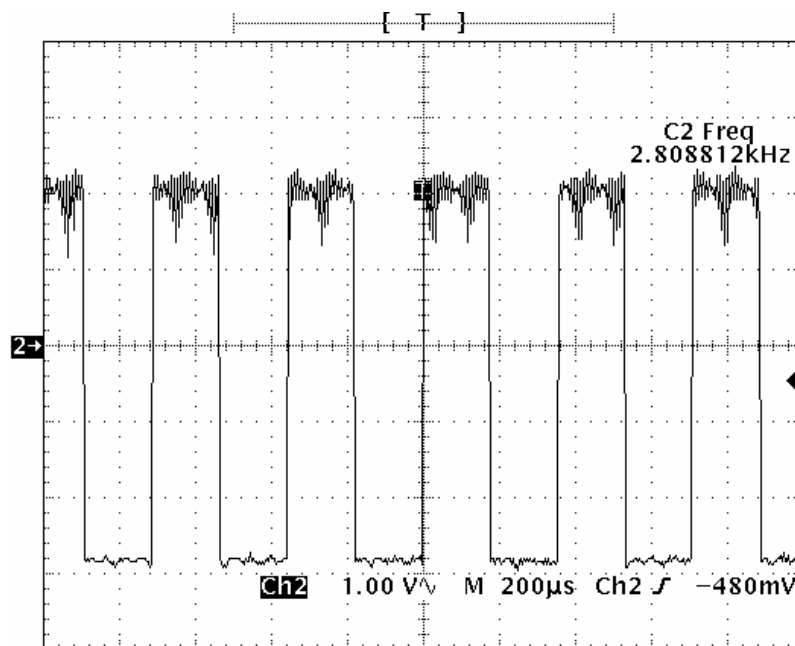


Figura 5.4 – Sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da freqüência de excitação

O sinal de excitação obtido do CI 4060 passa então, por um capacitor de desacoplamento contínuo de 1uF e é levado a um amplificador formado por um par de transistores que fornecem pulsos de corrente para a bobina primária e um sinal amplificado também. Nesse ponto, um capacitor é introduzido para que haja a formação

*Relatório Final de Atividades*

de pulsos de corrente curtos e intensos no circuito LC que se forma com a bobina primária. Assim, ganha-se em sensibilidade no sensor, já que o tempo de saturação do núcleo é muito curto comparado ao período do sinal e o valor RMS da corrente é muito baixo, diminuindo o aquecimento do núcleo e evitando componentes contínuas no primário.

A forma de onda da tensão final que excita o enrolamento primário do sensor magnético é apresentada na Figura 5.5.

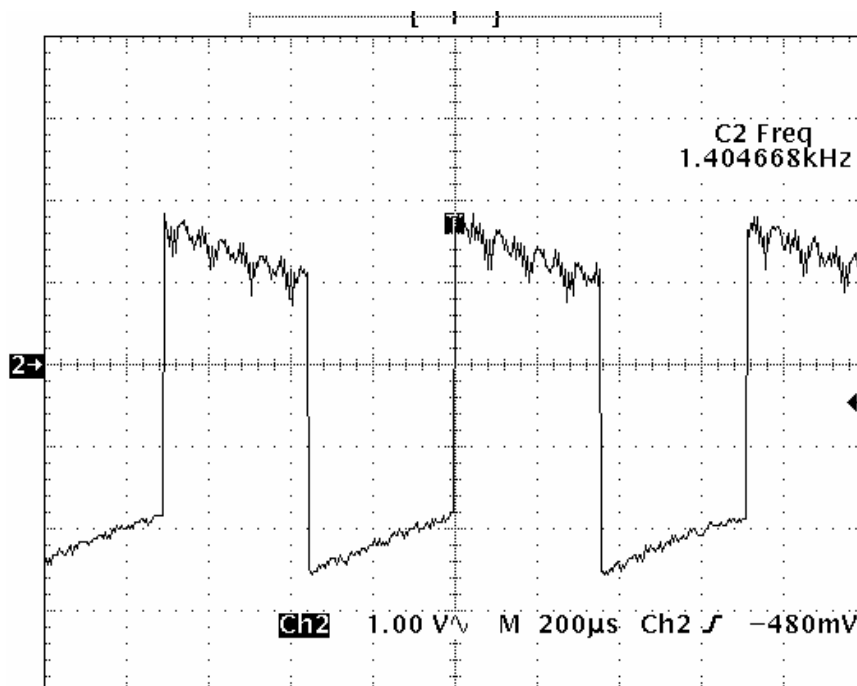


Figura 5.5 – Tensão sobre o enrolamento primário do sensor

A corrente consumida nessa fase do circuito é na base de 0.05<sup>a</sup>, corrente necessária para conseguir saturar o núcleo através do enrolamento primário.

Assim, ao final desta primeira etapa chega-se ao circuito de excitação completo e utilizado na implementação deste magnetômetro, ver Figura 5.6. Montado no software Orcad Family Release 9.2.

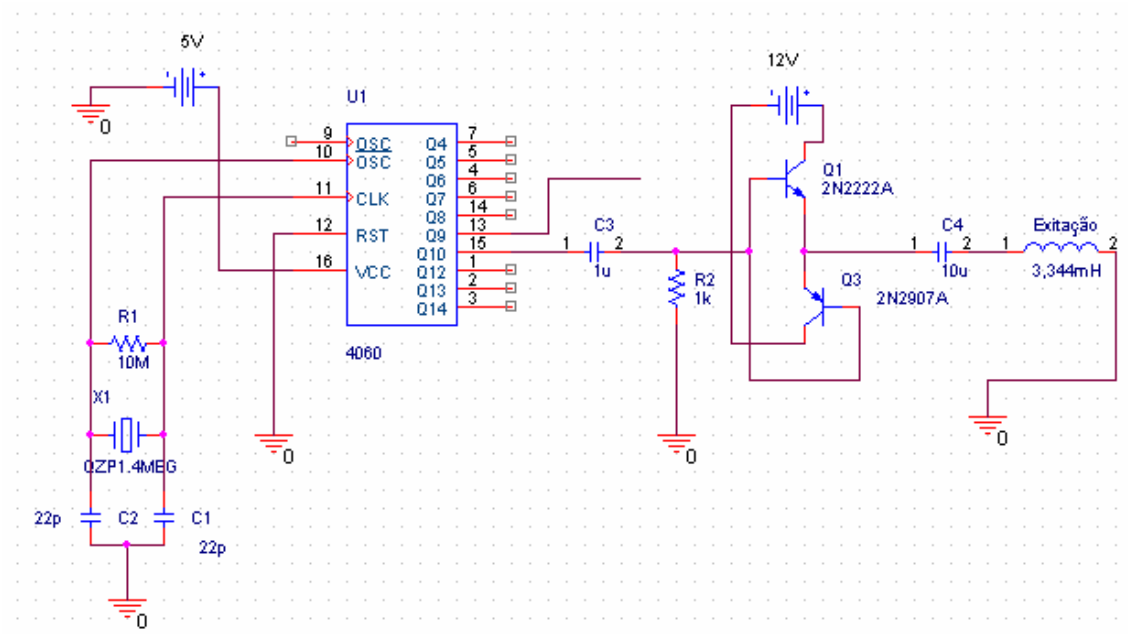


Figura 5.6 – Circuito de excitação completo utilizado.

### 5.3 – Processamento do Sinal

Esta etapa consiste em trabalhar o sinal induzido na bobina secundária para que ao final do processo se tenha um nível de tensão contínua na saída e que varie linearmente com o campo magnético ao qual o sensor está submetido.

Ao se medir o sinal de tensão no secundário, induzida pela variação da saturação do núcleo, percebe-se a variação da sua amplitude de acordo com o campo ao qual está sendo submetido. Então a fim de se conseguir um sinal mais real da realidade, aproximamos um celular, o qual emite um campo magnético forte e verificamos o sinal da Figura 5.7 e 5.8 concluímos que os pulsos de corrente que excitam o primário ora positivo ora negativo, induzem no secundário pulsos somente positivos ou somente negativos, dependendo da orientação do sensor.

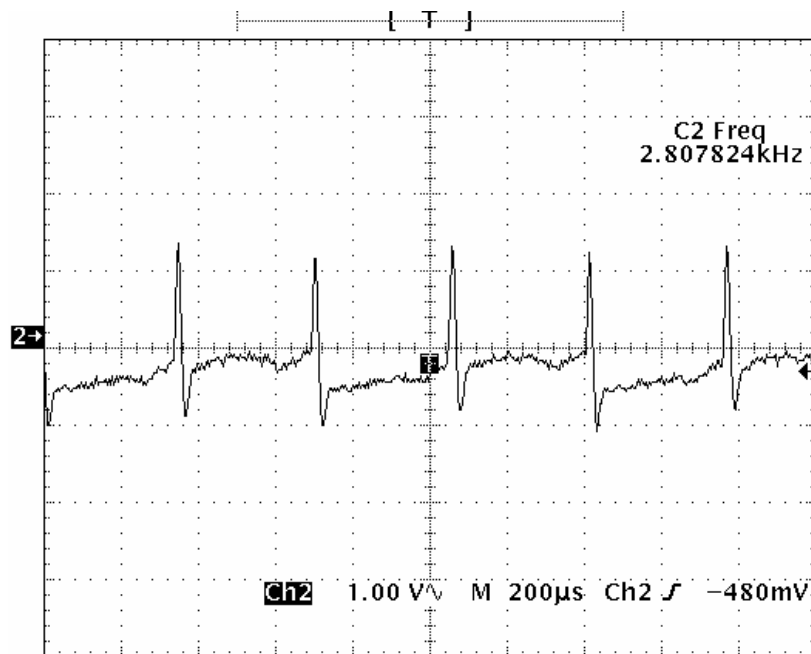


Figura 5.7 – Sinal de tensão induzida na bobina sensora positivo.

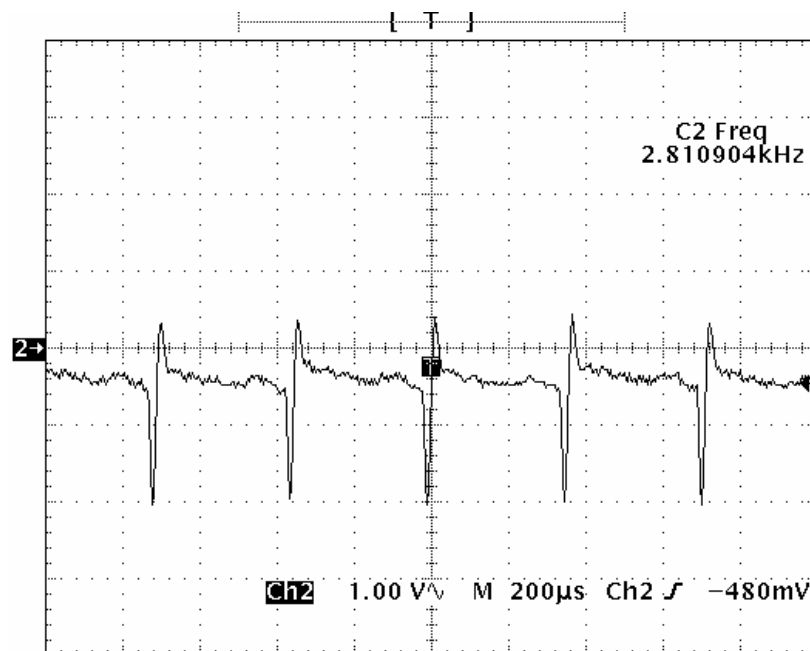


Figura 5.8 – Sinal de tensão induzida na bobina sensora negativo.

A Figura 5.9 mostra a relação entre a corrente da bobina de excitação e da bobina sensora respectivamente.

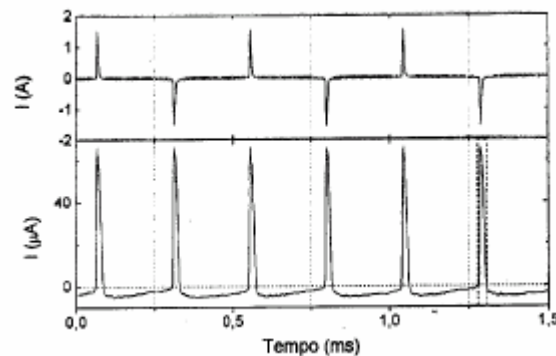


Figura 5.9 – Relação entre os pulsos de corrente da bobina primária e secundária  
 FONTE: Revista de Física Aplicada e Instrumentação. Vol.12, no. 2, junho, 1997

Baseado nessas informações, o circuito responsável pelo tratamento do sinal é exposto numa seqüência de estágios que ao final informa um nível de tensão contínuo que varia linearmente com o campo magnético, ao qual está submetido numa escala de 10000 nT para cada 1 Volt de sinal gerado no final.

### 5.3.1 – Primeiro Estágio: Circuito de Conversão – Corrente/Tensão

O circuito derivador também é usado na implementação de filtros RC ativos onde o capacitor bloqueia componentes contínuas e de baixa freqüência. Como o conteúdo do primeiro harmônico é bem maior que o do segundo harmônico é bom bloquear o primeiro, já que estamos interessados apenas no segundo harmônico.

O circuito pode igualmente ser analisado como uma montagem inversora de amplificadores operacionais em que uma das resistências é substituída pela impedância equivalente do capacitor  $C$ , de modo que:

$$V_{-} \approx V_{+} \approx 0V$$

$$i_1 = \frac{V_i}{Z_c} = I$$

$$i_1 = i_2$$



$$V_o = -RC \times \dot{V}_i \quad (5.1)$$

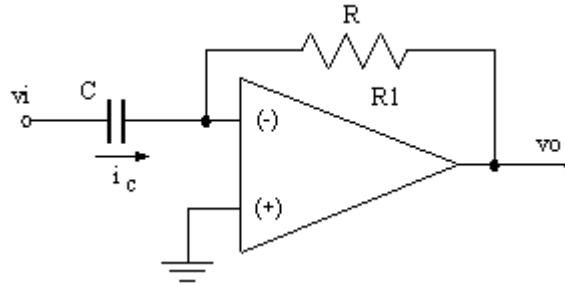


Figura 5.10 – Circuito derivador

Deste modo, a tensão de saída é proporcional à derivada da tensão de entrada em relação ao tempo. O ganho é  $-RC$  e neste caso a saída será simétrica à derivada do sinal de entrada.

Neste primeiro estágio podemos considerar que o capacitor de entrada do sinal da bobina sensora serve como um bloqueio para níveis contínuo de corrente e que o amplificador operacional inserido neste ponto curto-circuita esta bobina, em seu terra virtual indicado na Figura 5.10, e converte os pulsos induzidos de corrente para pulsos de tensão numa relação de  $R$  vezes a corrente instantânea.

Como o pulso de corrente induzido na bobina secundária é extremamente pequeno, se faz necessário uma grande amplificação de sinal já neste primeiro estágio. Assim sendo, é montado o circuito derivador apresentado na Figura 4.10, com amplificação de 30000 vezes  $i_0$ .

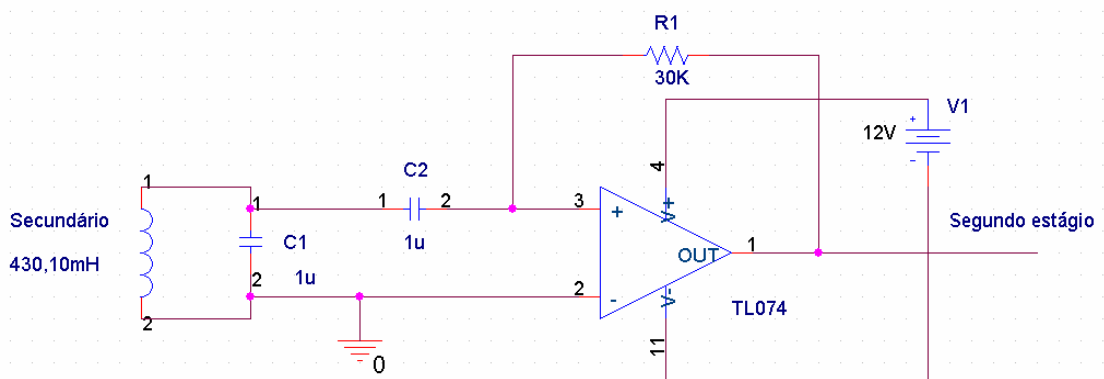


Figura 5.11 – Primeiro estágio implementado

O capacitor inserido em paralelo com o sinal proveniente da bobina sensora serve para a sintonia no segundo harmônico dos pulsos induzidos, como é recomendado por (Acuña and Pellerin). Abaixo consta a figura do sinal de tensão da saída do circuito derivador.

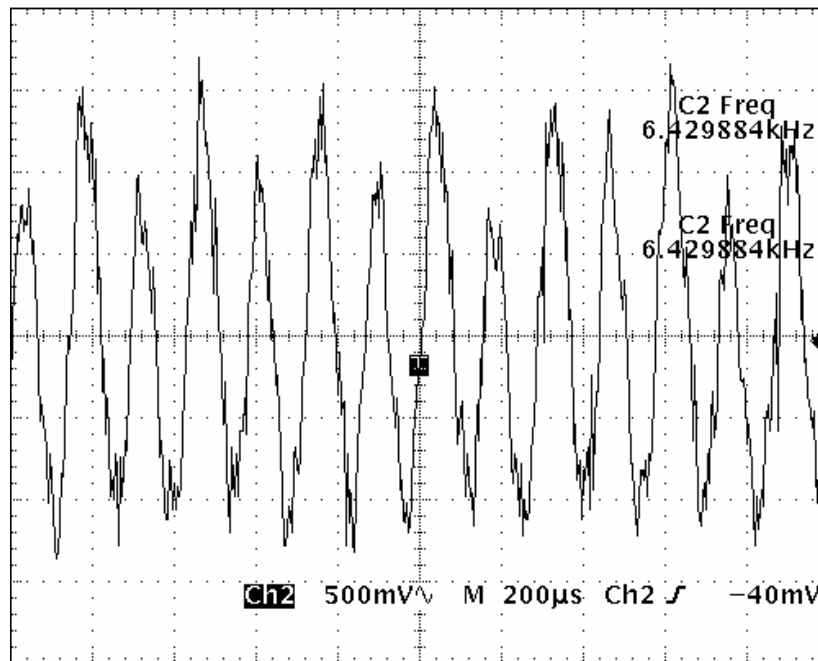


Figura 5.12 – Sinal de saída do circuito derivador para o segundo estágio

### 5.3.2 – Segundo Estágio: Multiplexador Analógico

Nesta etapa, utiliza-se um multiplexador analógico 74HC4053 com três canais para cada uma de duas entradas, a fim de obter nas suas saídas uma relação entre dois sinais de mesma frequência com características diferentes.

Neste circuito integrado, é inserido o sinal de  $2f$  fornecido pelo circuito de excitação da Figura 5.4 como referência de frequência para seus três canais de umas das entradas. Na outra entrada, cada um dos canais recebe o sinal vindo do circuito de primeiro estágio de cada um dos três sensores. E como se sabe este sinal vem, com o valor de  $f$  da excitação, alterado para  $2f$  na bobina secundária.

Assim sendo, o CI 74HC4053 é utilizado para gerar no seu par de saídas para cada canal, dois sinais distintos em que a frequência destes corresponde à segunda harmônica de cada um, já que esta harmônica é a que mais sofre alterações, influenciada pelo campo magnético.

A Figura 5.13 apresenta os sinais fornecidos ao próximo estágio onde se nota que as duas formas de onda têm o mesmo período, porém, com suas características diferenciadas. O CI 4053 detecta a diferença de fase entre os segundo harmônico vindo do secundário e o sinal de referência  $2f$ .

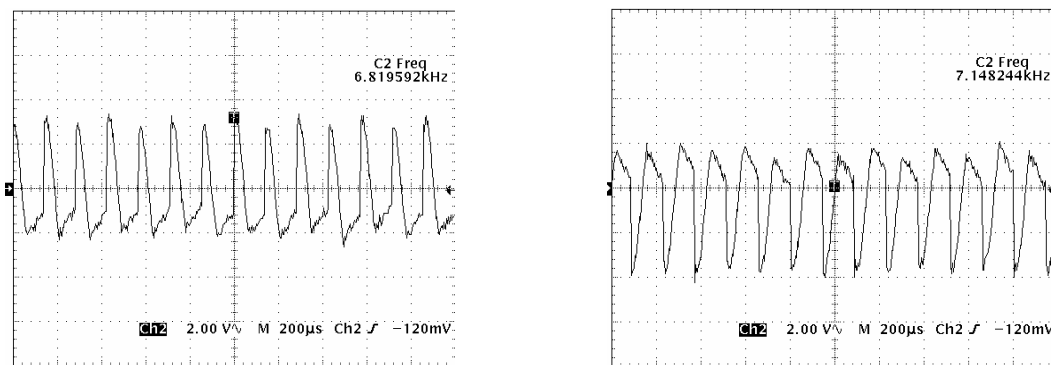


Figura 5.13 – Formas de onda obtidas em cada par das três saídas do CI 4053

Este é o principal elemento no processamento do sinal do sensor magnético, já que ele estabelece a variação do campo magnético quando este provoca a alteração no par diferencial da saída do CI 4053.

O funcionamento do CI 4053, onde, à esquerda estão as entradas para o sinal de referência e à direita as entradas para cada um dos três sensores é apresentado nas Figuras 5.14. Acima, obtém-se o par de saídas para cada comparação com as características de cada entrada que vão seguir para o terceiro estágio de implementação.

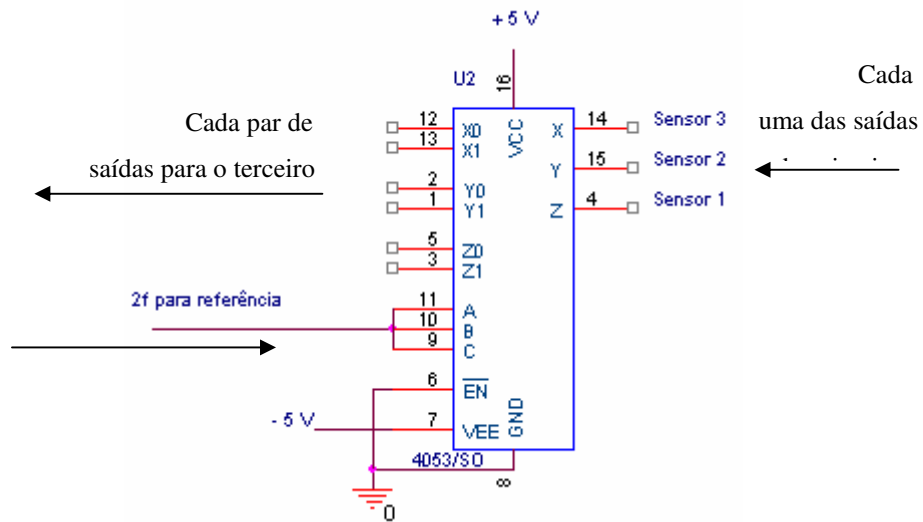


Figura 5.14 – Implementação do CI 4053

### 5.3.3 – Terceiro Estágio: Integrador

O circuito integrador é um bloco fundamental na implementação de filtros para tratamento de sinais. Esta montagem pode ser analisada de um modo muito simples se for comparada com a montagem inversora de um amplificador operacional. Assim, apenas substituindo o resistor pela impedância equivalente do capacitor  $C$  no local certo, podemos rapidamente chegar à fórmula final dada por:

$$v_- \approx v_+ \approx 0V$$

$$i_1 = \frac{v_i}{R}$$

$$i_1 = i_2 = -\frac{v_o}{Z_C} = -v_o \cdot SC$$

$$V_o = -\frac{1}{SCR} \cdot V_i \quad ((4.2))$$

Deste modo, a tensão de saída é proporcional ao integral da tensão de entrada. O ganho do integrador é  $-1/RC$  e a saída neste caso também será simétrica ao sinal de entrada integrado no tempo.

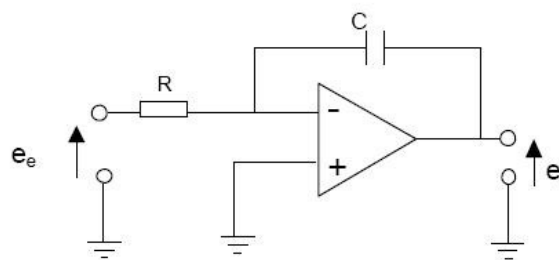


Figura 5.15 – Circuito integrador

Neste terceiro estágio, a diferença entre cada par de saídas do CI 4053 mostrada na figura acima é integrada para se obter um nível contínuo de tensão em sua saída que varie linearmente de acordo com a variação das diferenças introduzidas pelo sensor e comparadas com a referência.

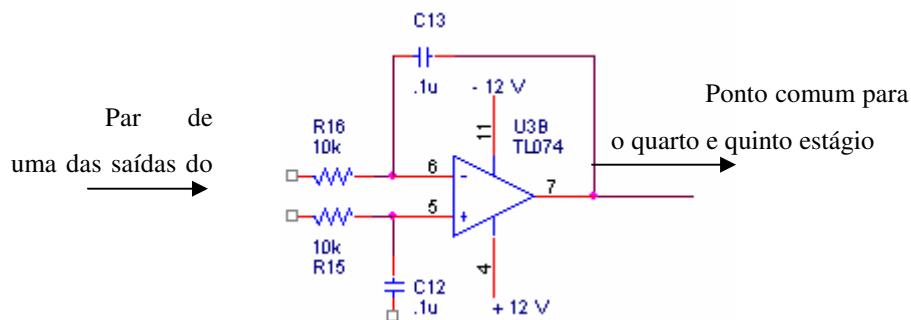


Figura 5.16 – Circuito integrador implementado no terceiro estágio

*Relatório Final de Atividades*

Ao final deste estágio, tem-se o praticamente o sinal final para ser coletado, precisando apenas ser filtrado e adequado aos parâmetros de aquisição.

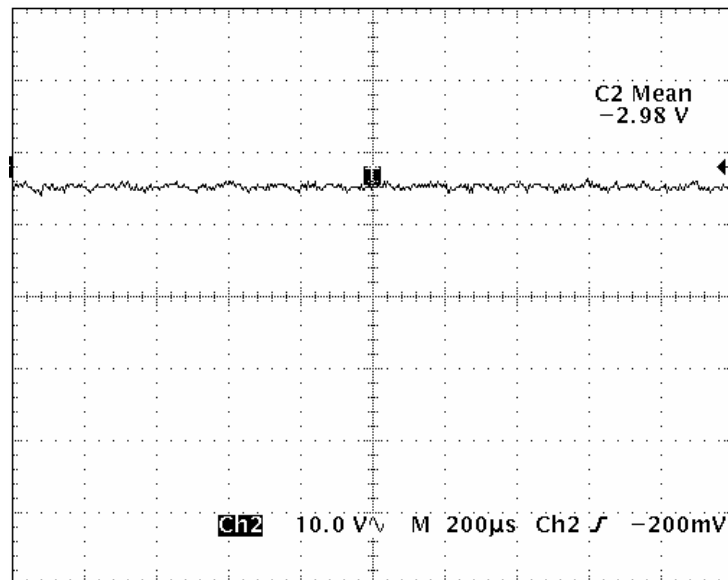


Figura 5.17 – Circuito integrador implementado no terceiro estágio

### 5.3.4 – Próximos estágios.

Depois de adquirido este sinal de tensão constante, devemos continuar um tratamento do sinal até transformá-lo de analógico para digital por um conversor A/D e plotar no software de coleta de dados do Campo Magnético. As etapas seguintes seriam implementar um filtro passa – baixa para que ruídos não afetem a medida do campo. Após seria implementado um circuito buffer, ou mais conhecido como montagem seguidora, que tem como principal função tirar partido da alta impedância de entrada, e/ou baixa impedância de saída, do AMP – OP de modo a isolar eletricamente dois de circuitos independentes ligados em cascata.

#### 5.4 Montagem do Sistema

Os estágios explicados anteriormente foram montados em bancada eletrônica no Laboratório de Magnetosfera do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

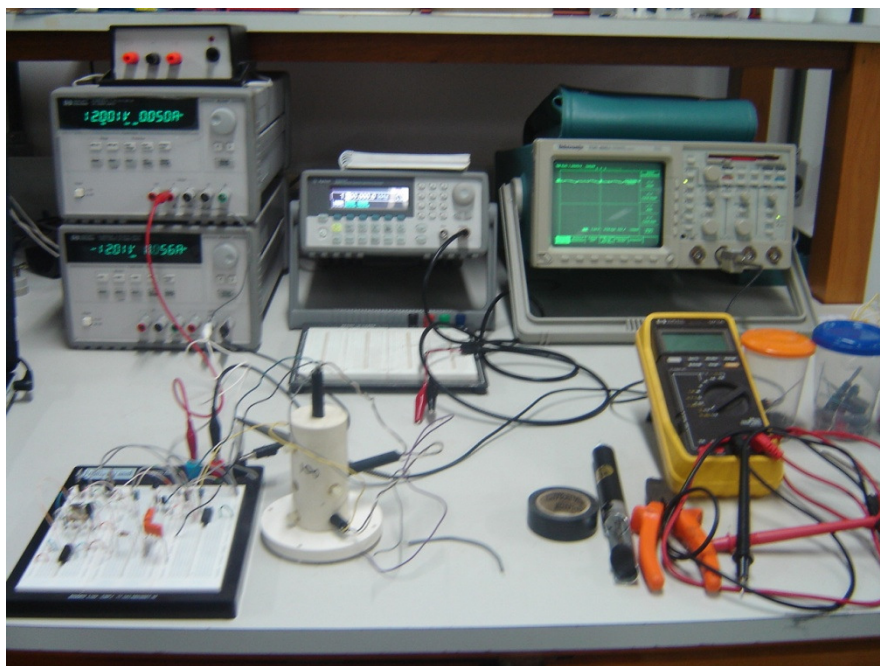


Figura 5.18 – Bancada para Instrumentação Eletrônica do Laboratório de Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT

*Relatório Final de Atividades*

O circuito até o estágio implementado foi montado em “protoboard” de bancada eletrônica e diretamente ligado no sensor já posto no formato vetorial.

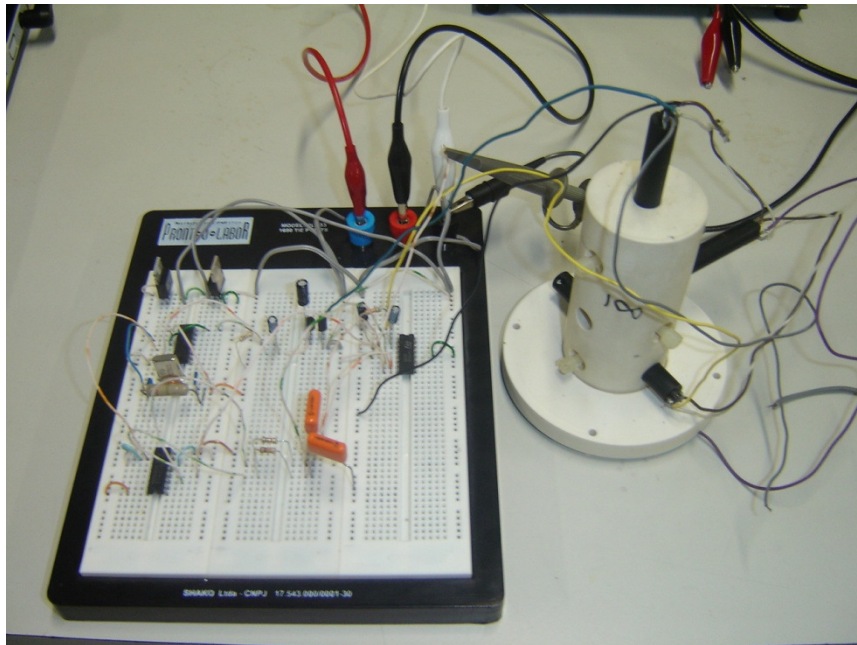


Figura 5.19 – Protoboard com os componentes eletrônicos na esquerda e arranjo vetorial dos sensores na direita.



# CAPÍTULO 6

## PERSPECTIVAS FUTURAS

O magnetômetro objetivo do Projeto de Pesquisa foi implementado até o terceiro estágio do Cronograma, a partir de agora, deve-se continuar os próximos estágios, tais como: o tratamento do sinal contínuo obtido no final do terceiro estágio. Para isso irá ser utilizado um filtro passa – baixa, e também a montagem seguidora. Uma próxima etapa seria converter o sinal analógico em digital por um conversor e coletar dados através do software.

Com o esquema de todo circuito pronto, deve-se estruturar um layout no programa Orcad 9.2, a fim de buscar uma otimização de espaço no circuito impresso dos componentes eletrônicos.

Após montado o circuito e soldado os componentes na placa, o instrumento será novamente levado para testes no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho do Sul, RS, afim de determinar a qualidade da coleta de dados do instrumento e, no futuro, fazer uma comparação dos dados com instrumentos comerciais do mesmo porte do magnetômetro aqui apresentado.

---

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO

Ao final desta etapa do Projeto: **Estudos Experimentais Visando o Desenvolvimento de Instrumentação para Medidas Geomagnéticas – Magnetômetro de Núcleo Saturado**, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, e no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, trabalho que apresenta um Relatório das atividades exercidas para a construção de um Sistema Magnetômetro básico de medidas Geomagnéticas, entrando logo após nas teorias e tecnologias de instrumentação, e na seqüência, descrevendo um procedimento experimental onde são detalhados os estágios até aqui implementados, com enfoque simples e direto para um bom entendimento do funcionamento deste novo Sistema de Magnetômetro, concebido no Laboratório de Magnetosferas do Centro Espacial.

Com o desenvolvimento dessas etapas o Bolsista pode adquirir conhecimentos de instrumentação, com ênfase na eletrônica e pôr em prática muitos conhecimentos estudados nos relatórios de colegas anteriores.

Esse tipo de instrumento é de fácil montagem e de baixo custo financeiro, fazendo com que seja viável sua implementação, e operação futura em Estações Terrenas de Observatórios Magnéticos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, M. H. And Pellerin, J.** A Miniature Two-axis Fluxgate Magnetometer, IEEE Trans. On Geosci. Electronics, vol GE-7, p.252-260, 1969.
- 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.
- Barbosa, Maria José Faria.** Sistema de Medidas de Pulsações Geomagnéticas. São José dos Campos, SP – 2003.
- Campbell, W. H.** Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press, New York, 1997.
- 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.
- Jankowski, J e C. Sucksdorff.** Guide for magnetic measurements and observatory practice, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder, 1996.
- Kabata, Wanderlí.** Magnetômetro Fluxgate para Satélites Científicos. São José dos Campos, SP – 2000.
- Kirchhoff, V. W. J. H.** Introdução à Geofísica Espacial, Ed. Nova Estella.
- Pellen, J.** Un Nouveau Magnétomètre de Restitution d' attitude, Sci. Ind. Spatiales, v.2, p.55-64, 1966.
- Pereira, O. J.** Estudos de Polarização de Pulsações Magnéticas na Faixa Pc3 a Pc5 Observadas em Santa Maria e Eusébio, 1993, dissertação de Mestrado INPE.
- Primdahl, F., Peterson, J. R., Olin, C. And Anderson, K. H.,** The Short-circuited Fluxgate Output Current, J.Phys.E:Sci.Instrum., n.22, p.349-354, 1989.
- Primdahl, F.,** Instrumentos Geomagnéticos, Publicações do Observatório Nacional, Publicação Especial, N<sup>o</sup> 09, 1986.
- Serson, P. H., and Hannaford, W. L. W.** A Portable Eletrical Magnetemoter, Can. J. Technol. V. 34, p.232-243, 1956.
- Scientific American Brasil** – Ano 2, n<sup>o</sup> 23.
-



*Relatório Final de Atividades*

**Trivedi, N.B.; Russell, C.T.; Barbosa, M.J.F.; Dutra, S.L.G.; Teixeira, N.R.;**

**Means, J.D.; Neri J.A.** - 2000 - Geomagnetic field measurements on a polar microsatellite SACI-1, *Advances in Space Research*, 25 (7/8), 1315-1323.

**Trivedi, N.B.; Ogura, F.X.K.; De Andrade, J.C.; Da Costa, J.M.; Barreto, L.M.** -

1995 - A ring core fluxgate magnetometer for IEEY program in Brazil. *Rev. Bras. Geof.*, 13:37-43.

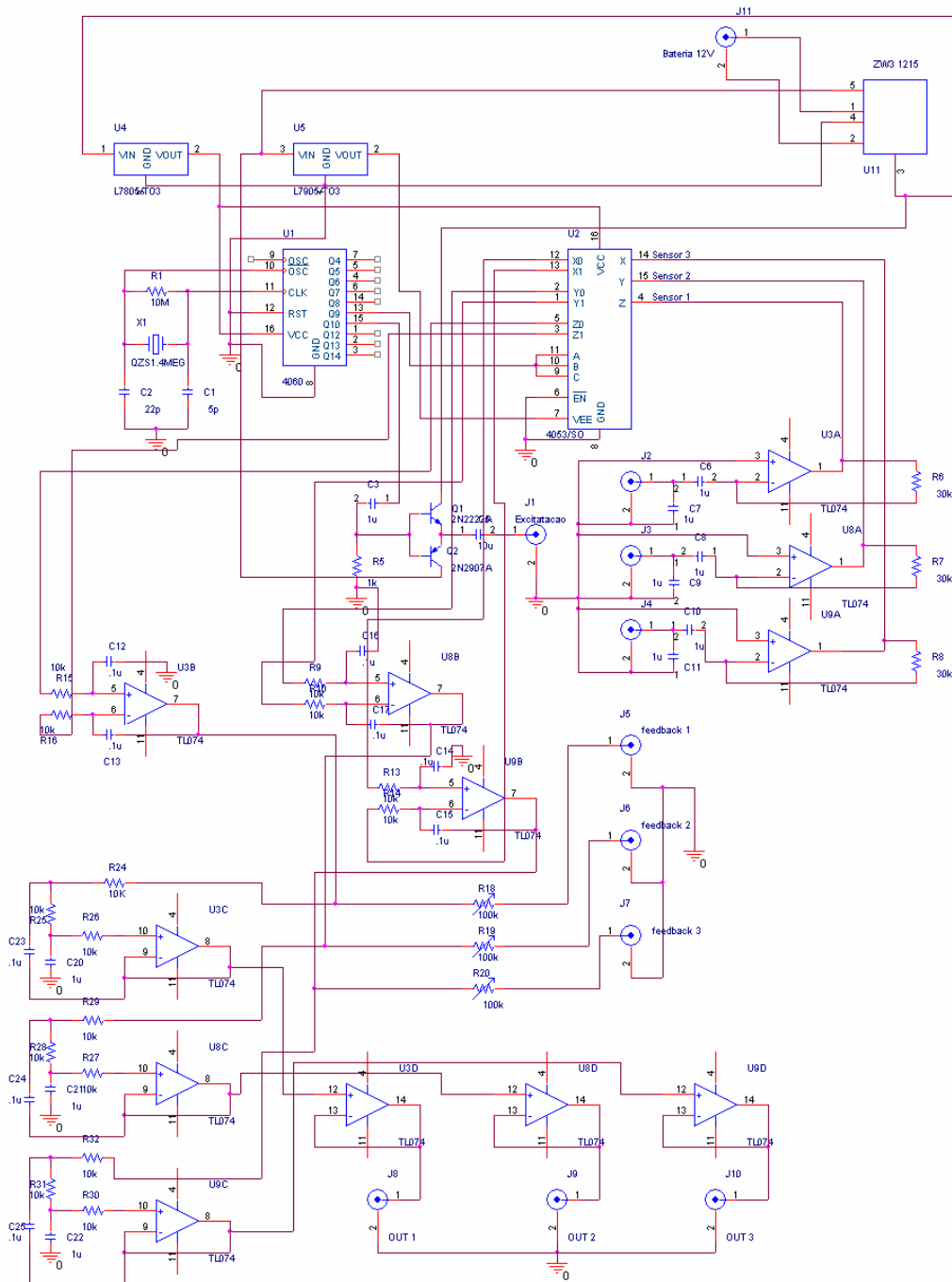
---



Anexo A – Circuito eletrônico do magnetômetro em fase de desenvolvimento no  
Laboratório de Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais -  
CRS/CIE/INPE - MCT

---

## Relatório Final de Atividades



Title	
MAGNETOMETRO FLUXGATE	
Size	Document Number
	Doc = Eduardo Andinghetto
Date:	Monday, May 09, 2005
	Sheet 1 of 1
	Rev



Anexo B – Publicações e Certificados

