



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

Eduardo Andrighetto (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE-CNPq/MCT)

Período 08/2005 a 02/2006, E-mail: edu@lacesm.ufsm.br

Dr. Nalin B. Trivedi (DGE/CEA/INPE – MCT, Orientador)

E-mail: trivedi@lacesm.ufsm.br

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

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Julho de 2006.



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsistas:

Sandro Fettermann Bertagnoli

Acadêmico de Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia

Laboratório de Ciência Espaciais de Santa Maria LACESM/CT-UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Eduardo Andrighetto

Bolsista Substituído, período 08/2005- 02/2006.

Processo:

PIBIC/INPE – CNPq/MCT 102067/2006-6

Orientador:

Dr. Nalin B.Trivedi

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

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/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



Local de Trabalho/Execução do projeto:

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

Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT

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

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 CRSPE/INPE-MCT pela infra-estrutura dos laboratórios que nos dão total liberdade para realizar nossas pesquisas teóricas e práticas.

A Sra. Angelita, Secretária e a Sra. Maria Célia, responsável pela Administração do CRSPE/INPE-MCT e a Prof. Dr. Damaris K. Pinheiro, Diretora do LACESM/CT-UFSM pelo apoio e por estar sempre disposta a dar informações e orientação, meu muito obrigado.

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

CAPÍTULO 1	12
INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 2	14
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. ANÁLISE DE DETECÇÃO POR HARMÔNICOS PARES	14
CAPÍTULO 3	17
ATIVIDADES DO BOLSISTA SANDRO F. BERTAGNOLLI	17
CAPÍTULO 4	18
PARTE DO RELATÓRIO DO PROJETO DE PESQUISA ELABORADO POR EDUARDO ANDRIGHETTO	18
4.1 FUNDAMENTOS GEOFÍSICOS	18
4.1.1 – Campo Magnético Terrestre.....	18
4.1.2 – Elementos do Campo Geomagnético	18
4.1.3 – Vento Solar	20
4.1.4 – Magnetosfera.....	20
4.1.5 – Cinturão de Van Allen	22
4.1.6 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).....	22
4.1.7 – Campo Principal.....	24
4.1.8 – Variações Seculares	25
4.1.9 – Variações Diurnas	25
4.1.10 – Pulsações Geomagnéticas	26
4.1.10.1 – Pulsações de Baixa Freqüência (1 – 10mHz)	26
4.1.10.2 – Pulsações de Média Freqüência (10 –100mHz)	26
4.1.10.3 – Pulsações de Alta Freqüência (0,1 – 10Hz).....	27
4.1.11 – Classificação das Pulsações Geomagnéticas.....	27
4.1.11.1 – Pulsações Contínuas	27
4.1.11.1.1 – Pulsações Contínuas Pc1	27
4.1.11.1.2 – Pulsações Contínuas Pc2/3	28
4.1.11.1.3 – Pulsações Contínuas Pc4	28
4.1.11.1.4 – Pulsações Contínuas Pc5	29
4.1.11.2 – Pulsações Irregulares	29
4.1.11.2.1 – Pulsações Irregulares Pi1	29
4.1.11.2.2 – Pulsações Irregulares Pi2.....	29
4.2 - INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS	30
4.2.1 – Métodos de Aquisição Processamento e Análise dos Dados	30
4.2.1.1 – Classificação dos Magnetômetros	30
5.2.2 – Magnetômetros Fluxgate.....	31

4.2.2.1 – Princípio de Funcionamento.....	31
4.2.2.1.1 – Ferromagnetismo.....	33
4.2.2.2 – Geometria dos Sensores.....	34
4.2.2.2.1 – O Núcleo linear.....	35
4.2.2.2.2 – O Núcleo em Anel.....	36
4.2.2.3 – Equacionamento do Sensor.....	36
4.2.3 – Métodos de Detecção.....	39
4.2.3.1 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Realimentado.....	39
4.2.3.2 – O Sensor e a Bobina de Realimentação.....	40
4.2.3.3 – Magnetômetro Fluxgate Curto Circuitado.....	41
4.2.3.4 – Magnetômetro de Segundo Harmônico Sintonizado.....	41
4.2.3.5 – Magnetômetro de Harmônicos Pares.....	43
4.2.3.6 – Ruído.....	43
4.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE.....	45
4.3.1 – Caracterização do Sensor Magnético.....	45
4.3.2 – Excitação da Bobina Primária.....	46
4.3.3 – Processamento do Sinal.....	49
4.3.3.1 – Primeiro Estágio: Circuito de Conversão – Corrente/Tensão.....	51
4.3.3.2 – Segundo Estágio: Multiplexador Analógico.....	53
4.3.3.3 – Terceiro Estágio: Integrador.....	55
4.3.3.4 – Quarto Estágio: Realimentação para a Bobina de feedback.....	58
4.3.3.5 – Quinto Estágio: Filtro Passa-baixa.....	58
4.3.3.6 – Sexto Estágio: Buffer.....	61
4.3.3.7 – Sétimo Estágio: Conversão Analógica/Digital e Interface com PC.....	63
4.3.4 – Montagem do Sistema Descrito.....	65
4.4 – RESULTADOS OBTIDOS.....	69
4.4.1 – Linearidade.....	69
4.4.2 – Operação do Magnetômetro.....	70
CAPÍTULO 5.....	82
PERSPECTIVAS FUTURAS.....	82
CAPÍTULO 6.....	84
CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXO A – Circuito completo para implementação do magnetômetro desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT.....	88
ANEXO B – Layout da placa inferior espelhado e superior desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT.....	89
ANEXO C – Ligação eletrônica dos componentes fixos na placa do circuito desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Amplitude dos harmônicos pares em função do campo magnético externo.....	16
Figura 2.1 – Elementos do vetor magnético	19
Figura 2.2 – Interação Sol Terra.....	21
Figura 2.3 – Identificação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS.....	23
Figura 2.4 – Configurações dos perfis de mesma intensidade de campo magnético.....	23
Figura 3.1 – Magnetômetro Fluxgate para medida direcional do Campo Geomagnético	33
Figura 3.2 – Histerese ferromagnética $B \times H$	34
Figura 4.1 – Barra linear do sensor	46
Figura 4.2 – Arranjo vetorial.....	46
Figura 4.2 – Sinal ajustado pelo CI 4060 responsável pela excitação do primário	46
Figura 4.3 – Sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência de excitação	47
Figura 4.4 – Tensão sobre o enrolamento primário do sensor.....	48
Figura 4.5 – Pulsos de corrente que excitam o enrolamento primário do sensor	48
Figura 4.6 – Circuito de excitação completo utilizado no desenvolvimento do magnetômetro	49
Figura 4.7 – Sinal de tensão induzida na bobina sensora.....	50
Figura 4.8 – Relação entre os pulsos de corrente da bobina primária e secundária	50
Figura 4.8 – Circuito derivador.....	51
Figura 4.9 – Bobina sensora curto-circuitada no terra virtual do amplificador operacional e convertendo os pulsos de corrente i_0 em tensão e_0 igual a R vezes i_0	52
Figura 4.10 – Primeiro estágio implementado	52
Figura 4.11 – Sinal de saída do circuito derivador para o segundo estágio.....	53
Figura 4.12 – Formas de onda obtidas em cada par das três saídas do CI 4053.....	54
Figura 4.13 – Lógica de funcionamento do CI 4053	55
Figura 4.14 – Implementação do CI 4053.....	55
Figura 4.16 – Saída de 142mV do circuito integrador devido às características de diferenças definidas pelo CI 4053 para esta situação.....	57

Figura 4.17 – Saída de 1.774V do circuito integrador devido às características diferenciais definidas pelo CI 4053 para esta situação	57
Figura 4.18 – Circuito integrador implementado no terceiro estágio	57
Figura 4.19 – Realimentação do sensor	58
Figura 4.20 – Filtro passa-baixa de 2ª ordem de Sallen & Key	59
Figura 4.21 – Simulação do filtro passa baixa implementado	61
Figura 4.22 – Filtro ativo implementado no quinto estágio	61
Figura 4.23. Montagem seguidora.....	62
Figura 4.24 – Circuito buffer implementado no sexto estágio	62
Figura 4.25 – Três medidas referente à saída do sexto estágio para cada sensor nas direções Norte 1.908V, Leste 18mV, e Centro Terrestre –1.142V	63
Figura 4.26 – Conversor A/D implementado no magnetômetro.....	64
Figura 4.27 – Software rodando em tempo real no dia 22/04/2005	65
no CRSPE/INPE – MCT , em Santa Maria, RS	65
Figura 4.28 – Bancada para Instrumentação Eletrônica do	66
Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do.....	66
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT	66
Figura 4.30 Vista inferior do circuito desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT.....	67
Figura 4.31 Vista superior do circuito desenvolvido no CRSPE/INPE - MCT.....	67
Figura 4.32 – Circuito implementado e desenvolvido no	68
CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.....	68
Figura 4.33 – Realização de testes visualizados em osciloscópio no	68
CRSPE/INPE – MCT..... Erro! Indicador não definido.	
Figura 4.34 – Sistema em pleno funcionamento para testes no CRSPE/INPE - MCT.....	69
Figura 5.1 – Vista na janela do Laboratório onde o sistema está em operação para o local externo do Prédio 2 onde o sensor fluxgate foi instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	71
Figura 5.2 – Magnetômetro NAROD – DGE/CEA/INPE – MCT e o magnetômetro desenvolvido e implementado no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, instalados no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS.....	72

Figura 5.3 – Aquisição da componente H no dia 09/05/2005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	74
Figura 5.4 – Aquisição da componente H no dia 09/05/2005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS	74
Figura 5.5 – Aquisição da componente D no dia 09/05/2005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	75
Figura 5.6 – Aquisição da componente D no dia 09/05/2005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS	75
Figura 5.7 – Aquisição da componente H durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	77
Figura 5.8 – Aquisição da componente H durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	77
Figura 5.9 – Aquisição da componente D durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	78
Figura 5.10 – Aquisição da componente D durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	78
Figura 5.11 – Aquisição da componente Z durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	79
Figura 5.12 – Aquisição da componente Z durante a tempestade magnética no dia 15/05/2005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	79
Figura 5.13 – Magnetogramas obtidos durante a tempestade magnética do dia 15/05/2005 no Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ.....	80



ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES MAGNÉTICOS SEGUNDO SEUS PRINCÍPIO FÍSICOS..... 12

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 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 – CRSPE/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 estes que podem ser classificados de várias maneiras. 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 1.1 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. O ex-colega e hoje Engenheiro Eduardo Andrighetto com um belo trabalho e muito esforço conseguiu conceber na Fase I deste Projeto um magnetômetro fluxgate de núcleo saturado, desde sua parte de montagem do circuito impresso até a aquisição de dados e sua pré-análise junto à magnetômetros já em funcionamento no Observatório Sul Espacial. Para o acontecimento desta ação, foi de fundamental importância à orientação técnica, científica, e mais importante ainda a experiência no desenvolvimento de instrumentação do Dr. Nalin B. Trivedi, nosso Orientador. O Relatório mostrará de forma bem simples e compreensível passo a passo como montar um magnetômetro fluxgate de núcleo saturado e apresentará as teorias físicas da região medida.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho do bolsista Sandro Fettermann Bertagnolli no Laboratório de Magnetosferas do CRSPE/INPE-MCT, desde a sua admissão na Instituição baseou-se no aprendizado de novos conhecimentos, visto que o bolsista substituído, Engenheiro Eduardo Andrighetto deixou um Projeto faltando pouco para ser concluído, como foi citado na Introdução, atividade que será apresentada no decorrer do Relatório. Começou uma busca de novos caminhos para adquirir os conhecimentos técnicos, científicos na área de Geomagnetismo e mais específicos na parte de instrumentação, com toda área de eletrônica analógica e algumas partes digitais de valor agregado. Isso só foi possível com muita leitura de teses, dissertações e relatórios de estágio e atividades. Algumas práticas nas bancadas dos laboratórios do CRESPE/INPE-MCT foram desenvolvidas ao longo desse período para poder haver certo reconhecimento com os instrumentos utilizados para o desenvolvimento futuro da continuação do Projeto.

2.1. ANÁLISE DE DETECÇÃO POR HARMÔNICOS PARES

Neste Capítulo são apresentados alguns complementos teóricos e discussões em cima de novas diretrizes para um maior entendimento do trabalho de instrumentação apresentado no Capítulo 5 .

Uma análise mais criteriosa torna-se relevante no contexto de detecção do magnetômetro fluxgate. No decorrer do Relatório é apresentado um tópico relacionado a detecção pelos harmônicos pares e outra somente pelo harmônico de segunda ordem, que é o implementado no Projeto realizado pelo ex-colega Eduardo Andrighetto.

A discussão proposta neste Capítulo seria a avaliação de escolha em relação a qual método de detecção melhor se adapta a proposta do trabalho. Para isso será

descrito os dois métodos no Relatório, mas lembrando que o utilizado foi o de segundo harmônico sintonizado.

Se existe campo externo, a curva de histerese é deslocada em relação a $H = 0$ fazendo com que um sinal proporcional ao campo externo seja induzido. Se o sinal de excitação tem uma frequência f e é um sinal periódico qualquer (uma onda quadrada ou triangular, por exemplo) o sinal induzido deve apresentar componentes de frequências pares ($2f$, $4f$, $6f$, etc.) em relação ao sinal de excitação. Componentes ímpares (f , $3f$, $5f$,...) podem aparecer como ruído devido a não existência de uma simetria perfeita no arranjo.

No método de detecção por segundo harmônico, o sinal de saída da bobina sensora é enviado a um circuito de detecção, após filtragem dos demais harmônicos (pares e ímpares) e amplificação.

A principal diferença entre o método de detecção por todos harmônicos pares e o método de detecção somente pelo segundo harmônico, é que o primeiro utiliza todas as informações disponíveis, e o segundo somente por uma informação, que se pode dizer a mais linear.

Algumas justificativas devem-se levar em conta na escolha deste método de detecção por todos harmônicos pares: não utilizando filtros passa-baixa, ou passa-banda, evitam-se problemas de fase na detecção síncrona, que necessitariam um circuito de correção em estágios seguintes. Além disso, a amostragem do pulso todo é muito mais simples de implementar (admitindo inclusive uma concepção digital) e apresenta bons resultados.

Cada harmônico par deve ser proporcional ao campo magnético externo e o coeficiente de proporcionalidade deve variar conforme a ordem do harmônico. Para verificar esta relação diversos valores de campo magnético foram medidos e fez-se uma análise espectral do sinal induzido para cada valor de campo, comparando-se os sete primeiros harmônicos pares (fig 1). Como era esperado o segundo harmônico é aquele que apresenta maior estabilidade, entretanto percebe-se que todos os outros harmônicos pares respondem linearmente com o campo e apresentam sensibilidades da mesma ordem, variando de 1 a 3,6 AT. Uma vez que a sensibilidade total foi estimada em 35

AT então tem-se um ganho de 10 vezes comparado a sensibilidade do segundo harmônico, o que justifica o uso do modo de detecção de todos harmônicos pares.

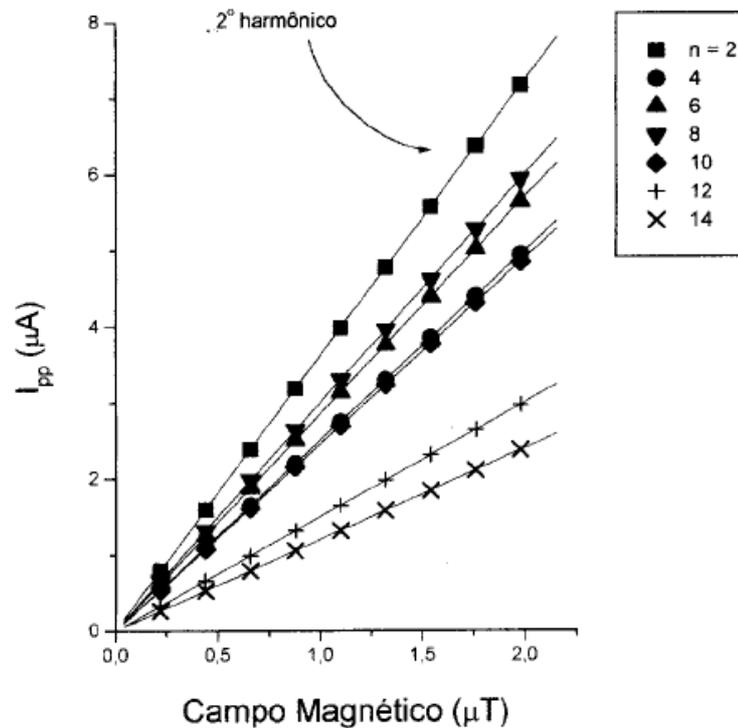


Figura 1 - Amplitude dos harmônicos pares em função do campo magnético externo.

FONTE: “Revista de Física Aplicada e Instrumentação”, Vol.12, no. 2, Junho , 1997

CAPÍTULO 3

ATIVIDADES DO BOLSISTA SANDRO F. BERTAGNOLLI

Durante o Projeto na área de instrumentação de magnetômetros, desenvolvido no Laboratório de Magnetosferas do CRSPE/INPE-MCT e no Observatório Espacial do Sul – OES/CRISP/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).
 - Realizou a instalação do magnetômetro de indução no Observatório Espacial do Sul, junto ao pesquisador Dr. Kazuo Makita da National Institute of Polar Research, Japão. Está realizando manutenção e coletando dados do instrumento.
 - O Bolsista estudou a dissertação de Mestrado com o título: Sistema de medidas de pulsações geomagnéticas, defendida por Maria José Faria Barbosa (2003 – ITA, Campo Montenegro, São José dos Campos, SP, Brasil).
 - O Bolsista estudou a dissertação de Mestrado com o título: Magnetômetro Fluxgate para satélites Científicos, defendida por Wanderlí Kabata (2000 – ITA, Campo Montenegro, São José dos Campos, SP, Brasil).
 - Adaptou-se a bancada de eletrônica que o Laboratório possui com seus instrumentos e componentes, realizando pequenos experimentos e montagens para se acostumar com a nova rotina de eletrônica de instrumentação geomagnética.
 - Estudou relatórios de atividades de antigos colegas de laboratório para conseguir se situar a teorias físicas e eletrônicas.
-

CAPÍTULO 4

PARTE DO RELATÓRIO DO PROJETO DE PESQUISA ELABORADO POR EDUARDO ANDRIGHETTO

4.1 FUNDAMENTOS GEOFÍSICOS

4.1.1 – 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.

4.1.2 – 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 2.1 mostra o vetor total do Campo Geomagnético (F) e suas três componentes X , Y e Z .

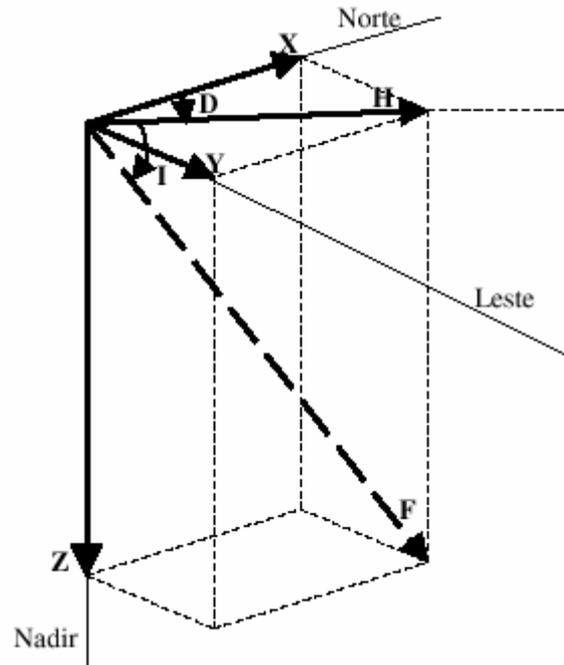


Figura 2.1 – Elementos do vetor magnético

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 .

4.1.3 – Vento Solar

Dá-se o nome de Vento Solar ao plasma eletricamente neutro e magnetizado que preenche o espaço interplanetário formado basicamente de hidrogênio ionizado, prótons, e elétrons. O Sol emite constantemente esse gás ionizado que percorre cerca de 150 milhões de quilômetros até chegar próximo ao Planeta Terra com uma velocidade típica de 450 km/s e uma densidade de prótons e elétrons de 6,6 e 7,1 partículas/cm³ respectivamente e com uma magnitude de campo magnético da ordem de 7nT. A existência do campo magnético no vento solar origina importantes efeitos hidromagnéticos, inclusive aqueles relacionados com a interação Sol-Terra.

4.1.4 – 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 R_T

≅ 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.

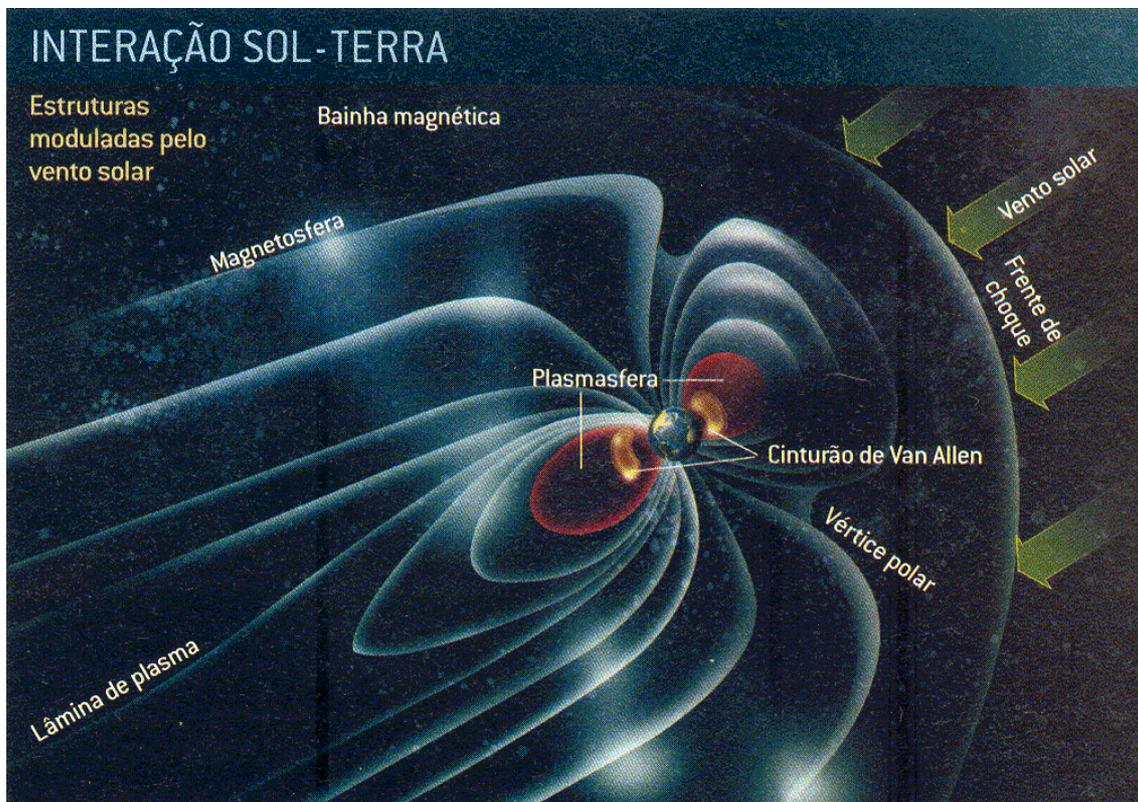


Figura 2.2 – Interação Sol Terra

FONTE: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23

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 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 Plasmapausa.

4.1.5 – Cinturão de Van Allen

Os cinturões de radiação ou de Van Allen que envolvem a Terra na região equatorial são formados por partículas de alta energia como elétrons, prótons e íons atômicos, atraídos pelo Campo Magnético Terrestre. Esses cinturões foram descobertos por James Van Allen ao analisar dados fornecidos pelo satélite Explorer 1 em 1958. São dois cinturões, um interno, cuja fonte é o Vento Solar e a Ionosfera, que se estende de cerca de 400 km até 12 mil km acima da superfície terrestre, e outro externo, cuja fonte são as partículas energéticas solares e as reações da atmosfera com os raios cósmicos galácticos, que vai de 12 mil até cerca de 60 mil km. Raios cósmicos são íons positivos rápidos, provenientes de todas as direções do espaço, provavelmente preenchendo toda a Galáxia, e que bombardeiam o Planeta constantemente.

4.1.6 – 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.

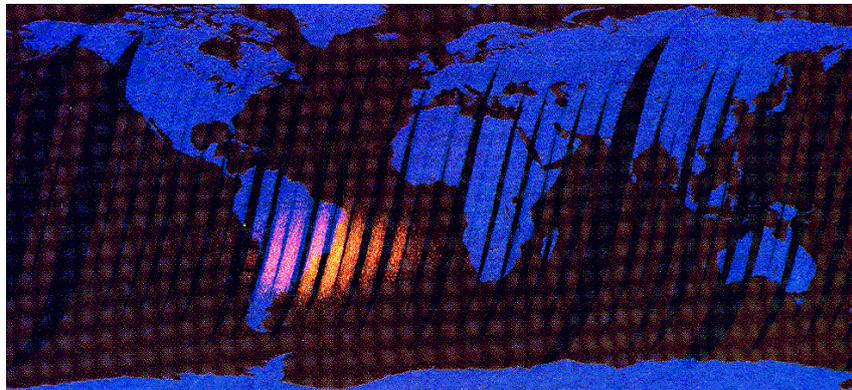


Figura 2.3 – Identificação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS

FONTE: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23

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.

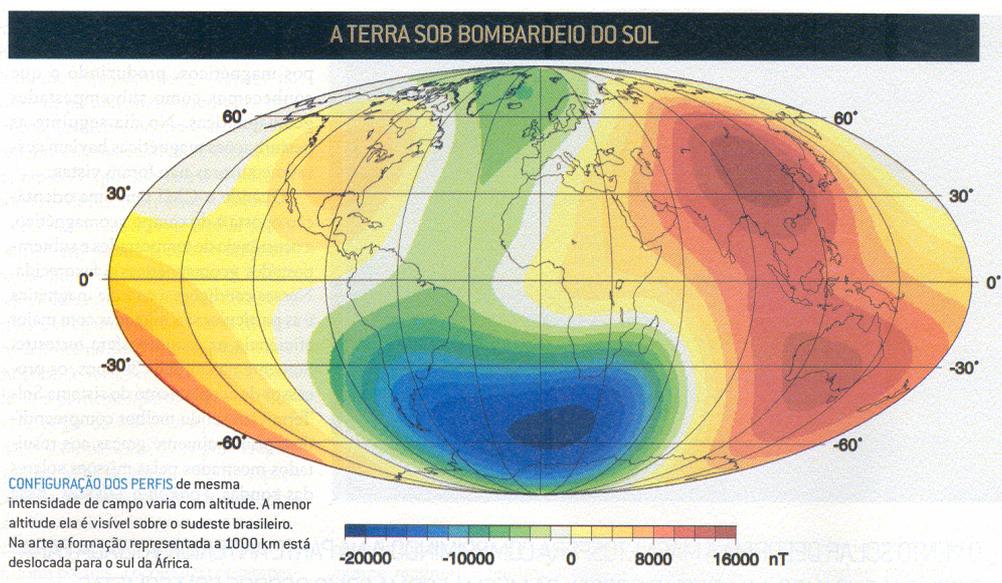


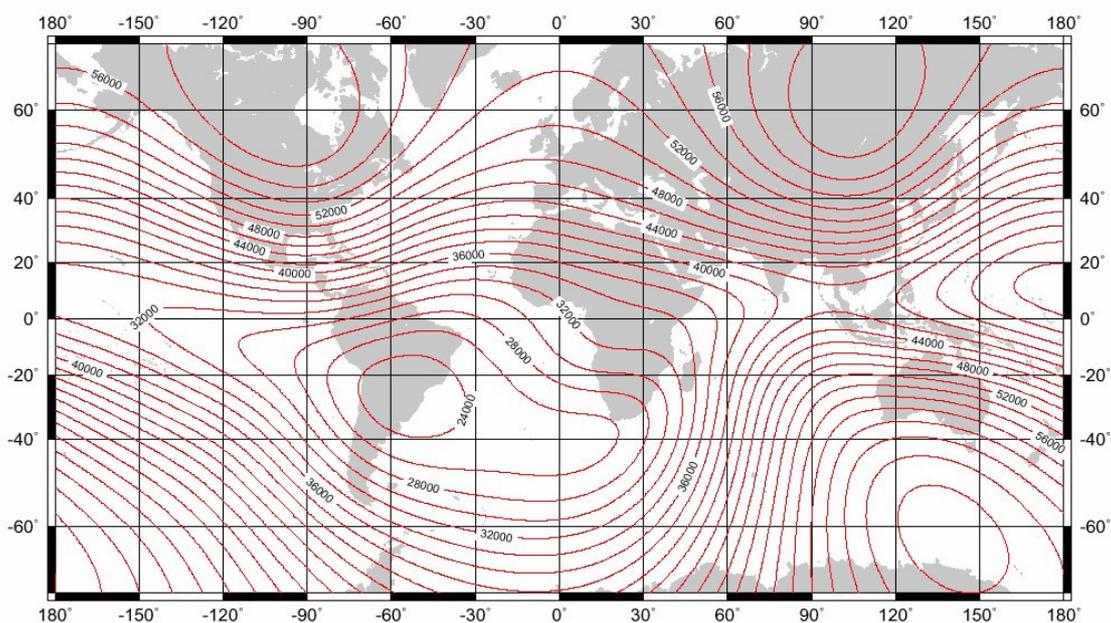
Figura 2.4 – Configurações dos perfis de mesma intensidade de campo magnético

FONTE: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23

4.1.7 – 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.



Total intensity (F) at 2005.0 from the World Magnetic Model (WMM2005). Contour interval is 2000 nT and projection is Mercator. This is an example of an isodynamic chart. Credit: British Geological Survey (Natural Environment Research Council).

Figura 2.5 – Carta Magnética Mundial, 2005

FONTE: http://www.geomag.bgs.ac.uk/images/charts/pdf/merc_f.pdf

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.

4.1.8 – Variações Seculares

A mudança lenta e contínua no campo principal do Campo Geomagnético é chamada de variação Secular. É associada com as correntes elétricas que fluem no núcleo externo da Terra e tem uma escala temporal que chega a mil anos, dada pela mudança anual no valor do campo. É determinada pela variação nos elementos magnéticos X , Y e Z ou H , D e Z .

4.1.9 – 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*, S_q , que apresenta uma magnitude para o campo magnético na faixa desde algumas dezenas até várias centenas de nanoteslas.

4.1.10 – Pulsações Geomagnéticas

As pulsações geomagnéticas, bem como os chamados eventos transientes relacionam-se, com interações complexas entre o Vento Solar, plasma solar, e o Campo Geomagnético que ocorrem na fronteira da região que constitui a magnetosfera terrestre.

Pulsações geomagnéticas são manifestações de ondas de plasma de frequência ultra-baixa, ULF, na Magnetosfera terrestre. Essas pulsações têm intervalos de frequência desde aproximadamente 1 mHz até 10 Hz e aparecem como oscilações quase senoidais nos dados registrados em magnetômetros na superfície terrestre, na Ionosfera e na Magnetosfera.

4.1.10.1 – Pulsações de Baixa Frequência (1 – 10mHz)

As Pulsações Geomagnéticas na banda de baixa frequência são ondas de plasma com comprimentos de onda comparáveis às dimensões da Magnetosfera. As pulsações de baixa frequência tendem a ter amplitudes máximas nas zonas aurorais. As regiões de máxima intensidade ocorrem principalmente na oval auroral, exceto próximo ao meio dia local onde os picos de amplitude podem ser ligeiramente deslocados na direção dos pólos em relação à média do oval auroral. Em médias latitudes não são evidentes e podem ocorrer com igual probabilidade na maior parte do dia.

4.1.10.2 – Pulsações de Média Frequência (10 –100mHz)

A maioria das ondas de plasma, na banda de média frequência, são geradas pelo Vento Solar na Magnetopausa, ou originadas por instabilidades íon-ciclotônicas na região de fluxo contrário “upstream” ao Vento Solar. As ondas de plasma geradas por estas instabilidades são convectadas para baixo, na direção da curva de choque e se

acoplam a Magnetopausa propagando-se para o seu interior. Elas são mais freqüentes no lado diurno e têm amplitudes desde frações a vários nanotesla na superfície da Terra.

4.1.10.3 – Pulsações de Alta Freqüência (0,1 – 10Hz)

As pulsações na banda de alta freqüência, 0,1 – 10 Hz, incluem as classes Pc1 e Pc2. Na superfície da Terra, as amplitudes máximas destas pulsações são tipicamente de 0,1 – 10 nT nas zonas aurorais, com amplitude menores no equador. Registros obtidos no solo mostram dois grupos distintos: um grupo de pulsações com amplitudes periodicamente moduladas e outro que mostram mudanças graduais e algumas por acaso. As pulsações do primeiro grupo são as chamadas pérolas, devido à similaridade entre a aparência de suas séries temporais com um cordão de pérolas. Por outro lado, as pulsações do segundo grupo são pulsações desestruturadas, devido a falta de qualquer periodicidade na modulação e na amplitude.

4.1.11 – Classificação das Pulsações Geomagnéticas

As pulsações têm sido classificadas segundo suas características morfológicas e podem ser divididas em duas classes principais:

- Pulsações contínuas, que são oscilações regulares com uma faixa de período variando de 0,2 a 600 segundos e podem ser divididas em subgrupos dependendo do período;
- Pulsações irregulares, que são oscilações irregulares de curto período e que variam na faixa de 1 a 150 segundos.

4.1.11.1 – Pulsações Contínuas

Abrangem o intervalo inteiro das pulsações, com períodos de 0,2 a 600 segundos. Podem ser subdivididas em subgrupos, dependendo de seus períodos.

4.1.11.1.1 – Pulsações Contínuas Pc1

As Pc1 são oscilações senoidais regulares, com períodos variando de 0,2 a 5 segundos. Estas pulsações ocorrem na forma de explosões separadas, desenvolvendo-se gradualmente em uma série de pulsações que se estendem de 10 minutos a horas. Elas podem também ocorrer na forma de grupos de pulsações com bruscas variações de frequência.

Investigações no solo da ocorrência das Pc1 e as características nas mudanças de suas amplitudes com a latitude indicam que elas são mais frequentemente excitadas em zonas aurorais e sub-aurorais.

4.1.11.1.2 – Pulsações Contínuas Pc2/3

As amplitudes de sinais observadas das Pc2-3 são, usualmente, menores de 0,5nT e os períodos típicos são em torno de 5 a 30 segundos. São tipicamente fenômenos diurnos, com período médio sofrendo variações diurnas, maximizando-se ao meio-dia. A principal direção do vetor horizontal perturbado, embora tipicamente norte-sul, sofre uma variação diurna nas maiorias das latitudes e, com essa mudança, ocorrem vários sentidos de polarização.

4.1.11.1.3 – Pulsações Contínuas Pc4

As pulsações Pc4 apresentam amplitudes da ordem de 5 a 20 nT nas altas latitudes e 1nT nas baixas latitudes. Os sinais normalmente duram de 10 minutos a várias horas. Estes sinais frequentemente aumentam lentamente, aí se sustentando por um longo tempo e em seguida decaindo bruscamente. Em médias e baixas latitudes o modelo de ocorrência diária apresenta um máximo ao meio dia.

A frequência de ocorrência das Pc4 aumenta com a diminuição da atividade solar, embora suas amplitudes permaneçam quase constantes por todo o ciclo solar. Por outro lado, a frequência de ocorrência das Pc3 não muda muito ao longo do ciclo solar; já suas amplitudes decrescem repentinamente com o decréscimo da atividade solar. Assim, as Pc4 são muito mais dominantes que as Pc3 nos mínimos solares.

4.1.11.1.4 – Pulsações Contínuas Pc5

Esta classe de pulsações com períodos mais longos, tipicamente 3 a 9 minutos, pode ter amplitudes extremamente grandes chegando a algumas centenas de nT, apresentando uma forma senoidal, freqüentemente amortecida, com algumas distorções aparecendo com o aumento da atividade magnética.

4.1.11.2 – Pulsações Irregulares

Apresentando uma faixa de freqüência de 1Hz a 25 mHz, 1 a 40 s, essas pulsações são caracterizadas por sua forma irregular. Apresentam uma conexão com os distúrbios do Campo Geomagnético e estão correlacionadas com os distúrbios da Magnetosfera superior. As Pi's são divididas em dois grupos.

4.1.11.2.1 – Pulsações Irregulares Pi1

As Pi1 tem formas irregulares com períodos menores do que 15 segundos, 6 – 10s. Suas amplitudes têm valores máximos nas zonas aurais e sua intensidade decresce rapidamente com a latitude. Estas oscilações têm formas de microestruturas devido aos distúrbios lentos do Campo Geomagnético, observadas durante a fase principal das tempestades magnéticas.

4.1.11.2.2 – Pulsações Irregulares Pi2

As pulsações Pi2 apresentam formas irregulares com períodos na faixa de, 40–150s, e amplitudes da ordem de 1 a 5nT. Sua principal característica é o seu pequeno tempo de duração e a sua superposição com as pulsações Pi1, que ainda em certas ocasiões podem ser seguidas pelas pulsações contínuas Pc1.

4.2 - INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDAS GEOMAGNÉTICAS

4.2.1 – Métodos de Aquisição Processamento e Análise dos Dados

O Campo Geomagnético não pode ser medido diretamente, sendo necessária à interação do Campo em outros processos físicos para produção de efeitos variáveis de acordo com o Campo e de fácil medição. Além disso, devido a grande extensão espacial do Campo com relação às dimensões dos sensores, apenas medidas pontuais são obtidas.

O equipamento utilizado para medir o Campo Geomagnético é chamado magnetômetro. Devido a grande variedade de fenômenos que respondem a campos magnéticos, existe uma grande variedade de magnetômetros, cada um com suas vantagens distintas.

4.2.1.1 – Classificação dos Magnetômetros

Podem ser classificados de acordo com suas características mensuráveis, formando assim dois grupos:

- Magnetômetros escalares – Medem apenas a intensidade do Campo Magnético. Dentre eles estão os magnetômetros de indução, precessão de prótons e de bombeamento ótico;
 - Magnetômetros vetoriais – Além de informar a intensidade do campo, esta classe informa a sua direção já que é composto da medida dos três eixos que formam o vetor Campo Magnético. Nesta, encontram-se magnetômetros de efeito Hall, SQUIDs, e o fluxgate.
-

4.2.2 – Magnetômetros Fluxgate

4.2.2.1 – 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_{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 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, 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.

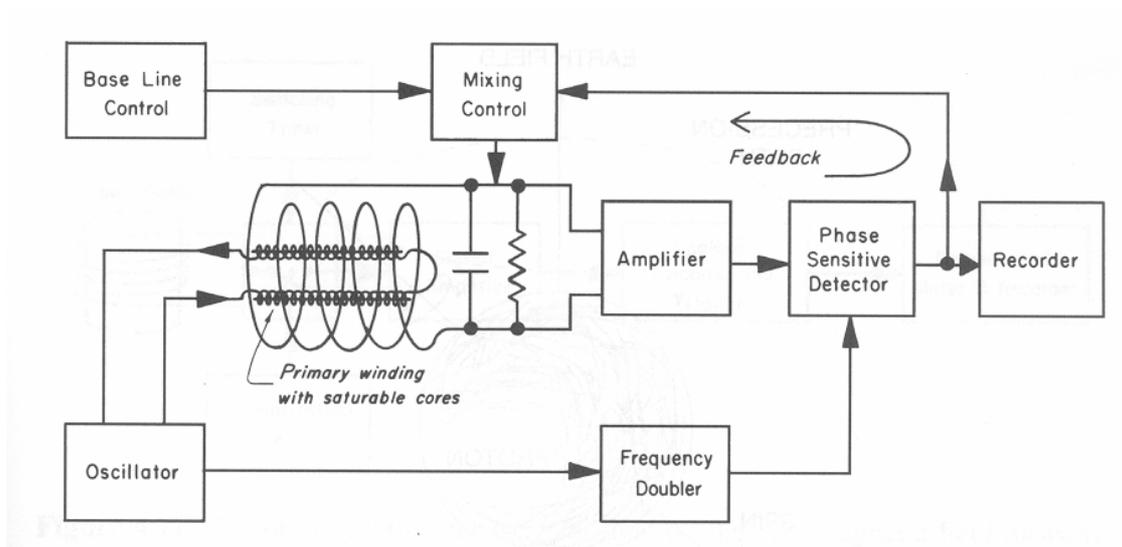


Figura 3.1 – Magnetômetro Fluxgate para medida direcional do Campo Geomagnético

FONTE: Campbell, 1997

4.2.2.1.1 – 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 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.

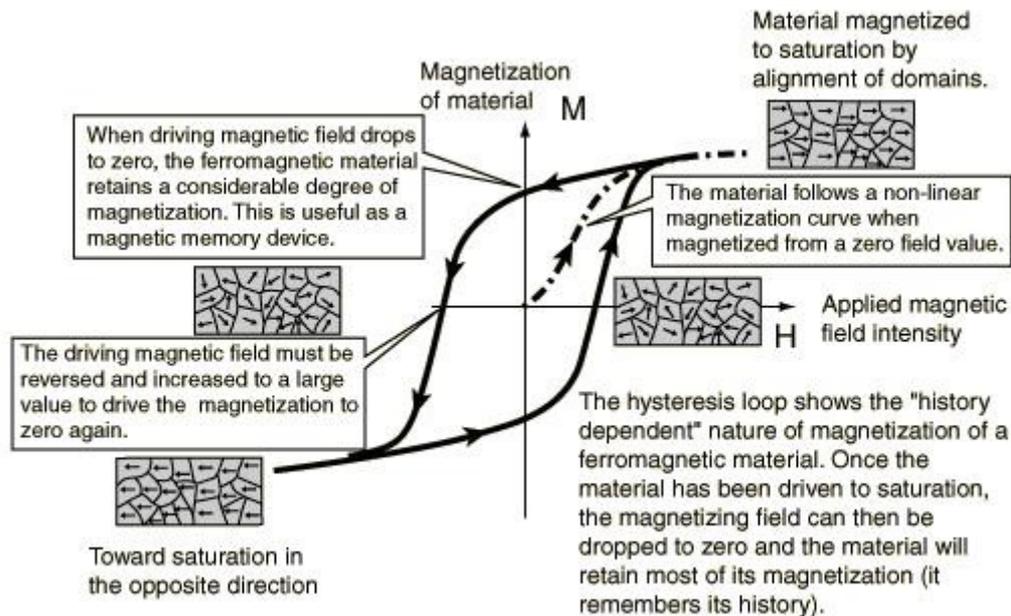


Figura 3.2 – Histerese ferromagnética $B \times H$

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 μ , campo de saturação H_s , susceptibilidade magnética χ , e a energia $E=BH$.

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

4.2.2.2.1 – 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:

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

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:

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

Logo:

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

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} .

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

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:

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

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

4.2.2.2.2 – 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;

4.2.2.3 – 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:

$$H = H_{ext} + H_M \quad (3.6)$$

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

$$M = \chi H \quad (3.7)$$

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

$$H_M = -DM \quad (3.8)$$

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

Das equações (3.6), (3.7) e (3.8) podemos escrever que:

$$H_M = -\frac{D\chi}{1 + \chi D} H_{ext} \quad (3.9)$$

A equação (3.9) 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:

$$H = \frac{H_{ext}}{1 + \chi D} \quad (3.10)$$

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

$$B = \mu_0 \frac{1+x}{1+xD} H_{ext} = \frac{\mu_0 \mu_r}{(1+D(\mu_r-1))} H_{ext} \quad (3.11)$$

Onde

$$\mu_r = 1+x \quad (3.12)$$

Da equação (3.11) define-se a permeabilidade relativa aparente (μ_a) como sendo:

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{(1+D(\mu_r-1))} \quad (3.13)$$

Reescrevendo B , vem:

$$B = \mu_0 \mu_a H_{ext} \quad (3.14)$$

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 μ_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:

$$V_{sec} = nAdb / dt \quad (3.15)$$

Inserindo a equação (3.11) em (3.15) temos a tensão induzida na bobina detectora que é a base para o magnetômetro fluxgate.

$$V_{sec} = \frac{nAB}{(1+D(\mu_r-1))^2} \frac{d\mu_r}{dt} \quad (3.16)$$

4.2.3 – 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 a 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.

4.2.3.1 – 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 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.

4.2.3.2 – 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.

4.2.3.3 – 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.

4.2.3.4 – 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 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 afetará 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 aquele do sensor sintonizado.
 - Em aplicações onde o ruído e a estabilidade não são fatores tão importantes, a amplificação paramétrica num sensor fluxgate sintonizado no segundo harmônico, é um simples filtrar e deixar maior o sinal vindo do secundário.
-

4.2.3.5 – 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.

4.2.3.6 – 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:

- 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.

4.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE

4.3.1 – 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.

O sensor linear, já descrito anteriormente, 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.

Fotos do sensor linear e do arranjo mecânico utilizado para que se tenha medidas nas três direções do campo magnético, são apresentadas na Figura 4.1 e Figura 4.2.

O sensor que está sendo utilizado é o LFG – A13 de fabricação industrial por S.Smith & Sons (England) Ltd. e apresentou as seguintes indutâncias quando medidas em um 4275A Multi-Frequency LCR Meter fabricado pela Hewlett-Packard :

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

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

$$L_{\text{feedback}} = 38,10\text{mH}$$



Figura 4.1 – Barra linear do sensor

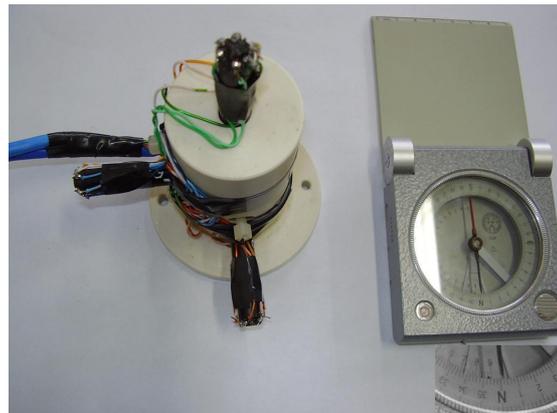


Figura 4.2 – Arranjo vetorial

4.3.2 – 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.

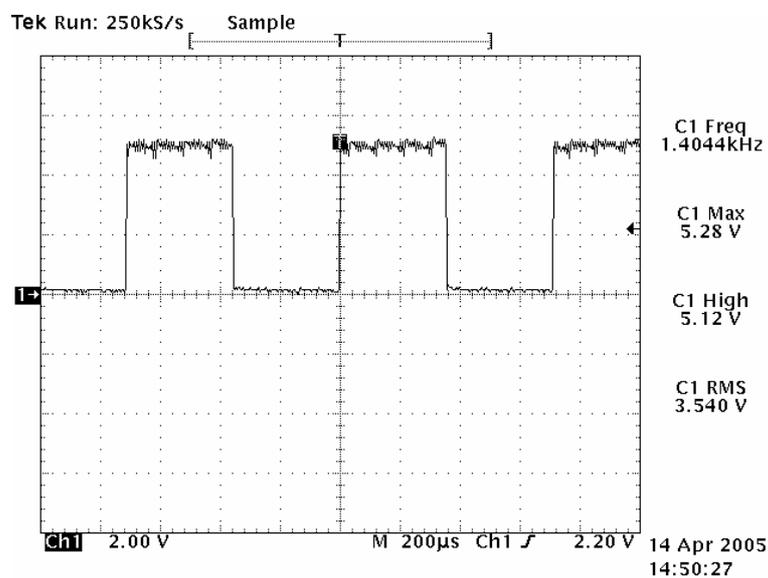


Figura 4.2 – Sinal ajustado pelo CI 4060 responsável pela excitação do primário

O circuito de excitação faz uso, assim, de um cristal oscilador de 1,44 Mhz acoplado a um divisor de frequências, o CI 4060, que oferece em sua saída um sinal variante de 0V a 5V a 1,4 Khz. A Figura 4.2, mostra a medição em osciloscópio do sinal fornecido pelo CI 4060.

Além disso, do CI 4060, é retirado o sinal com o dobro da frequência da excitação, a fim de comparar com a frequência da bobina sensora que da teoria sabe-se que fica por essa ordem. O sinal medido em osciloscópio da frequência 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 4.3.

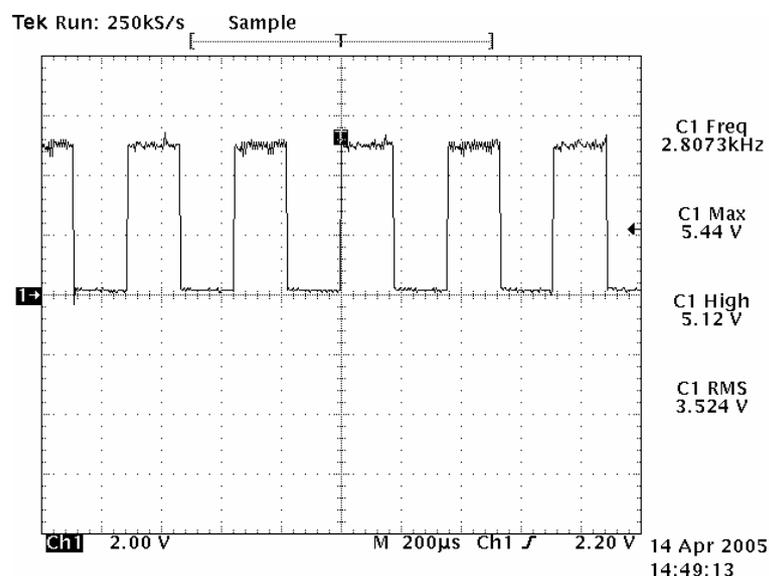


Figura 4.3 – Sinal fornecido pelo CI 4060 com o dobro da frequência de excitação

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

As formas de onda da tensão e indiretamente para efeitos ilustrativos da corrente ao qual o enrolamento primário do sensor magnético está submetido, são apresentadas na Figura 4.4 e na Figura 4.5, respectivamente.

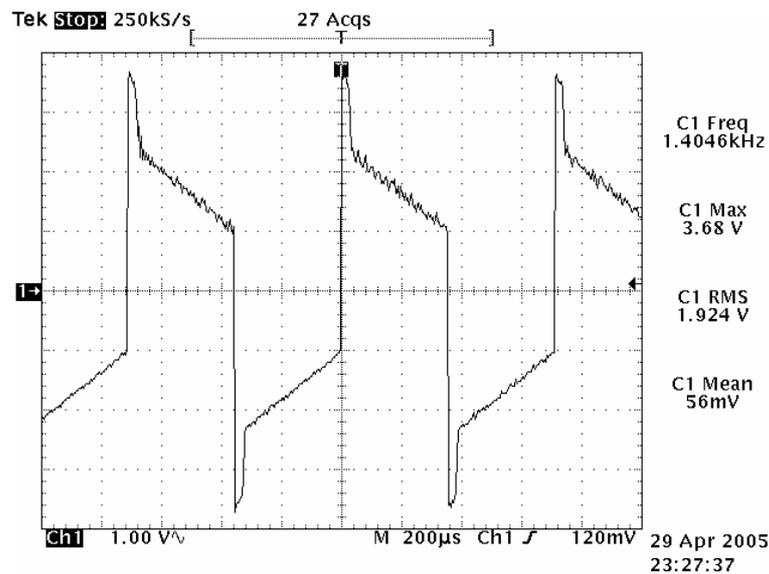


Figura 4.4 – Tensão sobre o enrolamento primário do sensor

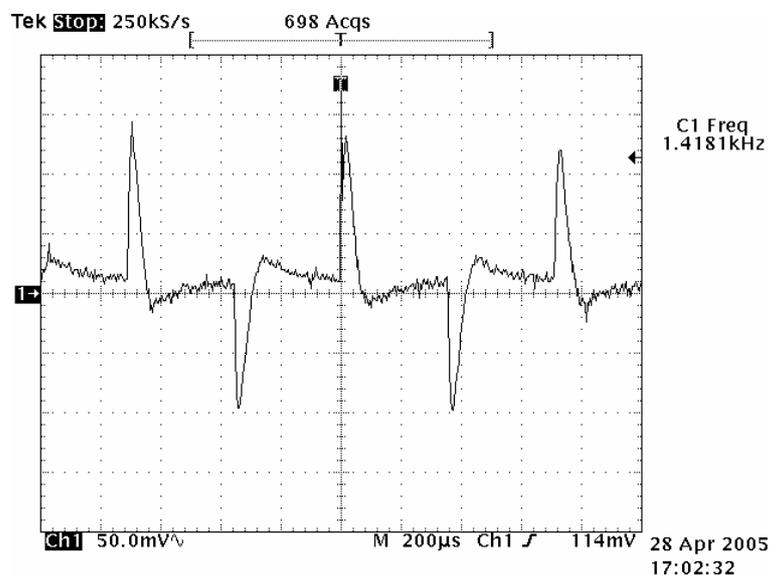


Figura 4.5 – Pulsos de corrente que excitam o enrolamento primário do sensor

Assim, ao final desta primeira etapa chega-se ao circuito de excitação completo e utilizado na implementação deste magnetômetro, ver Figura 4.6.

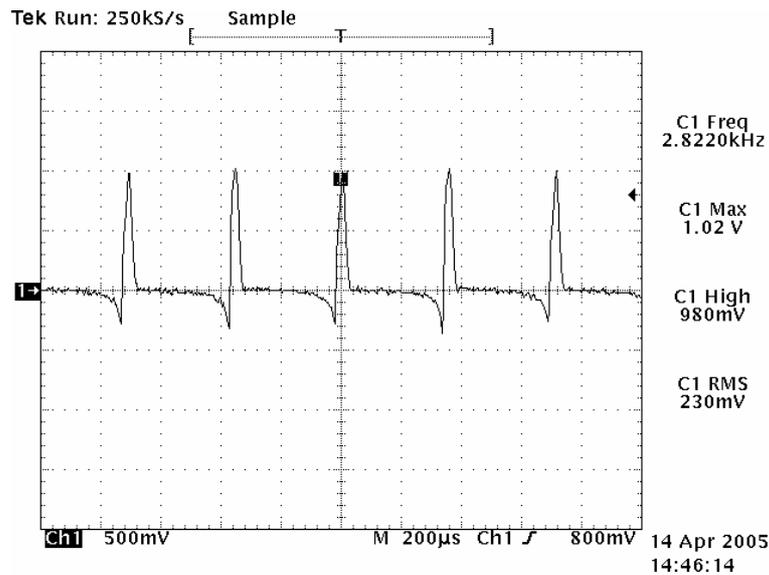
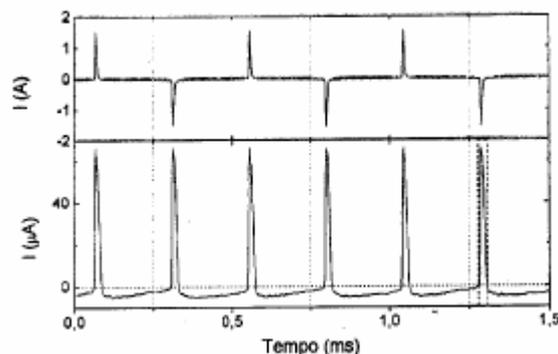


Figura 4.7 – Sinal de tensão induzida na bobina sensora

A partir disso, pode-se concluir que os pulsos de corrente alternados, aplicados na bobina primária e que saturam o núcleo magnético ora positivamente e ora negativamente, induzem na bobina detectora pulsos de tensão somente positivos e assim sendo, podemos dizer que os pulsos de corrente induzida são da mesma forma positivos e que a sua frequência, portanto, dobra de valor já que os pulsos negativos da bobina primária, que saturam o núcleo magnético na região negativa da curva de histerese $B \times H$, se convertem em pulsos positivos no secundário como é explicado na teoria. Logo, a Figura 4.8 mostra a relação entre a corrente da bobina de excitação e da bobina sensora respectivamente.

Figura 4.8 – 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 sete 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.

4.3.3.1 – 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 frequência. 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:

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

$$i_1 = \frac{v_i}{Z_C} = v_i \cdot sC \quad i_1 = i_2 = -\frac{V_O}{R}$$

$$V_O = -sCRv_i \quad (4.1)$$

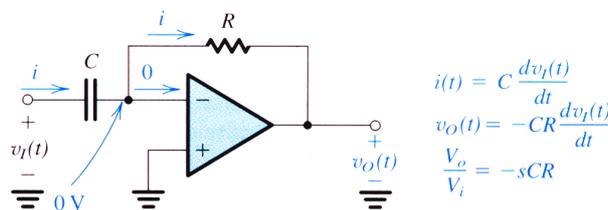


Figura 4.8 – Circuito derivador

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 4.8, e converte os pulsos induzidos de corrente para pulsos de tensão numa relação de R vezes a corrente instantânea. A Figura 4.9 ilustra essa relação de conversão.

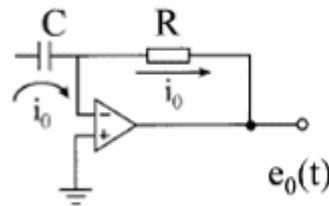


Figura 4.9 – Bobina sensora curto-circuitada no terra virtual do amplificador operacional e convertendo os pulsos de corrente i_0 em tensão e_0 igual a R vezes i_0

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 .

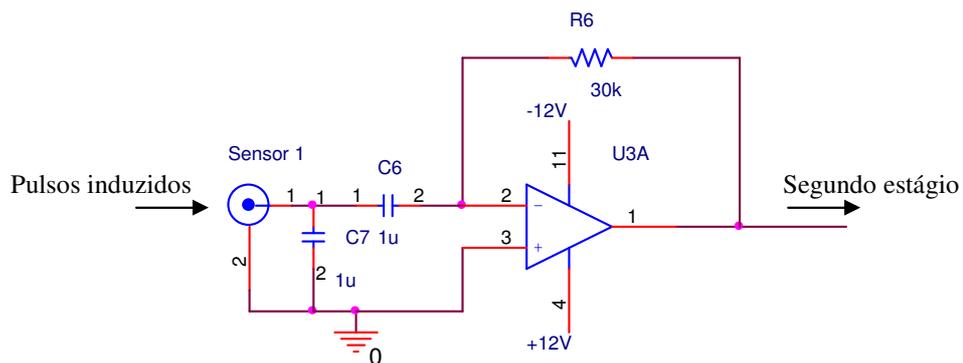


Figura 4.10 – Primeiro estágio implementado

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).

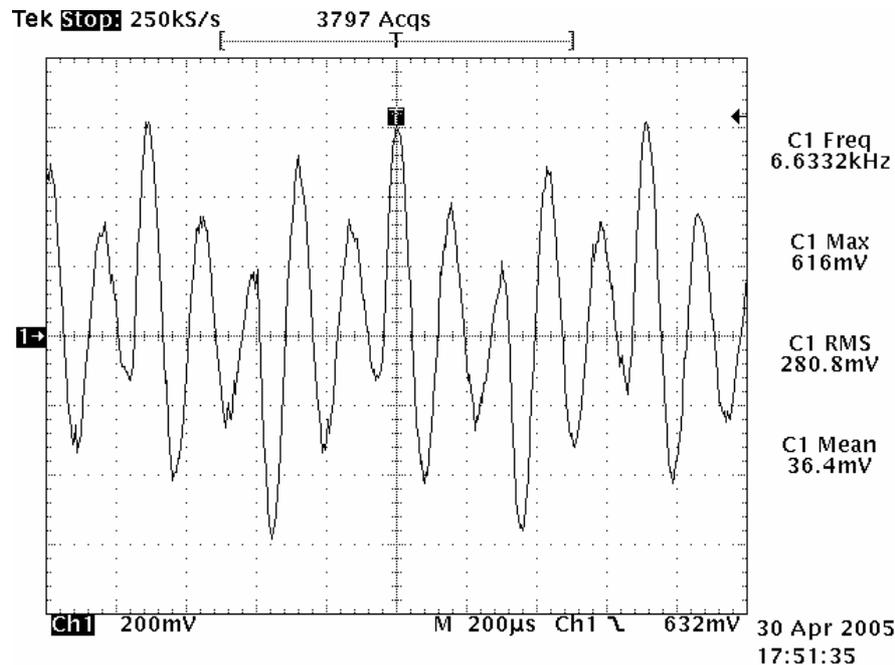


Figura 4.11 – Sinal de saída do circuito derivador para o segundo estágio

4.3.3.2 – 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 4.6 como referência de frequência para seus três canais de uma 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 4.12 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 $2f$.

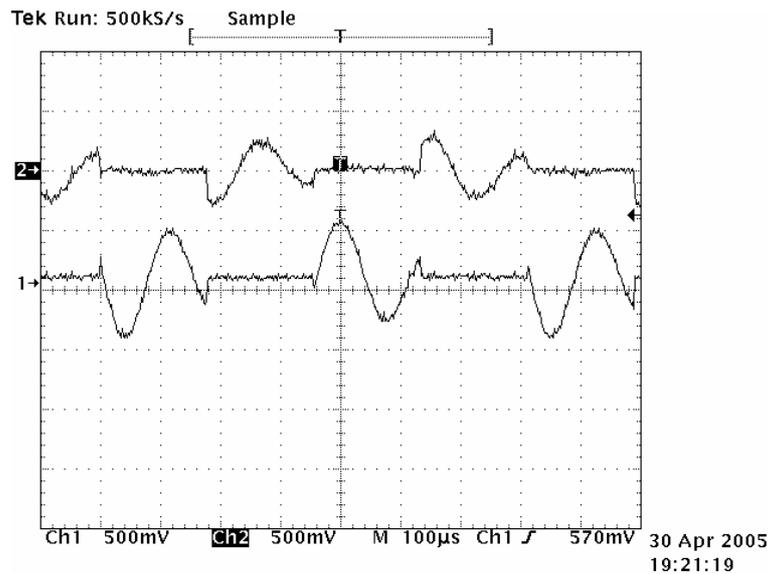


Figura 4.12 – Formas de onda obtidas em cada par das três saídas do CI 4053

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 4.13 e 4.14. 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.

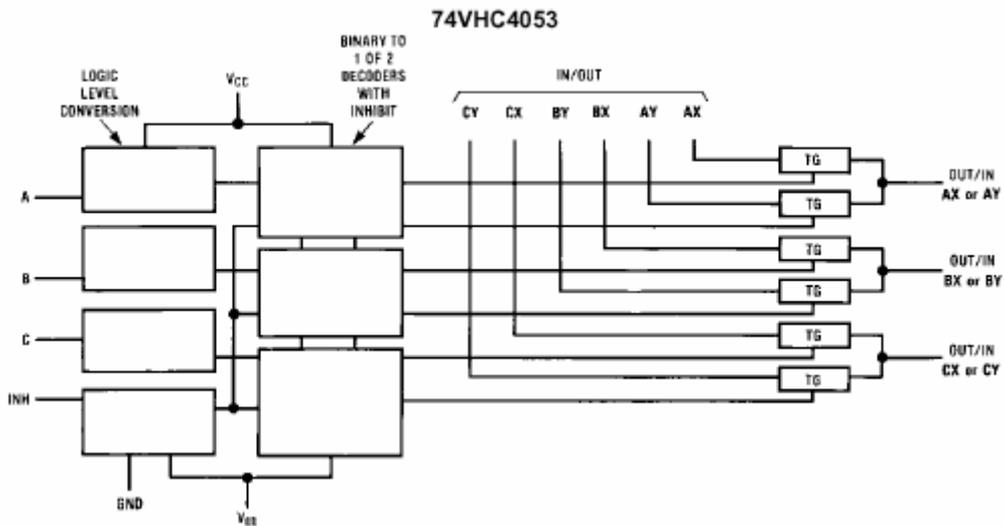


Figura 4.13 – Lógica de funcionamento do CI 4053

FONTE: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/FAIRCHILD/74VHC4053.html>

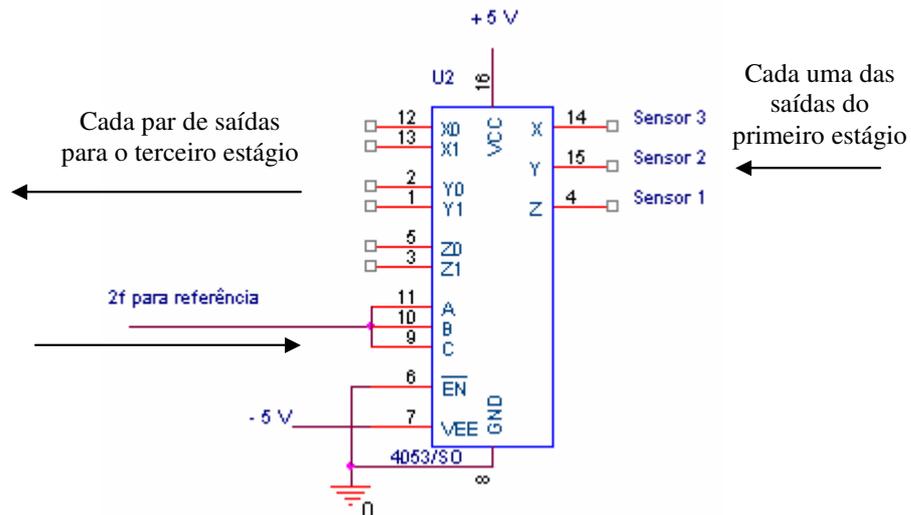


Figura 4.14 – Implementação do CI 4053

4.3.3.3 – 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:

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

$$i_1 = \frac{v_i}{R} \qquad i_1 = i_2 = -\frac{v_o}{Z_c} = -v_o \cdot SC$$

$$v_o = -\frac{1}{SCR} \cdot v_i \qquad (4.2)$$

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.

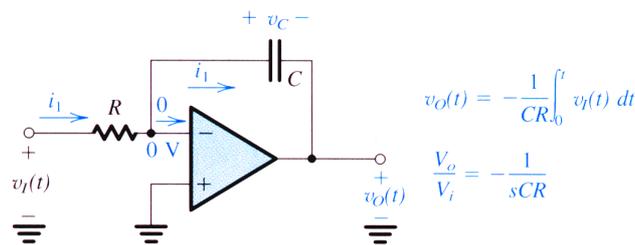


Figura 4.15 – Circuito integrador

Neste terceiro estágio, a diferença entre cada par de saídas do CI 4053 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.

Ao final deste estágio, tem-se o praticamente o sinal final para ser coletado, precisando apenas ser filtrado e adequado aos parâmetros de aquisição. As Figuras 4.16 e 4.17 estabelecem a saída do integrador definida pela variação do campo magnético em dois momentos distintos, onde no primeiro caso tem-se um campo magnético

enfraquecido pela bobina de realimentação e no segundo um campo relativamente forte onde a bobina de realimentação não desmagnetiza tanto o núcleo.

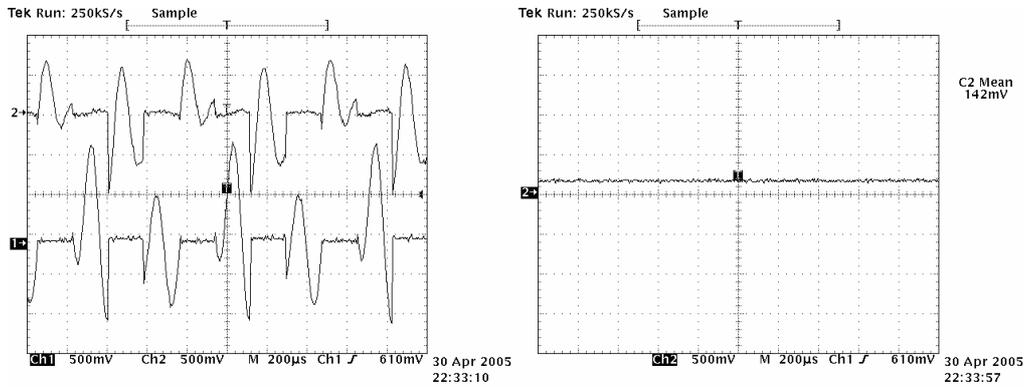


Figura 4.16 – Saída de 142mV do circuito integrador devido às características diferenciais definidas pelo CI 4053 para esta situação

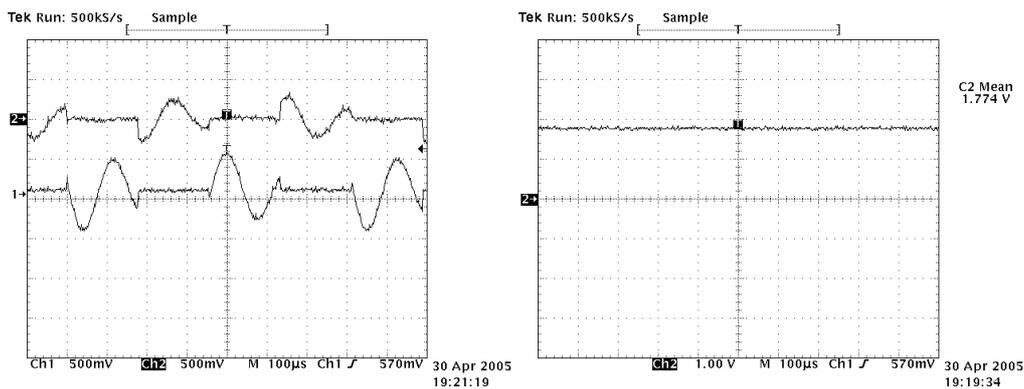


Figura 4.17 – Saída de 1.774V do circuito integrador devido às características diferenciais definidas pelo CI 4053 para esta situação

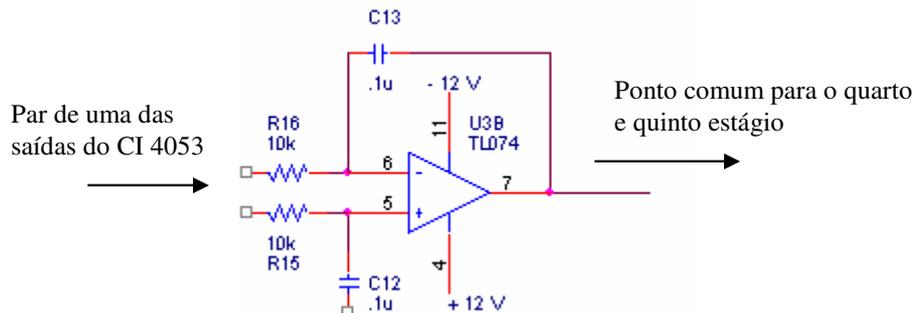


Figura 4.18 – Circuito integrador implementado no terceiro estágio

4.3.3.4 – Quarto Estágio: Realimentação para a Bobina de feedback

Devido ao fato do sensor escolhido na implementação deste magnetômetro fluxgate ter geometria linear, há uma necessidade de realimentar o circuito sensor para que se possa ter um controle da calibração da saída final do processo.

Esta etapa é muito simples e de fácil compreensão. Apenas, introduz-se uma resistência variável conectando a saída do terceiro estágio ao enrolamento de feedback presente no sensor linear. Ao variar essa resistência, exerce-se um controle de desmagnetização do núcleo do sensor. Assim, um alto valor relativo da resistência atenua o sinal de realimentação fazendo com que desmagnetize pouco o sensor, aumentando o nível contínuo do sinal final. Um valor baixo nesta resistência, quase não desmagnetiza o núcleo de maneira que todo o sinal processado até o momento é enviado de volta para a bobina de feedback provocando a desmagnetização completa do núcleo e fazendo com que o sinal do estágio final seja algo próximo a zero volts.

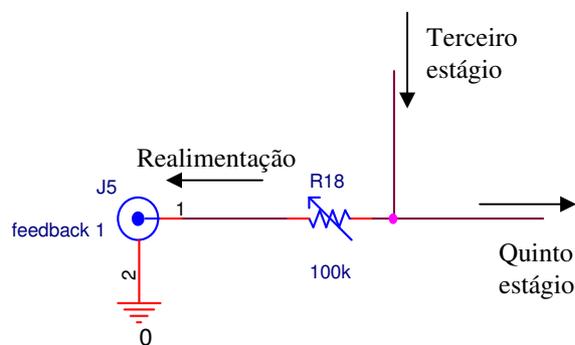


Figura 4.19 – Realimentação do sensor

4.3.3.5 – Quinto Estágio: Filtro Passa-baixa

Nesta etapa, faz-se uma filtragem do sinal para que ruídos indesejáveis não afetem a medida do campo. Como a variação do Campo Geomagnético se dá de forma muito lenta, abaixo de 10 Hertz, o filtro passa-baixa deve ser implementado para valores nessa ordem.

Para este processo implementou-se um filtro ativo para cortar frequências acima de 10 Hertz a fim de eliminar ruídos provocados pelas altas frequências do circuito de excitação e do meio externo. O filtro é similar ao passa-baixa de 2ª ordem de *Sallen & Key*, como mostra a Figura 4.20.

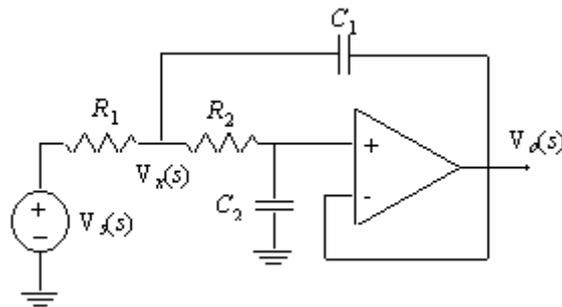


Figura 4.20 – Filtro passa-baixa de 2ª ordem de Sallen & Key

Para este filtro passa-baixa de 2ª ordem, vulgarmente designado por biquadrática de Sallen & Key, a função de transferência pode ser obtida a partir do sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{V_d - V_x}{R_1} + \frac{V^+ - V_x}{R_2} + sC_1(V_o - V_x) = 0 \\ V^+ = \frac{V_x}{1 + sC_2R_2} = V_o \end{cases} \quad (4.3)$$

Cuja primeira equação resulta da aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes ao nó-X, e a segunda do divisor de impedâncias e do seguidor de tensão implementados pela resistência R_2 , pelo capacitor C_2 e pelo AmpOp. O cociente entre as tensões na saída do AmpOp e da fonte de sinal é:

$$H(s) = \frac{1}{s^2C_1C_2R_1R_2 + sC_2(R_2 + R_1) + 1} \quad (4.4)$$

Ou ainda,

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{C_1 R_1 R_2} s + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (4.5)$$

Em que,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.6)$$

e,

$$Q = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{R_1 R_2 C_1}{C_2}} \quad (4.7)$$

Assim, com base na equação (4.6) determinou-se os valores para os elementos do circuito para que este reaja cortando as frequências a partir de 10Hz como mostra a simulação da Figura 4.21 do circuito para o quinto estágio da Figura 4.22 simulada no software PSpice. Nela, pode se notar no ponto marcado, que a curva da margem de ganho atinge -3dB , considerado valor de corte, próximo à frequência de 10Hz e abaixo a margem de fase não inverte para baixas frequências.

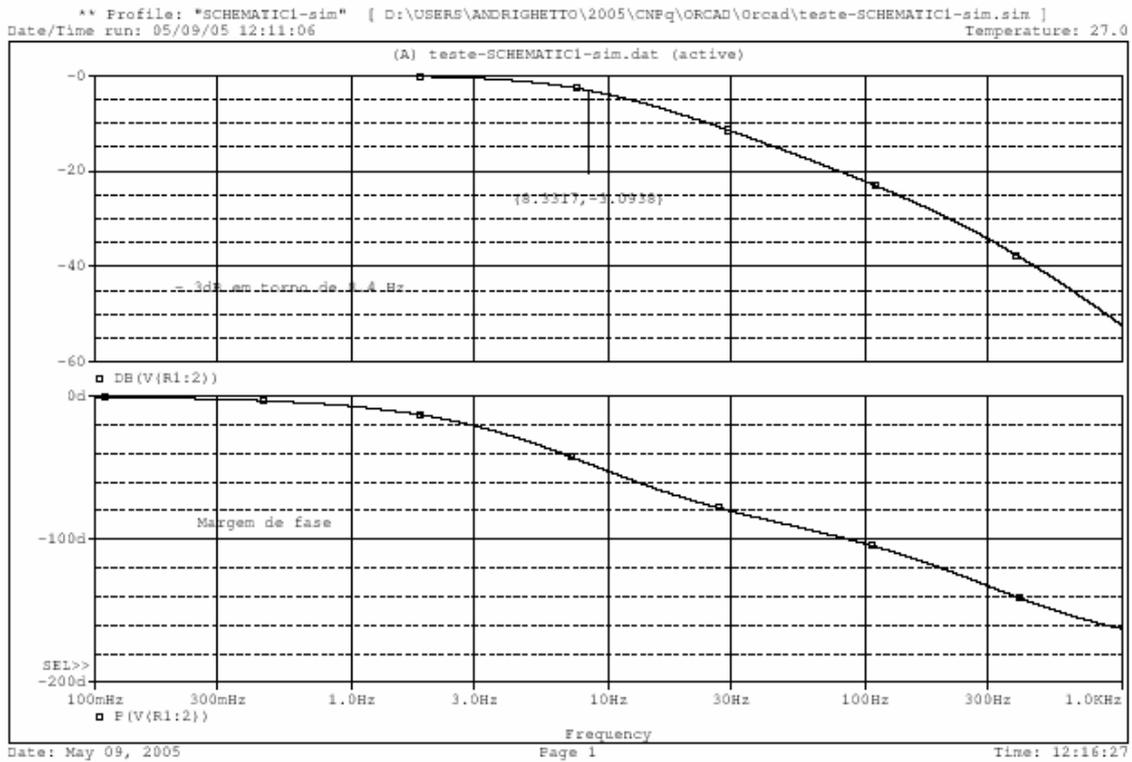


Figura 4.21 – Simulação do filtro passa baixa implementado

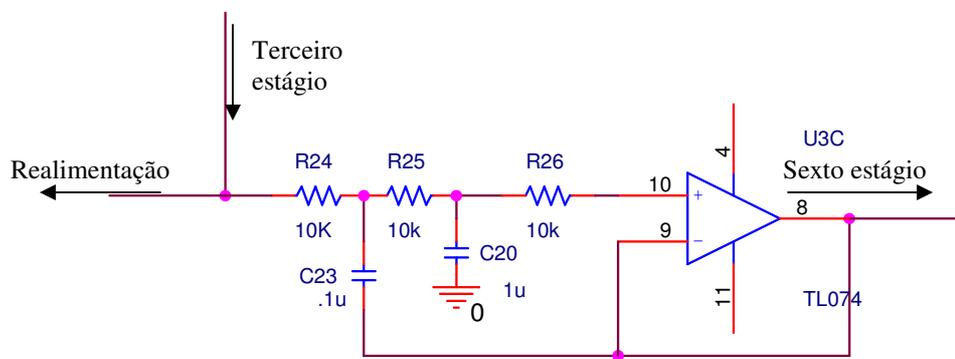


Figura 4.22 – Filtro ativo implementado no quinto estágio

4.3.3.6 – Sexto Estágio: Buffer

O circuito seguidor representado na Figura 4.23 é um circuito tão simples quanto prático. É composto apenas por um AMPOP em que a saída está ligada ao terminal v_o . Facilmente se deduz que a tensão de saída, que é igual a v_i , acompanha a

tensão no terminal v_+ desde que não sejam atingidas as tensões de alimentação do AMPOP (caso em que o dispositivo entra na zona de saturação). Assim temos que $v_O = v_- \approx v_+ = v_i$.

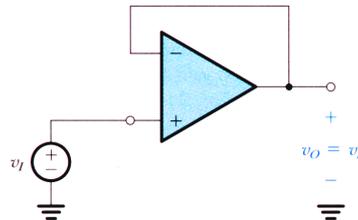


Figura 4.23. Montagem seguidora

Esta montagem tem como principal função tirar partido da alta impedância de entrada, e/ou baixa impedância de saída, do AMPOP de modo a isolar eletricamente dois blocos de circuito independentes ligados em cascata. É vulgarmente usado como bloco de saída de variados circuitos elétricos ou como *circuito tampão/interface* entre dois circuitos.

Assim, o seguidor de tensão da Figura 4.24 é implementado no sexto estágio do processamento do sinal para se ter um isolamento elétrico entre o sétimo estágio e os anteriores, permitindo instalar o sensor próximo ou a até 5 metros do circuito eletrônico e levar o sinal processado via cabo a até 50 metros de distância para se fazer à aquisição dos dados.

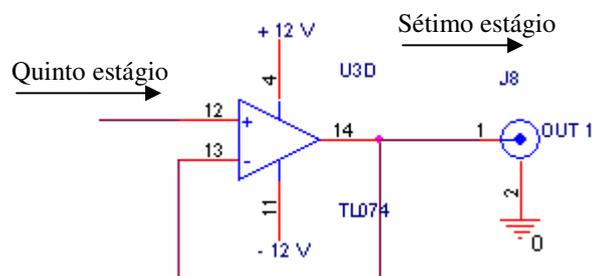


Figura 4.24 – Circuito buffer implementado no sexto estágio

Lembrando que para cada um dos três sensores magnéticos devem ser implementados os circuitos do primeiro ao sexto estágio exceto o segundo estágio que já comporta os três sensores ao mesmo tempo no CI 4053.

Assim, a Figura 4.25 a seguir, apresenta neste estágio as três saídas diferentes para cada sensor orientado segundo o seu eixo nas três componentes vetoriais do Campo Geomagnético.

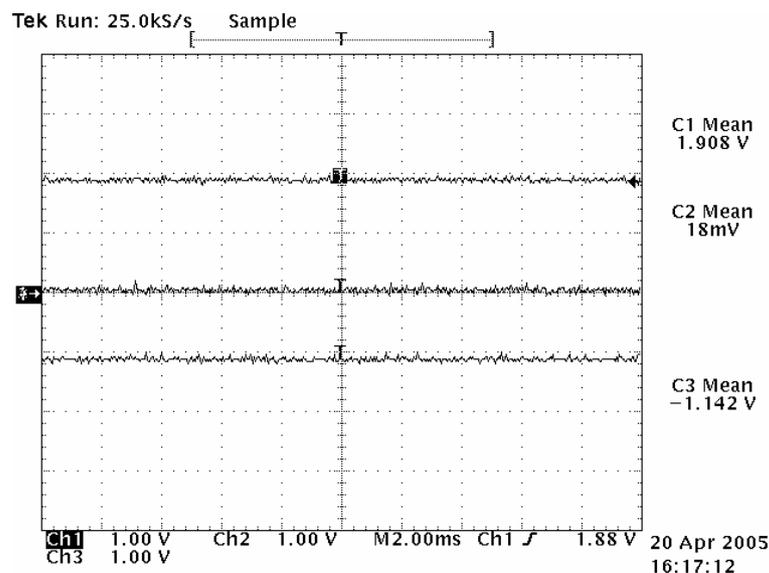


Figura 4.25 – Três medidas referente à saída do sexto estágio para cada sensor nas direções Norte 1.908V, Leste 18mV, e Centro Terrestre -1.142V

5.3.3.7 – Sétimo Estágio: Conversão Analógica/Digital e Interface com PC

Ao final dos seis primeiros estágios descritos até aqui, já com os níveis de tensão tratados e adequados para medidas Geomagnética, basta agora fazer a conexão entre os três níveis de tensão proveniente de cada sensor magnético com um sistema para interface com o usuário.

Pela sua facilidade e simplicidade de operação, utiliza-se um conversor analógico/digital ligado a um computador para que os dados possam ser coletados e plotados de acordo com a finalidade do Projeto.

Nesta implementação, foi utilizado um conversor A/D de 16 bits para suprir a necessidade de se ter medidas com grandezas da ordem de 20000nT. O conversor é o *ADC16 High Resolution Data Logger* fabricado pela empresa *PICO Technology Limited*, com as seguintes especificações técnicas:

N° of channels	8
Resolution	16 bit + sign
Input range	+/-2.5V
Overload protection	+/-30 V
Sampling rate	1 Hz
Accuracy	.1%
Input impedance	>1M Ohm
Input connector	Db25 female
Output connector	Db9 male to PC serial port
Outputs	2 (fixed voltage references)
Supplied software (DOS & Win 3.x/95/NT)	PicoLog data logging software Drivers & examples for Visual basic, Excel, Delphi, C and Pascal



Figura 4.26 – Conversor A/D implementado no magnetômetro

FONTE: <http://www.interwld.com/pico/pico-adc16.htm>

O software que está sendo utilizado no computador conectado ao conversor A/D, para fazer a coleta dos dados, é o próprio *PicoLog data logging software* incluso no pacote de venda deste conversor e está rodando sobre o sistema operacional Windows 98. Os dados são coletados, registrados, e plotados em tempo real e cada

magnetograma é finalizado em 24 horas com uma amostra a cada 2 segundos gerando ao final do dia 43200 pontos coletados.

A tela de operação do software no computador conectado ao magnetômetro através do conversor A/D é ilustrada na Figura 4.27.

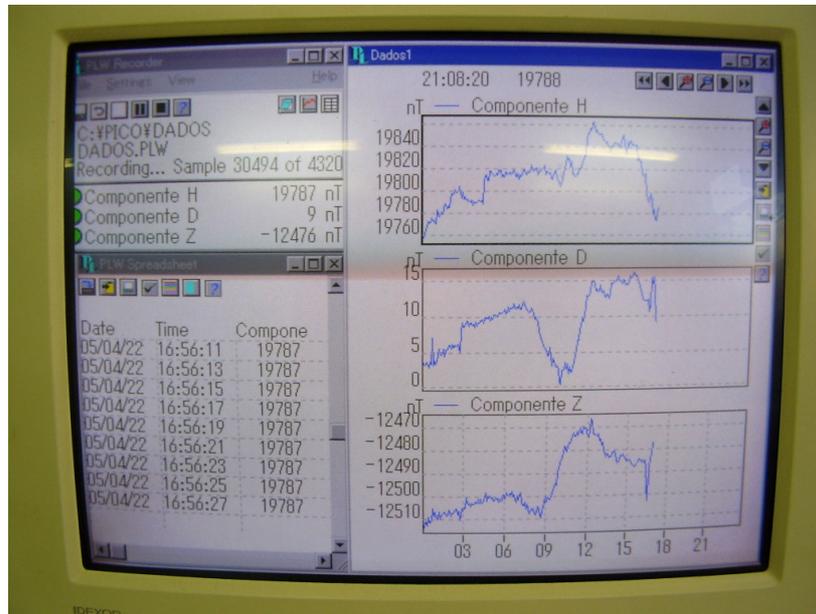


Figura 4.27 – Software rodando em tempo real no dia 22/04/2005 no CRSPE/INPE – MCT , em Santa Maria, RS

4.3.4 – Montagem do Sistema Descrito

Após desenvolver estudos de todas as etapas de implementação prática do Projeto, se torna fácil unir todos os blocos descritos anteriormente para se ter um sistema básico de medidas Geomagnéticas.

Utilizando-se o Software *Orcad Family Release 9.2*, e seus aplicativos, *Capture CIS* e *Layout Plus*, pôde-se implementar todo o circuito do Projeto e desenvolver o layout para a confecção da placa de circuito impresso a ser utilizada.

Todas as etapas para a montagem deste Projeto foram realizadas em bancada para Instrumentação Geomagnética, Figura 4.28, montada especialmente no **Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT**, em Santa Maria, RS,

exceto a impressão da placa para o circuito que, devido à necessidade de ser implementada em dupla face, foi feita através da utilização de uma fresa para protótipos com o auxílio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE/UFSM no âmbito da Parceria INPE – UFSM.

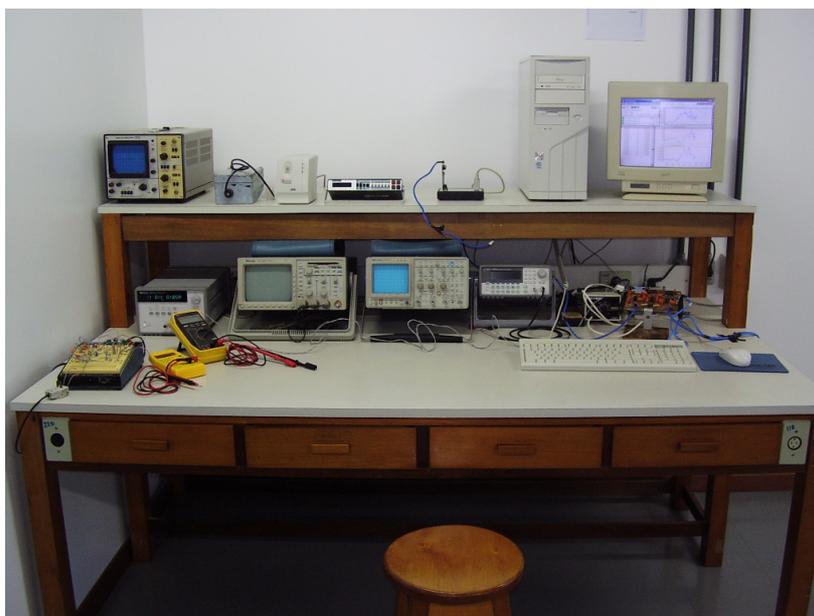


Figura 4.28 – Bancada para Instrumentação Eletrônica do Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

Em anexo, os Anexos A e B ilustram o circuito esquemático completo para excitação e para o processamento dos sinais obtidos nos três sensores e o layout inferior já espelhado bem como o layout superior da placa de circuito impresso, respectivamente.

Após todo o trabalho de montagem e roteamento das trilhas do circuito eletrônico no software *Orcad Family Release 9.2*, o resultado final da placa em dupla face é apresentado na Figura 4.30, vista inferior e Figura 4.31, vista superior.

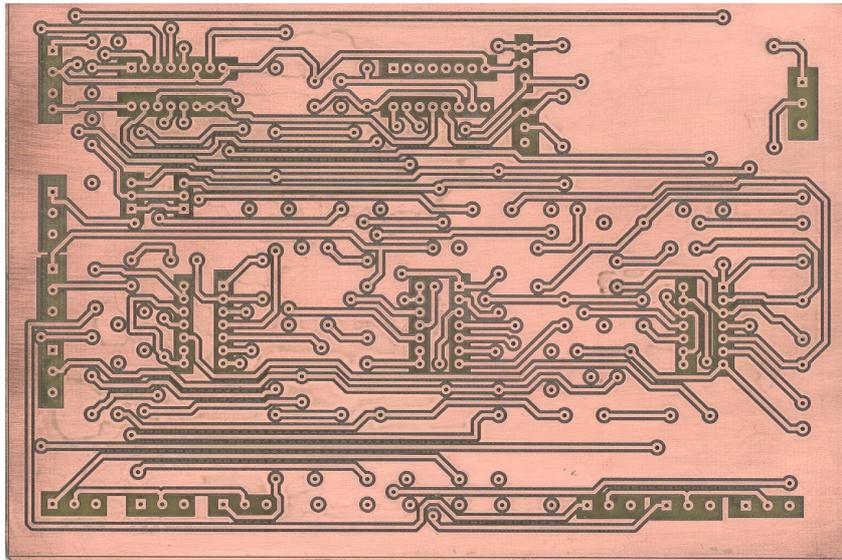


Figura 4.30 Vista inferior do circuito desenvolvido no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT em Santa Maria, RS, para excitação e processamento de sinais obtidos nos três sensores do magnetômetro concebido no Centro Espacial.

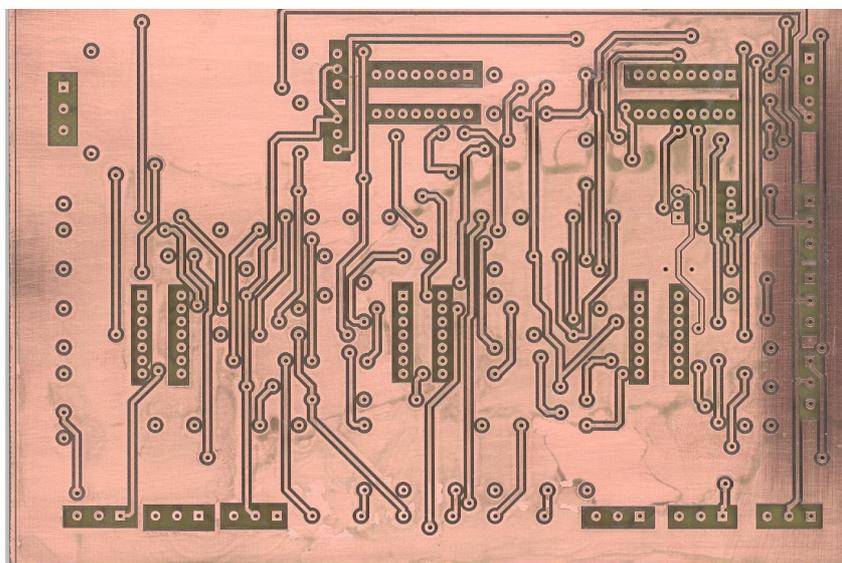


Figura 4.30 Vista inferior do circuito desenvolvido no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT em Santa Maria, RS, para excitação e processamento de sinais obtidos nos três sensores do magnetômetro concebido no Centro Espacial.

Com os materiais e componentes todos em mãos, basta agora apenas soldar os componentes de acordo com a placa que foi roteada e implementada.

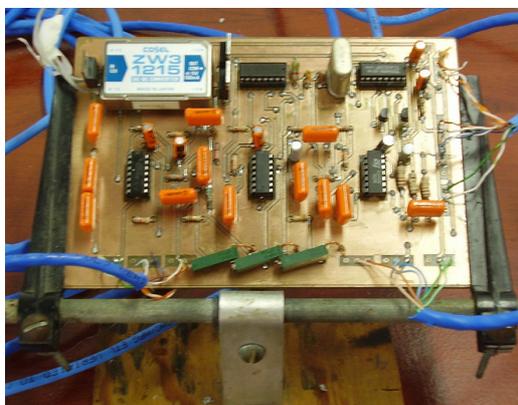


Figura 4.32 – Circuito implementado e desenvolvido no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS

Com o circuito desenvolvido no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE-MCT, totalmente implementado e em funcionamento, os próximos passos foram de testes e análises do funcionamento dos sinais nos diversos estágios explicados no Capítulo 4. Na Figura 4.33 o momento de captura, três canais do osciloscópio, das medidas Norte, Leste e centro da Terra apresentados na Figura 4.25.

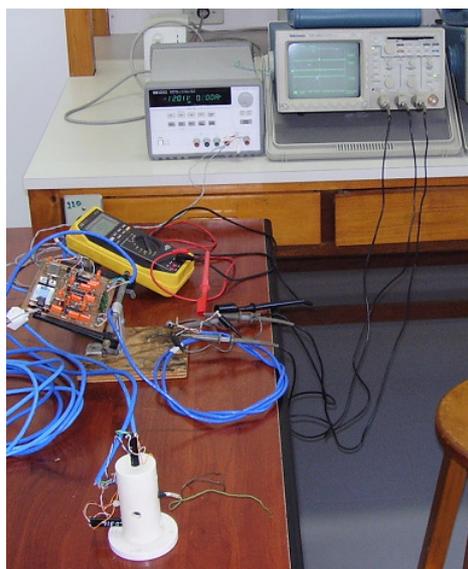


Figura 4.33 – Realização de testes visualizados em osciloscópio em bancada no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS

Com a implementação do conversor A/D e a interface com o PC foi possível realizar testes diários, com coleta de dados e gráficos das variações diurnas do Campo Geomagnético, a fim de aprovar o funcionamento do protótipo implementado.

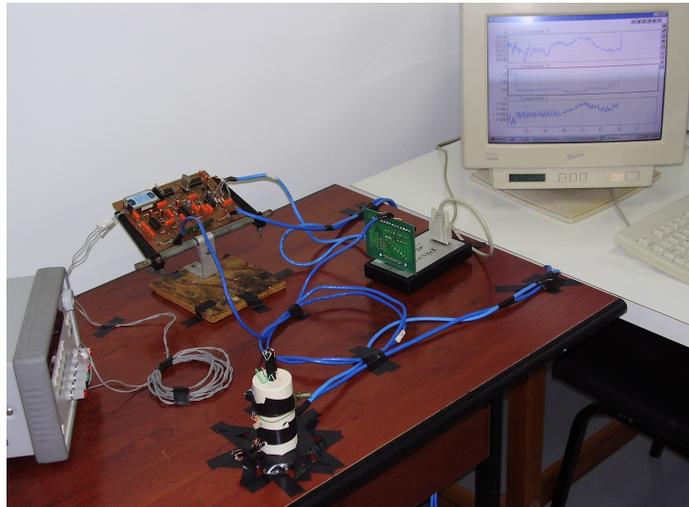


Figura 4.34 – Sistema em pleno funcionamento para testes em bancada, no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS

4.4 – RESULTADOS OBTIDOS

4.4.1 – Linearidade

Com uma única realimentação implementada no circuito de processamento do sinal, é possível fazer com que o sensor seja linear por uma faixa bastante extensa de medidas do Campo Geomagnético. Entende-se, assim, que para este propósito o magnetômetro não necessita de uma mudança de escala para efetuar medidas geomagnéticas.

Para se fazer uma boa análise dos dados obtidos num sensor magnético, o ideal seria fazer uma calibração e aferição com a disposição de um aparato que produza um campo magnético conhecido e que o sensor esteja colocado numa câmara magneticamente blindada. Mas como, até o momento, um sistema desses não está

disponível aqui, a melhor alternativa encontrada foi à comparação de variações diurnas detectadas pelo magnetômetro implementado com as de outros magnetômetros em operação. Assim, com os magnetômetros operando no mesmo local pode-se observar a similaridade nas medidas do Campo Geomagnético.

Para a comparação com os resultados obtidos no magnetômetro implementado neste Projeto, concebido e desenvolvido no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, foram utilizados os dados coletados pelo magnetômetro NAROD, fabricado pela Narod Geophysics do Canadá, que se encontra instalado e em operação no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT e operando segundo a taxa de variação de 1Volts para 10000nT, admitindo a sua ótima confiabilidade para uma linearidade de medidas bastante satisfatória.

4.4.2 – Operação do Magnetômetro

Para a análise de funcionamento do novo magnetômetro implementado, pelo CRSPE/INPE-MCT O equipamento foi levado até a Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra – RS (29.43°S, 53.82°W) durante os dias de 09 de maio a 23 de maio de 2005, onde o Engenheiro Eduardo Andrighetto efetuou medidas de intensidade do Campo Geomagnético a fim de serem feitas comparações com os resultados obtidos através dele e os demais magnetômetros em funcionamento no Observatório.

Com a intenção de se ter medidas limpas e com o menor nível possível de ruídos, o sensor fluxgate foi enterrado a cerca de 1 metro de profundidade e os cabos de conexão entre o sensor, a placa de instrumentação, e o sistema de aquisição de dados foram utilizados com blindagem eletromagnética.



Figura 5.1 – Vista panorâmica da janela do Laboratório de Geomagnetismo onde o sistema foi instalado para operação, no local externo do Prédio 2, onde o sensor fluxgate foi instalado, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.

O Sistema sensor de três coordenadas foi alinhado e orientada nas direções norte, leste e vertical, tendo por base uma bússola e a informação do sensor leste-oeste que indica campo nulo. Para garantir uma magnetização uniforme dos três núcleos de cada sensor, primeiro foi apontado o sensor leste-oeste para o norte, onde se tem a máxima intensidade de campo e ajustado, via realimentação, para indicar um valor próximo à 19000nT. Em seguida, este sensor foi girado para o leste até que sua medida informasse campo nulo, para se ter variações em torno de 0nT, assim, perpendicularmente, apontando para o norte o sensor norte-sul, foi ajustado também para algo em torno de 19000nT já que o Campo Geomagnético tem variações nessa ordem de grandeza para esta direção. Quanto ao sensor para medidas na direção do núcleo do Planeta Terra foi feita uma plataforma plana para o sistema sensor de maneira que este sensor ficasse em direção totalmente vertical e ajustado para medições em torno de -12000nT conforme a convenção adotada para o Hemisfério Sul.



Figura 5.2 – Magnetômetro NAROD – DGE/CEA/INPE – MCT e o magnetômetro desenvolvido e implementado no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, instalados no Laboratório de Geomagnetismo do Observatório Espacial do Sul do CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS

O sistema de aquisição de dados do magnetômetro implementado no CRSPE/INPE-MCT, foi montado na Estação Geomagnética no Observatório Espacial do Sul, ao lado dos demais magnetômetros em operação, para que os resultados estivessem expostos a iguais condições e as medidas pudessem ser as mais próximas possíveis entre eles.

O programa utilizado na coleta e plotagem dos gráficos do sistema implementado é o próprio do conversor A/D utilizado para a aquisição dos dados, *PicoLog data logging software*, nele, foi habilitada uma função de filtragem matemática que ajuda a evitar ruídos nos resultados que são coletados de acordo com a seguinte fórmula pré-processada:

$$\text{novo valor} = \text{antigo valor} + \frac{(\text{leitura atual} - \text{antigo valor})}{\text{fator de filtro}} \quad (5.1)$$

Onde o *novo valor* depende de um *fator de filtro* que retarda as variações do sinal detectado, evitando assim que variações bruscas de medidas do campo ambiente, as que não interessam, sejam arquivadas pelo sistema. Para os gráficos plotados pelo magnetômetro implementado, a seguir, foi utilizado o filtro matemático com *fator de filtro* = 10 e o que se pode perceber como resultado disso é que os gráficos estão bem nítidos e claros com poucas exceções quando comparados aos gráficos obtidos pelo magnetômetro NAROD.

A seguir, são apresentados os magnetogramas coletados pelo sistema para a análise e comparação dos dados obtidos entre os magnetômetros em operação na Estação Geomagnética. Os gráficos apresentam em suas ordenadas a medida do Campo Geomagnético em nanoteslas e nas abscissas o tempo em *Universal Time*. Os dados foram coletados em intervalos de 2 segundos em ambos, obtendo-se assim, 43200 pontos por gráfico, o que representa 24 horas de coleta.

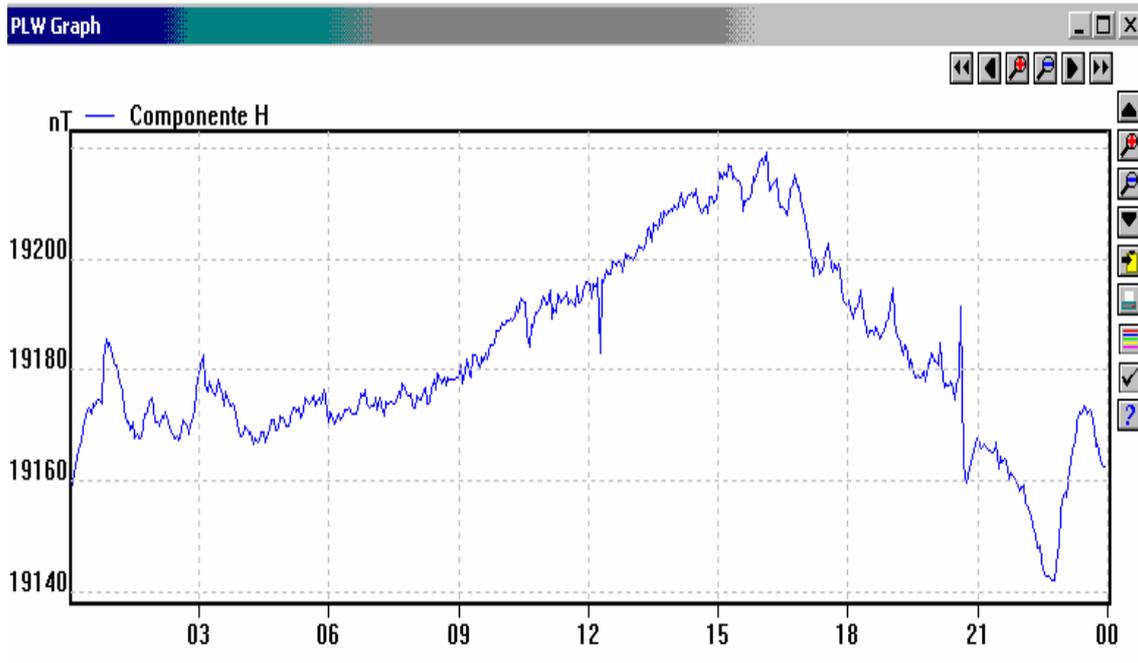


Figura 5.3 – Aquisição da componente H no dia 09/05/12005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

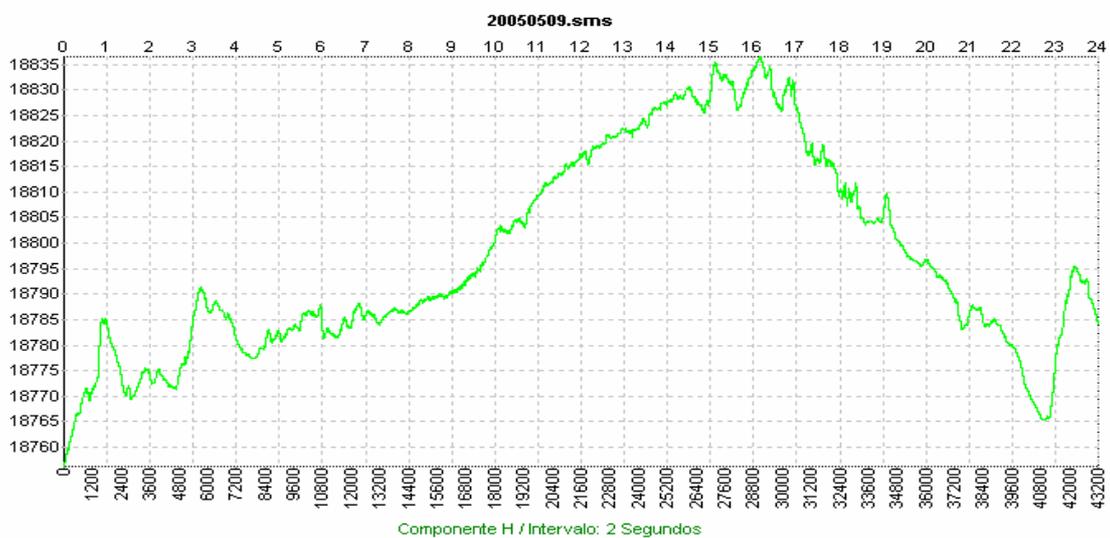


Figura 5.4 – Aquisição da componente H no dia 09/05/12005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

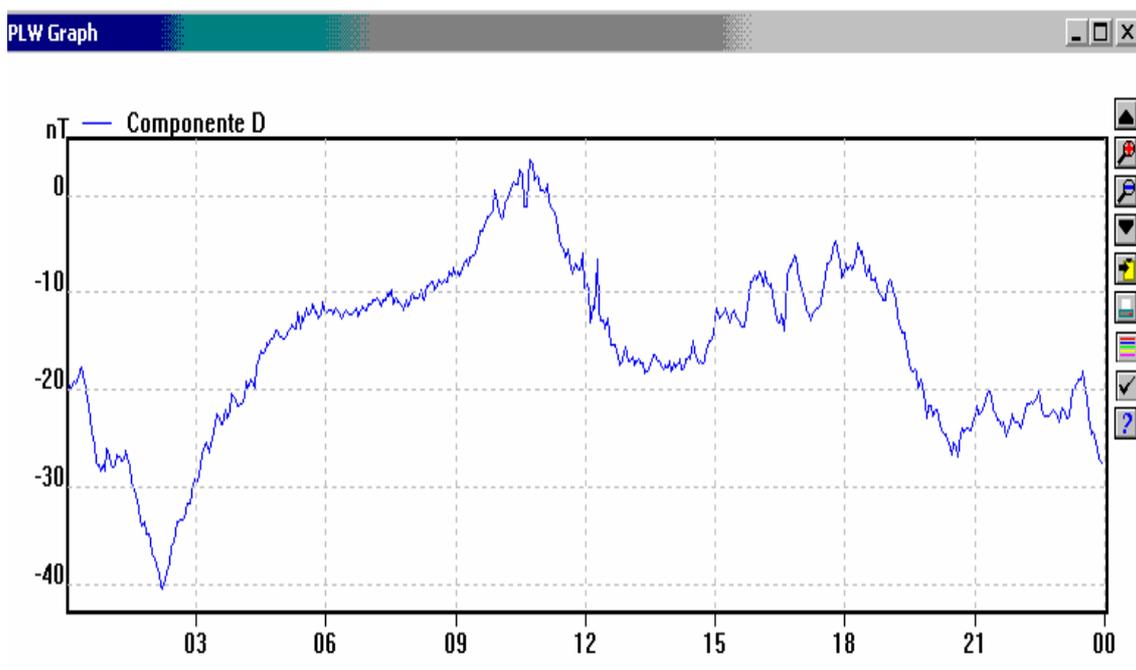


Figura 5.5 – Aquisição da componente D no dia 09/05/12005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

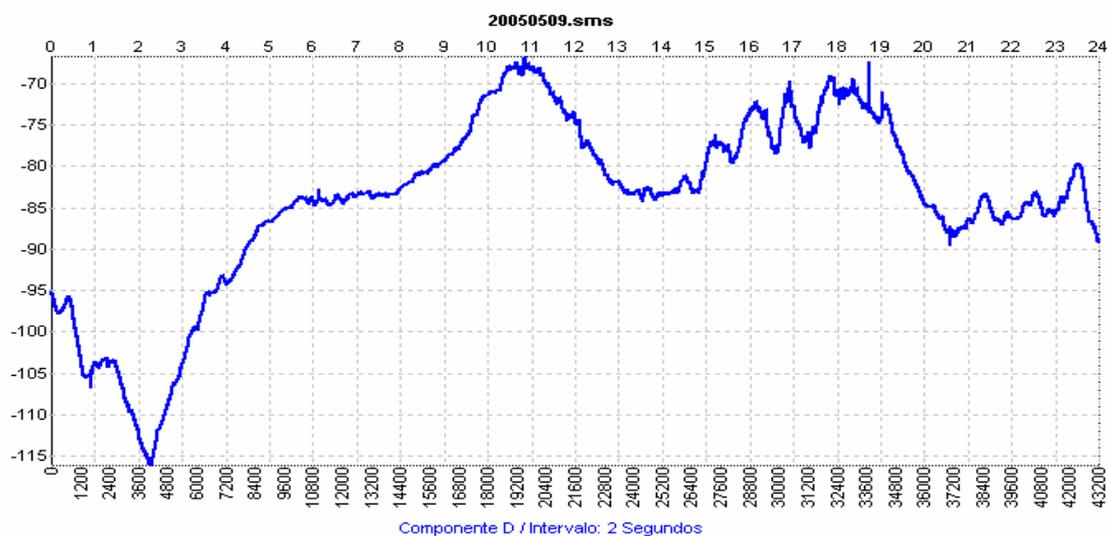


Figura 5.6 – Aquisição da componente D no dia 09/05/12005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

Para a primeira comparação, dados de medida da componente H no dia 9 de maio de 2005 da Figura 5.3, com o gráfico do magnetômetro NAROD da Figura 5.4, pode-se observar uma similaridade satisfatória, registrando o valor de pico por volta das 15 horas *UT* quando a longitude local fica exatamente de frente para o Vento Solar. Ainda, pode-se perceber que os dois gráficos têm variação com cerca de 75nT e que os picos acentuados encontram-se sincronizados no mesmo horário. Logo, com poucas exceções causadas por ruídos externos, pode-se concluir que as medidas da componente H estão de acordo nos dois gráficos.

Igualmente, para a componente D observada também no dia 9 de maio de 2005, nas Figuras 5.5 e 5.6, pode-se perceber os picos acentuados em momentos quase que exatos nos dois gráficos e uma variação em torno de 40nT entre o ponto mínimo e o ponto máximo a que chegou neste dia.

Sendo assim, com a comparação destas duas componentes H e D, já se pode afirmar com total certeza que o magnetômetro implementado neste Projeto tem um funcionamento bastante satisfatório e que baseado na confiabilidade das informações do magnetômetro NAROD variar 1Volt a cada 10000nT de campo externo, podemos igualmente dizer que o magnetômetro implementado aqui obedece a mesma linearidade de medida, obtendo-se assim um sucesso inicial na construção de um sistema de medidas geomagnéticas.

Para finalizar este Capítulo, nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, apresentamos os dados das intensidades do campo Geomagnético nos gráficos, monitorados durante a tempestade magnética ocorrida no dia 15 de maio de 2005, provando definitivamente o bom funcionamento, do novo Sistema implementado, no CRSPE/INPE-MCT, quando comparado com os magnetogramas obtidos pelo magnetômetro NAROD e com os dados coletados por magnetômetros do Observatório Magnético do Observatório Nacional, em Vassouras, RJ (22.40°S, 43.65°W).

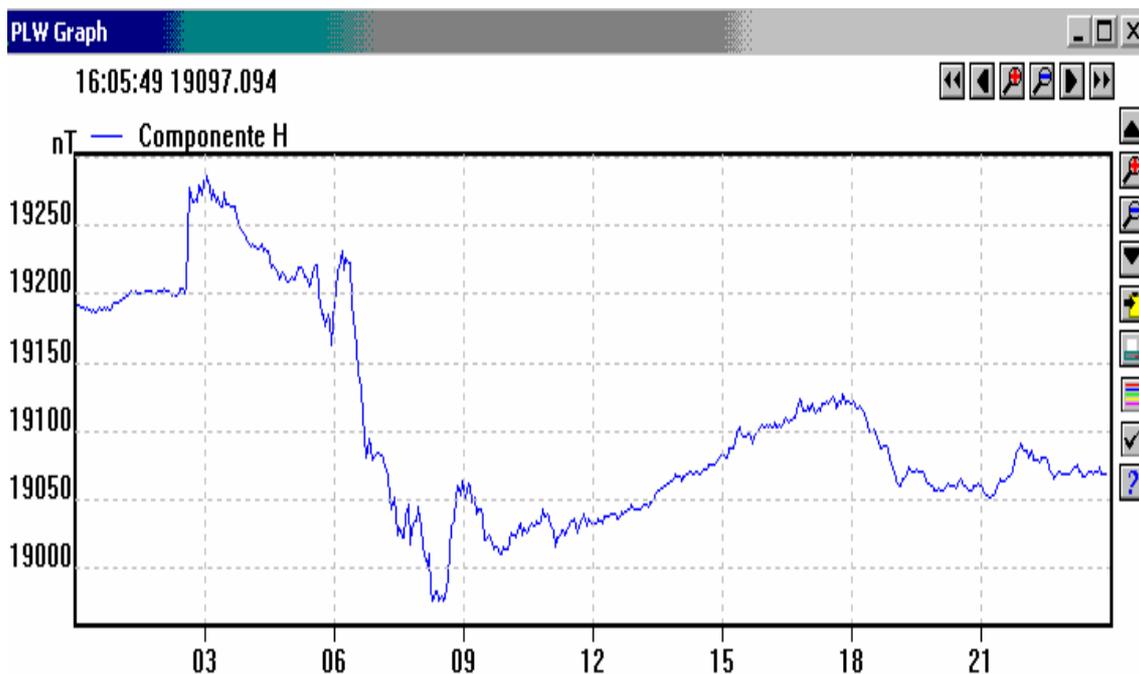


Figura 5.7 – Aquisição da componente H durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

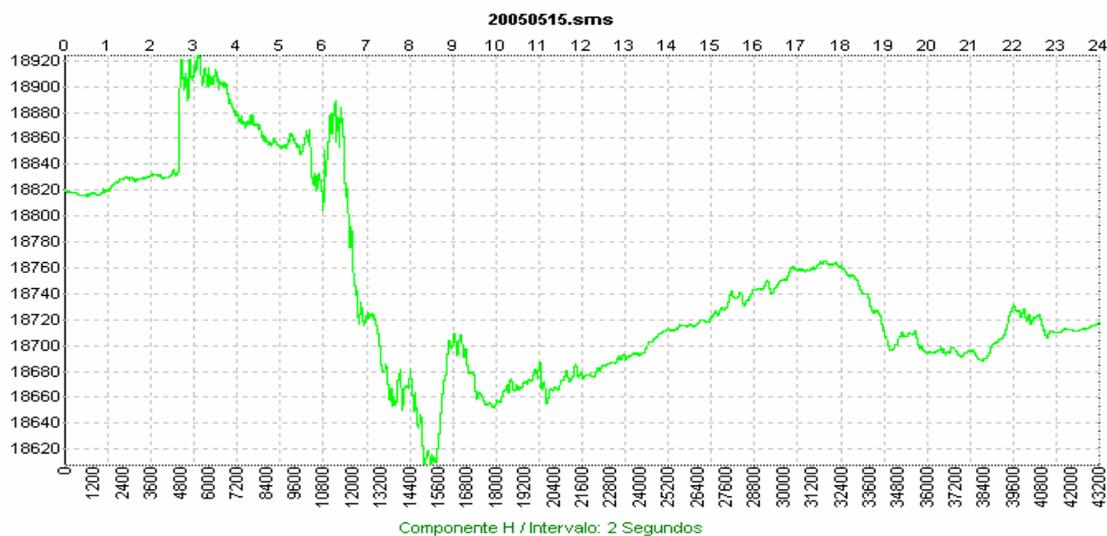


Figura 5.8 – Aquisição da componente H durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

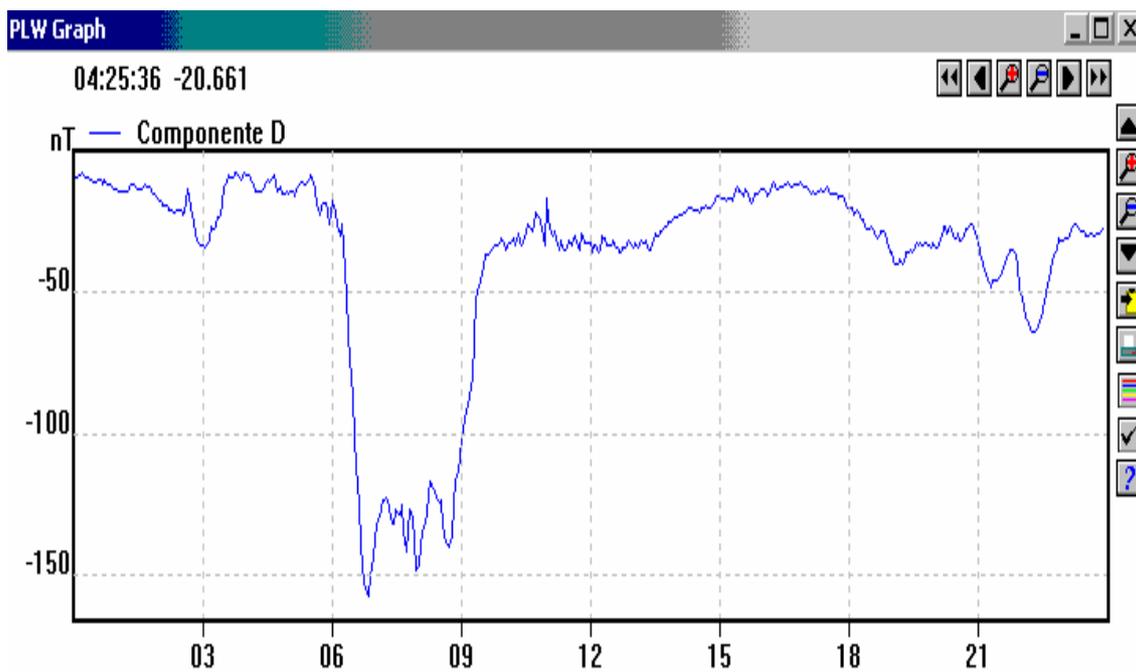


Figura 5.9 – Aquisição da componente D durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

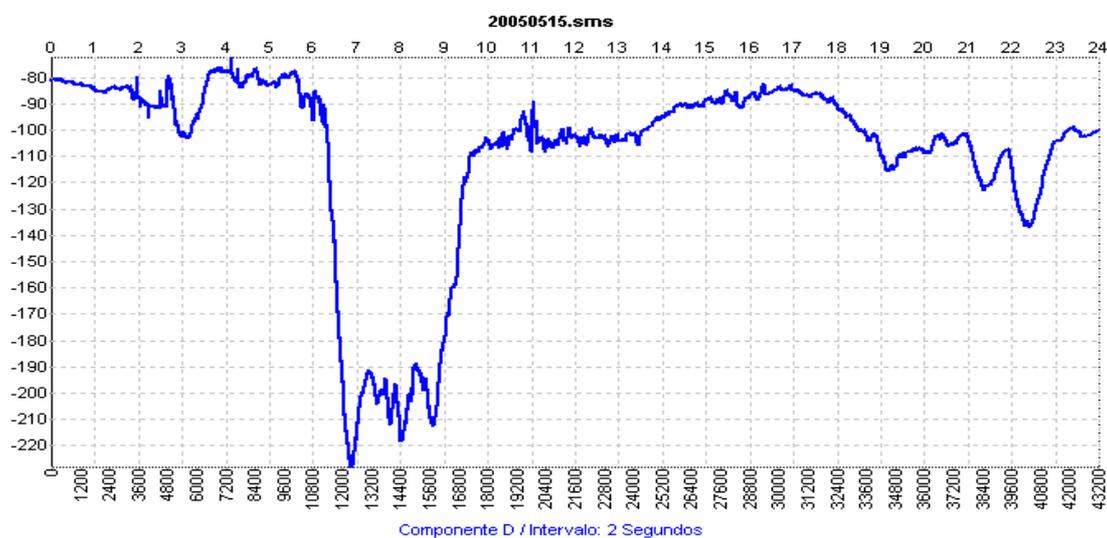


Figura 5.10 – Aquisição da componente D durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS



Figura 5.11 – Aquisição da componente Z durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

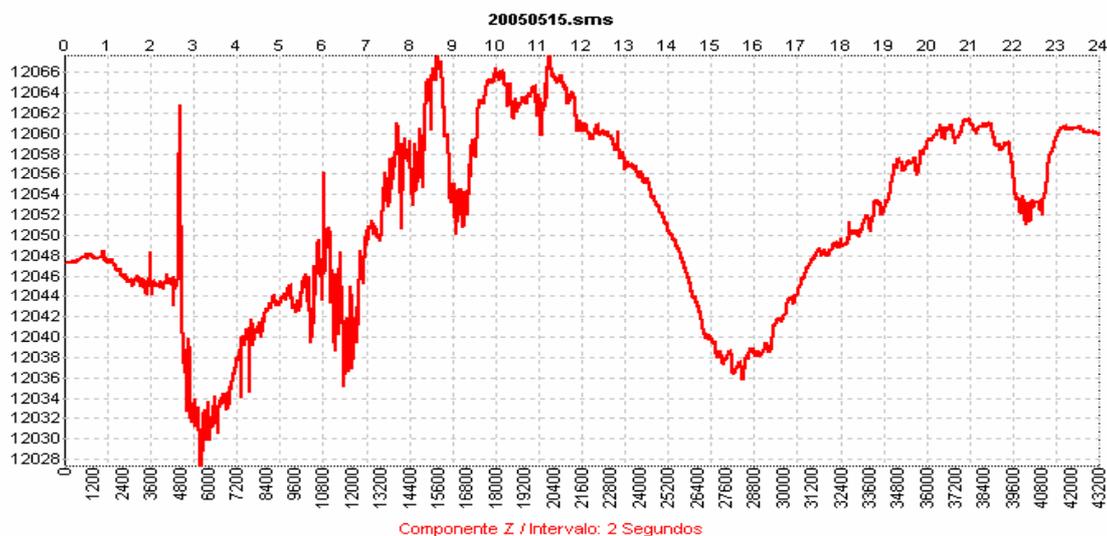


Figura 5.12 – Aquisição da componente Z durante a tempestade magnética no dia 15/05/12005 do magnetômetro NAROD em UT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS

Para a componente Z, observamos o espelhamento horizontal nas Figuras 5.11 e 5.12 devido ao fato da inversão nas ligações eletrônicas do circuito sensor no Sistema desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT, para se ter à convenção adotada para o Hemisfério Sul onde o Campo Geomagnético varia em torno de -12000nT , mas com a mesma taxa de variação entre as duas medidas.

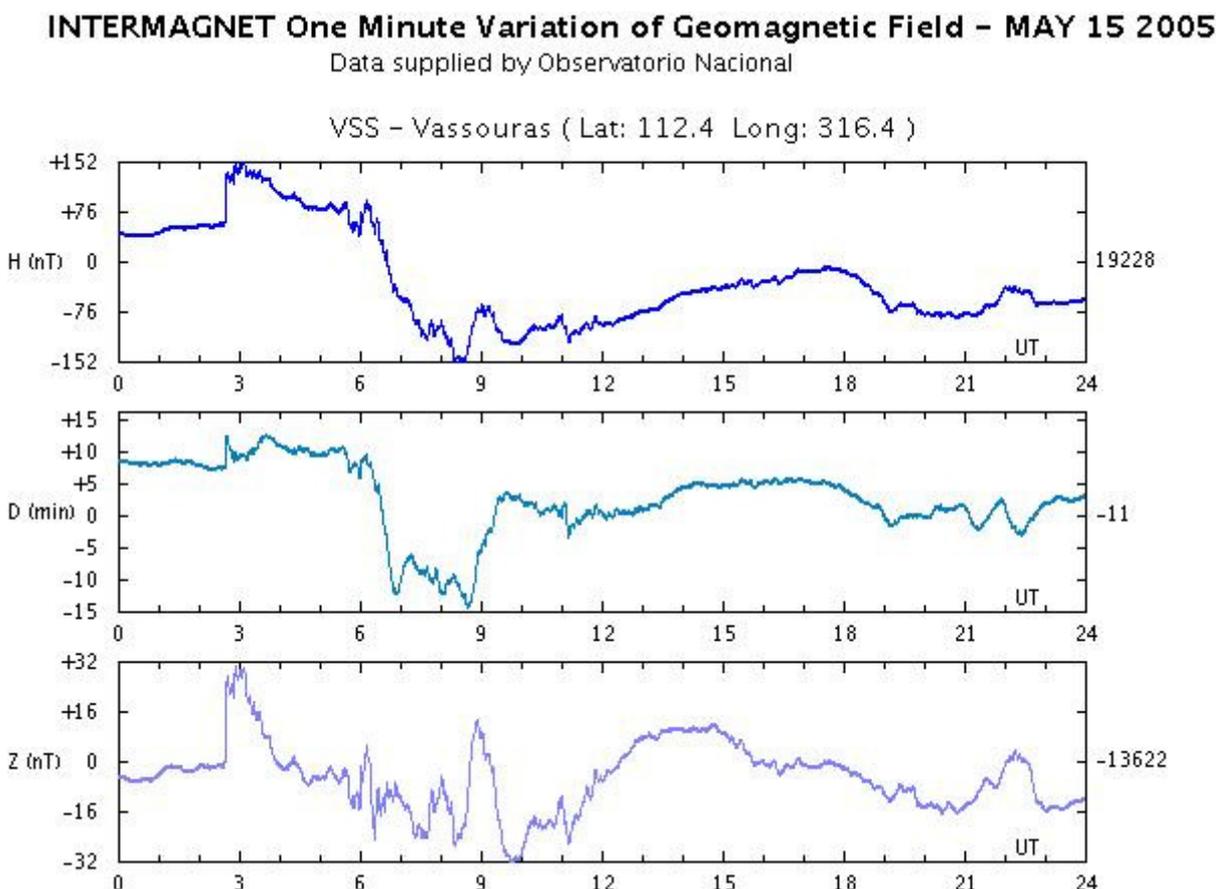


Figura 5.13 – Magnetogramas obtidos durante a tempestade magnética do dia 15/05/2005 no Observatório Geomagnético do Observatório Nacional, em Vassouras, RJ.

FONTE: <http://www.intermagnet.org>

Ao se comparar as Variações Diurnas monitoradas pelo magnetômetro NAROD e pelo magnetômetro desenvolvido no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, podemos concluir que o Sistema concebido e

implementado no Laboratório de Magnetosfera do CRSPE/INPE – MCT respondeu perfeitamente aos níveis da Variação Diurna observada durante a tempestade magnética do dia 15 de maio de 2005, para as três componentes, H, D e Z, pontos que variam linearmente entre os dois magnetômetros.

Quando as comparações são feitas com os magnetogramas observados durante a tempestade magnética do dia 15/05/2005 com os dados obtidos com os magnetômetros do Observatório Geomagnético do Observatório Nacional, em Vassouras, RJ, observa-se poucas diferenças entre as medidas as quais são explicadas pelo fato do magnetômetro desenvolvido no CRSPE/INPE – MCT estar monitorando o Campo Geomagnético na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, no Centro Geográfico do Rio Grande do Sul, em São Martinho da Serra, RS.

CAPÍTULO 5

PERSPECTIVAS FUTURAS

Com o sucesso na implementação de um Sistema Magnetômetro inicial básico para medidas geomagnéticas realizado pelo ex-bolsista, hoje Engenheiro Eduardo Andrighetto, o Bolsista Sandro F. Bertagnolli tem estudado as técnicas e os resultados obtidos com este Sistema com a finalidade de observar possibilidade de aperfeiçoar os resultados e prever futuras melhorias no seu desempenho e funcionamento, como a inserção de filtros para frequências mais baixas no sinal de informação, a fim de reduzir ruídos que podem aparecer devido a mudanças no Campo Magnético ambiente com períodos relativamente pequenos e que podem ser causados, por exemplo, por uma pessoa circulando com material ferromagnético próximo ao sensor, tais como, relógios, fivelas de cintos ou mesmo outros equipamentos.

Como perspectiva futura, o Bolsista Sandro F. Bertagnolli pretende, ainda, reduzir o consumo de energia do Sistema Magnetômetro do CRSPE/INPE-MCT, para operá-lo apenas com a utilização de uma bateria para alimentar o seu circuito e assim poder deixar o sistema coletando dados de modo contínuo e interrupto. Além disso, o objetivo do Bolsista é desenvolver e construir um novo magnetômetro com sensor do tipo anel e implementar um novo sistema digital, permitindo gravar os dados em memórias sólidas com a possibilidade de acesso em tempo real através de conexão por internet.

Paralelamente, o Bolsista Sandro F. Bertagnolli pretende continuar realizando estudos na área de Geofísica Espacial com concentração na área de Geomagnetismo e Instrumentação, podendo, assim, estudar os dados obtidos através dos magnetômetros em operação, a fim de analisar as respostas das variações diurnas apresentadas nos magnetogramas.

Em suma, o Bolsista pretende aprimorar o conhecimento do Sistema Magnetômetro e continuar participando das atividades técnicas, científicas de operação



da Estação e Laboratório Geomagnético do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.

CAPÍTULO 6

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 – CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, este trabalho apresenta um Relatório completo das atividades exercidas para a construção de um Sistema Magnetômetro básico de medidas Geomagnéticas, descrito por partes, que seguem desde conceitos iniciais básicos na área de Geofísica Espacial, entrando logo após nas teorias e tecnologias de instrumentação, e na seqüência, descrevendo um procedimento experimental onde são detalhados todos os estágios de concepção e desenvolvimento dos circuitos eletrônicos 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 magnetômetro de núcleo saturado desenvolvido e implementado no CRSPE/INPE-MCT, são descritos os procedimentos para a instalação e operação em uma Estação Geomagnética. A partir desta etapa, são coletados os dados e feitas as devidas análises de funcionamento, baseando-se para isso, na comparação entre os registros do magnetômetro desenvolvido e construído no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais- CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria, RS, e os registros do magnetômetro fabricado pela Narod Geophysics do Canadá, que está instalado e opera no Observatório Espacial do Sul- OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS, em parceria e colaboração com a Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CRSPE/INPE – MCT, em São José dos Campos, SP, para que se tenha uma comparação de linearidade dos resultados obtidos com o Sistema Fluxgate de três eixos implementado no CRSPE/INPE – MCT.

Através da comparação das componentes e dos magnetogramas coletados durante a tempestade magnética ocorrida no dia 15/05/2005, entre ambos os Sistemas de Magnetômetros, podemos concluir que o Sistema desenvolvido e implementado no CRSPE/INPE-MCT, tem um funcionamento bastante satisfatório e uma linearidade muito similar entre os dois magnetômetros. Dessa forma, sendo a variação geomagnética observada pelo magnetômetro NAROD de ótima confiabilidade, é comparável e idêntica ao registro da variação geomagnética adquirida pelo magnetômetro concebido, desenvolvido e contruído no CRSPE/INPE-MCT, pelo ex-Bolsista do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, hoje Engenheiro Eduardo Andrighetto, trabalho e atividades que estamos dando continuidade com muita satisfação e aprendizado. Podemos concluir que o Sistema Magnetômetro desenvolvido e contruído neste Projeto é um sucesso real.

Com base nos magnetogramas obtidos com o Sistema desenvolvido pelo CRSPE/INPE-MCT, podem-se prever algumas melhorias quanto a estabilidade do sinal, procurando remover ruídos indesejáveis para que o Sistema apresente seus dados em gráficos, o mais próximo quanto possível e unicamente das Variações Diurnas do Campo Geomagnético, realizando uma melhor filtragem do sinal, como sequência deste Projeto. Além disso, podem-se obter melhorias, tornando o sistema auto-suficiente com a inclusão de baterias e placas solares para a alimentação do circuito eletrônico e automatizar o processo, com a montagem de um sistema on-line de medidas para se ter acesso às informações em longa distância através de conexão via Internet, e permitir a fabricação em série do Sistema Magnetômetro do CRSPE/INPE-MCT na Região Sul, prioritariamente no Estado do Rio Grande do Sul e Mesorregião da Grande Fronteira do MERCOSUL onde se situa a Anomalia Magnética do Atlântico Sul, em especial no Brasil.

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 / LAPE – 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^o 09, 1986.
- Serson, P. H., and Hannaford, W. L. W.** A Portable Eletrical Magnetemoter, Can. J. Technol. V. 34, p.232-243, 1956.
-



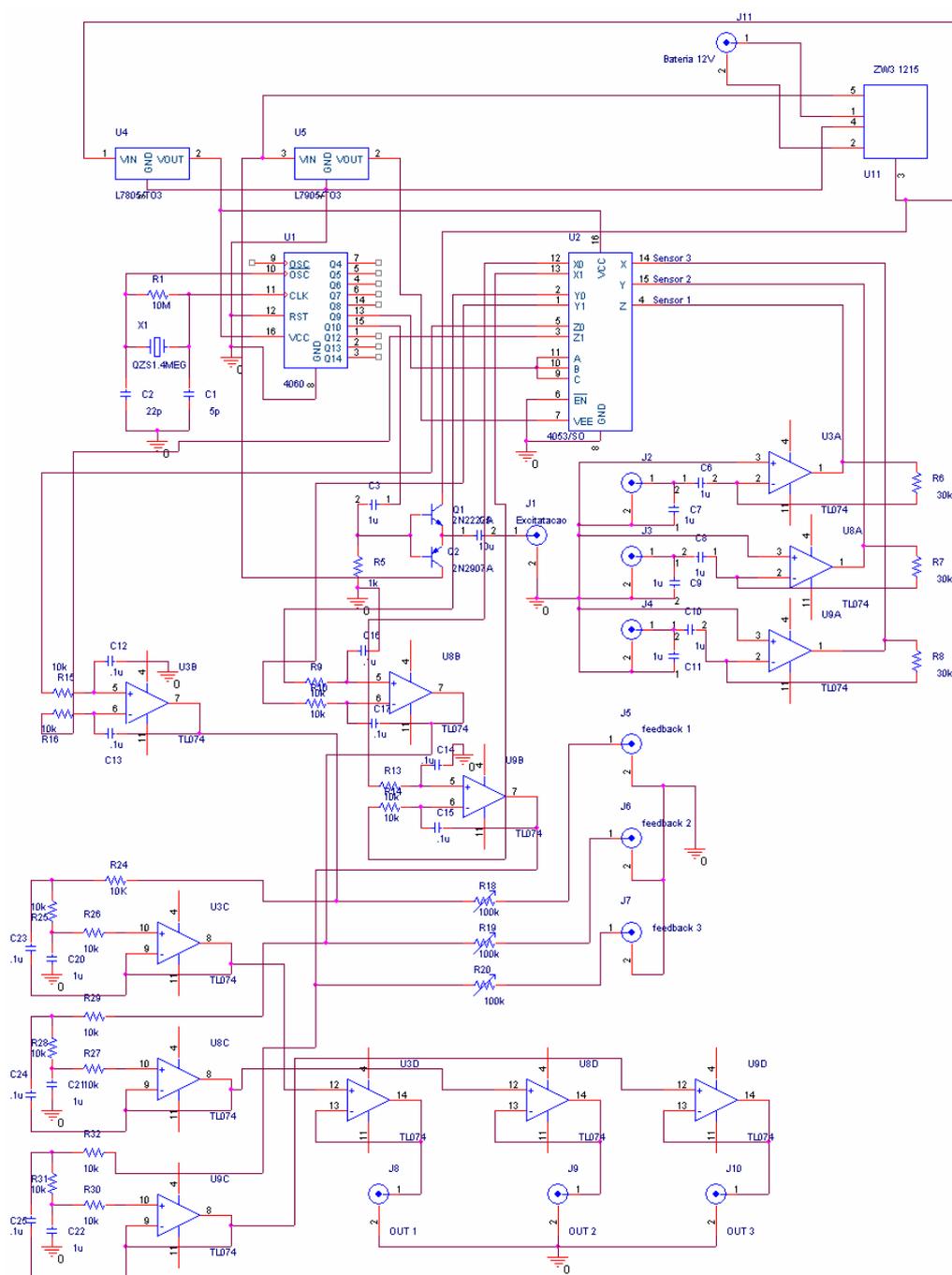
Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23.

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.

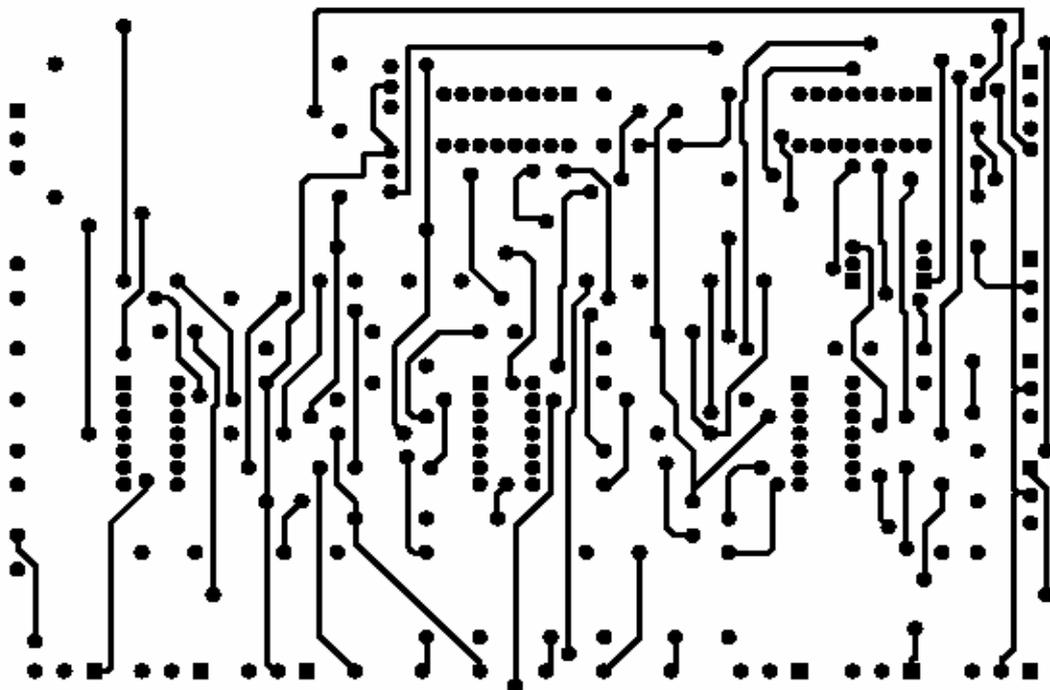
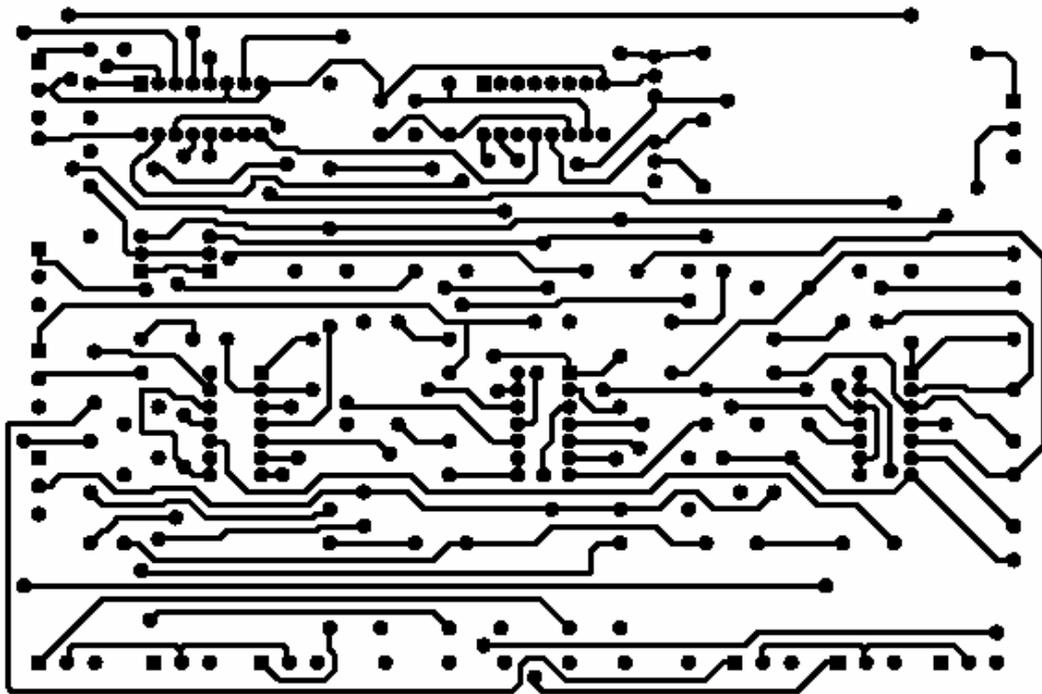
Trivedi, N.B.; Ogura, F.X.K.; De Andrade, J.C.; Da Costa, J.M.; Barreto, L.M. -

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

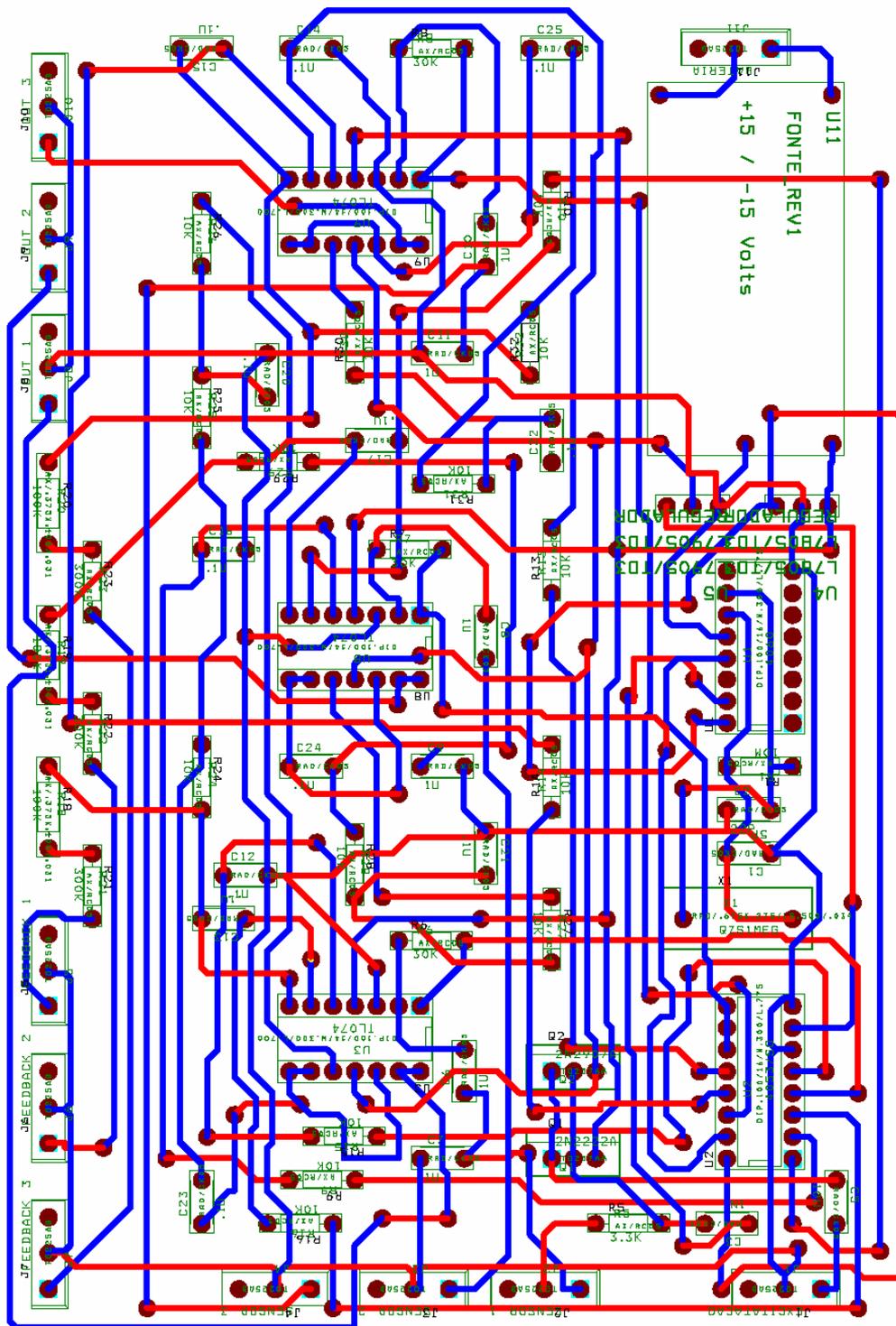


Title	
MAGNETOMETRO FLUXGATE	
Size	Document Number
	Doc = Eduardo Andinghetto
Date:	Monday, May 09, 2005
	Sheet 1 of 1

ANEXO A – Circuito completo para implementação do magnetômetro desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT



ANEXO B – Layout da placa inferior espelhado e superior desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT



ANEXO C – Ligação eletrônica dos componentes fixos na placa do circuito desenvolvido no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

COMPARAÇÃO ENTRE VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS OBSERVADAS EM VASSOURAS – RJ (22.40 S, 43.65 W) E SÃO MARTINHO DA SERRA – RS (29.43 S, 53.80 W)¹

Everton Frigo², Nalin B. Trivedi³, Virnei S. Moreira⁴, Eduardo Andrichetto⁵,
Jairo F. Savian⁶ e Nelson J. Schuch⁷

O Sol emite partículas energéticas – Plasma Solar - continuamente em todas as direções. A Terra possui ao seu redor um campo magnético – chamado Campo Magnético Terrestre ou Campo Geomagnético – que impede as partículas emitidas continuamente pelo Sol – que constituem o chamado Vento Solar – atinjam a Terra diretamente. A região delimitada pelas linhas do Campo Geomagnético é denominada Magnetosfera Terrestre. A interação da radiação solar ultravioleta com a Atmosfera neutra entre 75 e 1000 km de altura forma a Ionosfera Terrestre. Em dias de atividade solar normal, ou magneticamente quietos, as variações diurnas regulares são geradas pelos sistemas de correntes elétricas que fluem na Ionosfera. Devido ao movimento da Terra, que gira abaixo dessas correntes elétricas, ocorrem as chamadas variações diurnas com período de 24 horas. Quando ocorre uma tempestade geomagnética, as variações de origem magnetosférica prevalecem em relação às variações de origem ionosférica. Após a passagem pela Ionosfera as pulsações geomagnéticas sofrem algumas modificações e chegam a Terra como ondas eletromagnéticas. Existem vários locais espalhados ao longo da superfície da Terra, e a bordo de satélites, onde estão instalados equipamentos capazes de medir as variações às quais o Campo Geomagnético é submetido. A região do nosso Planeta onde o Campo Magnético Terrestre apresenta a sua menor intensidade é denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS -, e o centro da AMAS é localizado na região Sul do Brasil. O Observatório Geomagnético localizado junto ao Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT - no município de São Martinho da Serra – RS, está muito próximo ao centro da AMAS. O estudo dos dados geomagnéticos adquiridos em São Martinho da Serra é muito importante para entender-se quais os processos físicos que estão ocorrendo na Magnetosfera e Ionosfera Terrestre na região da AMAS e o que os diferenciam dos fenômenos observados em outras regiões onde o Campo Geomagnético é mais intenso. O método utilizado para atingir-se esse objetivo é a realização de comparações entre dados geomagnéticos de São Martinho da Serra e da Estação Geomagnética de Vassouras, que fica na borda da AMAS. Como resultado desse estudo, verifica-se que, em dias magneticamente calmos, observa-se nas duas estações geomagnéticas variações diurnas regulares, e nos dias magneticamente perturbados as pulsações magnéticas observadas em São Martinho da Serra possuem uma amplitude maior quando comparadas às pulsações geomagnéticas observadas em Vassouras.

1 - Trabalho desenvolvido no LACESM /CT/UFSM e no OES/CRSPE/INPE-MCT

2 - Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

3 - Orientador, LACESM/CT/UFSM – FATEC/FURNAS/INPE

4 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

5 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica, LACESM/UFSM

6 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

7 - Co-autor, Coordenador da Ação de Implantação do CRSPE/INPE – MCT

12th International Symposium of Undergraduate Research of University of São Paulo

**MONITORAMENTO CONTÍNUO DO CAMPO
MAGNÉTICO TERRESTRE NA REGIÃO DA ANOMALIA
MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL - AMAS**

**CONTINUOUS MONITORING OF EARTH'S MAGNETIC FIELD
IN THE REGION OF SOUTH ATLANTIC
MAGNETIC ANOMALY - SAMA**

**Everton Frigo^{a,c}, Eduardo Andrighetto^{a,c}, Jairo Francisco Savian^{a,c},
Elias Fernando Berra^{a,c}, Severino Luiz Guimarães Dutra^b,
Nalin Babulal Trivedi^b, Nelson Jorge Schuch^c**

^aUniversidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria
LACESM/CT/UFSM, Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa Postal 5021 – 97110-970
Santa Maria, RS, Brasil
everton@lacesm.ufsm.br

^bInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

^cCentro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Observatório Espacial do Sul
OES/CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria, RS, Brasil.

RESUMO

As pulsações geomagnéticas são geradas pela interação do Plasma Solar com o Campo Magnético Terrestre e as variações regulares diurnas são geradas pelas correntes elétricas S_q que fluem na Ionosfera Terrestre. Nesse trabalho objetiva-se estudar as pulsações geomagnéticas na faixa de 10 a 1000 segundos e as variações regulares diurnas com períodos de 24 horas, observadas na região da AMAS. Para realizar medidas das três componentes ortogonais do Campo Geomagnético, (H, D e Z), utiliza-se magnetômetros do tipo "Fluxgate" com uma taxa de aquisição a cada 2 segundos, na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES / CRSPE / INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS (29.43 S, 53.80 W), localizada nas proximidades do centro da AMAS, onde se observa a menor intensidade do Campo Magnético Terrestre, e na Estação do Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ (22.40 S, 43.65 W), localizada na borda da AMAS. Através da análise dos dados geomagnéticos de São Martinho da Serra, RS, e de Vassouras, RJ, observa-se o fenômeno de precipitação de partículas carregadas – elétrons e prótons – mesmo em períodos magneticamente calmos, o que ocasiona um aumento na condutividade da Ionosfera Terrestre sobre a região da AMAS. Estes fenômenos ocorrem devido à baixa intensidade do Campo Magnético Terrestre na região da AMAS.

ESTUDOS GEOMAGNÉTICOS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS¹

Virnei S. Moreira², Everton Frigo³, Eduardo Andrighetto⁴, Nalin B. Trivedi⁵ e
Nelson J. Schuch⁶

Em quase toda a sua totalidade o Campo Magnético Terrestre é gerado no interior da Terra, não possuindo simetria, sendo que a região de menor intensidade do Campo Magnético Terrestre está situada no Oceano Atlântico e parte do território brasileiro. Fenômeno denominado de Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS. Campo Magnético Terrestre protege a Terra de partículas de alta energia, emitidas constantemente pelo Sol. Quando as partículas provenientes de erupções Solares se chocam com a Magnetosfera Terrestre e Ionosfera gerando correntes elétricas, gerando as variações Geomagnéticas. No Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, localizado em São Martinho da Serra, RS (29°S , 53°W), são observados as variações que ocorrem nas componentes do Campo Magnético, H (Norte – Sul), D(Leste – Oeste), Z(Vertical). Estes dados são analisados e estudados por pesquisadores do INPE, e da UFSM, através de convênio com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM. Os dados Geomagnéticos são adquiridos na Estação Geomagnética - SMS, do Observatório por Magnetômetros de alta resolução do tipo Fluxgate, com taxa de aquisição a cada dois segundos. Esses estudos possibilitam a compreensão dos processos físicos que ocorrem na Magnetosfera e Ionosfera Terrestre, e sua relação com os fenômenos relacionados com a precipitação de partículas na região da AMAS.

1 -Trabalho desenvolvido no LACESM /CT/UFSM e no OES/CRSPE/INPE-MCT

2 - Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

3 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

4 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica, LACESM/UFSM

5 - Orientador, LACESM/CT/UFSM – FATEC/FURNAS/INPE

6 - Co-autor, Coordenador da Ação de Implantação do CRSPE/INPE – MCT

XIX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE2004
13 a 15 de Novembro de 2004 – Curitiba – Paraná

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

**Eduardo Andrighetto^{1,3}, Everton Frigo^{1,3}, Virnei S. Moreira^{1,3}
Nelson Jorge Schuch³, Nalin Babulal Trivedi²**

¹Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial
Caixa Postal 515 – São José dos Campos-SP

³Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Observatório Espacial do Sul – INPE/MCT
Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa Postal 5021 – 97110-970 – Santa Maria-RS
edu@lacedsm.ufsm.br, everton@lacedsm.ufsm.br, virnei@lacedsm.ufsm.br
njschuch@lacedsm.ufsm.br, trivedi@dge.inpe.br

A instrumentação de magnetômetros de núcleo saturado está baseada nas propriedades não lineares de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética. A saturação magnética criada pela 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.

Conforme é apresentado na Figura 1, o campo externo H_0 sobreposto a um campo de excitação senoidal com amplitude A , causa uma assimetria na curva de histerese resultando numa distorção na forma de variação da densidade de fluxo magnético B . Esta distorção varia ao tempo de modo a variar a assimetria causada, gerando assim conteúdo harmônico no sinal.

O Segundo harmônico gerado é altamente influenciado pelo Campo Magnético Terrestre de forma que se podem desprezar as demais componentes harmônicas em comparação.

O sinal de saída do sensor é obtido através da comparação deste segundo harmônico com o sinal de excitação do campo, de forma a obter a diferença de fase entre os dois sinais resultando puramente na variação de H_0 , o Campo Magnético o qual se deseja detectar.

Quando o registro eletrônico de um campo magnético é necessário, normalmente sistemas do tipo fluxgate são escolhidos para a implementação de magnetômetros, sendo encontrados em muitos satélites e nos mais modernos observatórios espaciais.

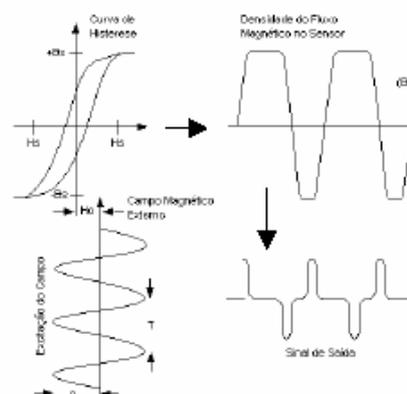


Figura 1. Forma de detecção do
Campo Magnético H_0 .
Fonte: Campbell, 1997.



NATIONAL INSTITUTE FOR SPACE RESEARCH – INPE/MCT
 SOUTHERN REGIONAL SPACE RESEARCH CENTER – CRSPE/INPE – MCT
 SOUTHERN SPACE OBSERVATORY – SSO/CRSPE/INPE – MCT
 FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA – UFSM/MEC
 TECHNOLOGY CENTER – CT/UFMS
 SPACE SCIENCE LABORATORY OF SANTA MARIA – LACESM/CT/UFMS



GEOMAGNETIC STORM - TIME VARIATIONS IN THE SOUTH ATLANTIC ANOMALY REGION

E. F. Berra^{1,3}, E. Frigo^{1,3}, E. Andrighetto^{1,3}, C. E. Antunes^{1,3}, N. B. Trivedi^{2,4} and
 S. L. G. Dutra², N. J. Schuch³

1 Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT – UFSM Santa Maria, Brazil,
 2 National Institute for Space Research – INPE – MCT, São José dos Campos, Brazil,
 3 Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE – MCT, Santa Maria, Brazil,
 4 Cooperation FURNAS/FATEC, Santa Maria, RS, Brazil.
 efb@lacsom.ufsm.br / Fax: +55-55-2203021

ABSTRACT

Geomagnetic variations in the horizontal components H (North-South) and D (East-West) during the large geomagnetic storm of 7 to 10 November 2004 are studied from the data collected at the stations, in the INPE's Southern Space Observatory, in São Martinho da Serra – SMS (29.43° S, 53.82° W and 33° dip) and at the ON's Magnetic Observatory, in Vassouras – VSS (22.40°S, 43.65° W and 33° dip). We have observed small amplitude differences in the H variations and larger amplitude differences in the D variations between the two stations. We observed intense pulsation activity from 16:40 UT to 06:00 UT on 7-8 November 2004 and from 18:40 UT to 04:40 UT on 9-10 November 2004. We subjected the H and D data for these two intervals of time to a spectrum analysis and computed polarization parameters of the pulsations. The results are presented and discussed. An attempt is made to explain the results due to the large differences of declination values at the two stations and also the presence of South Atlantic Magnetic Anomaly.

INTRODUCTION

The region of the Planet where the smallest intensity of the total geomagnetic field **F** is detected is denominated South Atlantic Magnetic Anomaly – SAMA, as show the Figure 1.

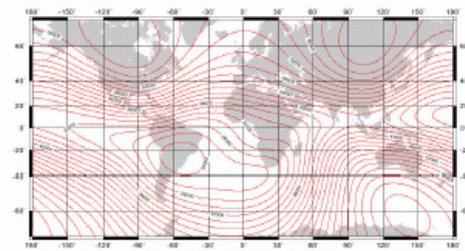


Figure 1: World Magnetic Chart, Epoch 2005.
 Source: http://www.geomag.bgs.ac.uk/images/charts/pdf/merc_f.pdf

The weak field strength over such a large area of the total field **F** magnetic anomaly covering Brazilian territory would certainly affect the motion of charged particles in the Ionosphere and Magnetosphere over it. It is well known that trapped electrons from the inner Van Allen radiation belt precipitate in the atmosphere over the SAMA region (Dessler, 1959 and Vernov et al. 1967). Roederer (1970, 1972) studied dynamics of geomagnetically trapped radiations and trapped particles of the inner Van Allen radiation belts and showed how bouncing charged particles between the mirror points in the Northern and Southern hemisphere ionospheres precipitate in the atmosphere over the Brazilian or SAMA region, while electrons and protons pass over it during their longitudinal drift motion. As electrons drift eastward they plunge more into the atmosphere over Brazil and protons drifting westward deplete more over the South Atlantic region (Trivedi et. al 2003).

DATA AND METHODOLOGY OF ANALYSIS

Fluxgate magnetometer of low noise was used to conduct measurements of three orthogonal components of the geomagnetic field and the data were recorded at a sampling rate of 2 seconds (0.5 Hz) at the Magnetic Station installed in the INPE's Southern Space Observatory and Magnetic Station installed in the ON's Magnetic Observatory. We made comparisons among the geomagnetic variations detected at São Martinho da Serra and Vassouras with acquired data for the geostationary satellite GOES. Later, we performed spectrum analysis and computed polarization parameters of the pulsations detected at São Martinho da Serra and Vassouras stations, according to Kanasevich, 1981.

RESULTS

We are studying the geomagnetic variations recorded at the two stations, São Martinho da Serra - SMS and Vassouras - VSS situated in the South Atlantic Magnetic Anomaly – SAMA. Figures 2 and 3 are the geomagnetic recordings of the H component recorded by the magnetometer on the GOES geostationary satellite.

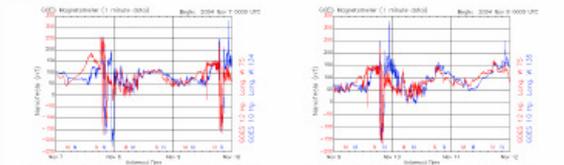


Figure 2: Geomagnetic data from GOES Magnetometer for 7 to 9 of November 2004.
 Figure 3: Geomagnetic data from GOES Magnetometer for 9 to 11 of November 2004.

There are two sudden commencements, one near 11 hours UT and the second near 18 hours UT on 7 November 2004 (Figure 4). After the second sudden commencement the initial phase of the storm is very short and the main phase of the storm starts. The storm lasted till 10 November 2004 as seen by GOES in Figures 2 and 3. The Figures 4 and 5 display the geomagnetic storm time variations at SMS and VSS in 7th of November 2004.

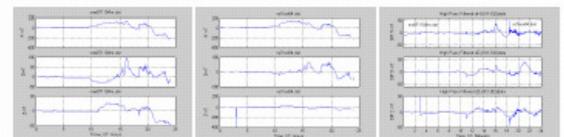


Figure 4: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 7 November 2004 at SMS.
 Figure 4: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 7 November 2004 at VSS.

In Figure 6 we plot Diff H = SMS(dH) – VSS(dH), Diff D = SMS(dD) – VSS(dD), and Diff Z = SMS(dZ) – VSS(dZ) after the removal of trend of variations greater than 120 minutes.





In Figure 6 we are comparing the amplitudes of H, D and Z variations on 7th of November 2004 recorded at the stations SMS and VSS. The variations in each one of the components (H, D, and Z) recorded at VSS are subtracted from the corresponding variations recorded at SMS after the removal of the trend in all the three components of both the stations. We have used a 120 minute High Pass Filter so that after the filtering we are left with the time series having periods less than 120 minutes. Figures 7 to 15 show this comparison for days 8 to 10 of November 2004. All the variations above zero level indicate the value of amplitudes by which the variations at SMS are larger than compared to the same recorded at VSS. We can note that H amplitudes of the impulsive variations at SMS are larger than compared to VSS. In the D component one sees nearly the same behavior like in H, however there are exceptions also. We will avoid discussing the comparisons of Z variations as they can be caused by the distribution of conductivity of the crust and mantle of the Earth.

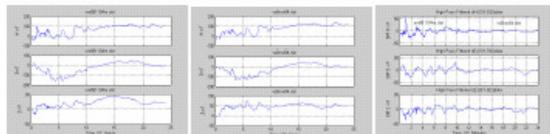


Figure 7: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 8 November 2004 at SMS.

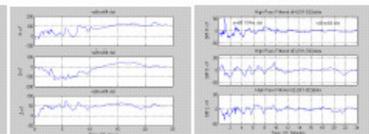


Figure 8: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 8 November 2004 at VSS.

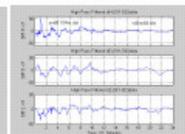


Figure 9: Diff H, Diff D and Diff Z on 8 November 2004.

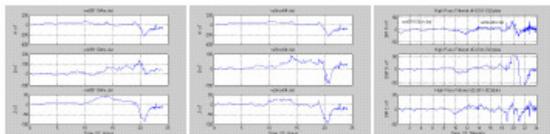


Figure 10: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 9 November 2004 at SMS.

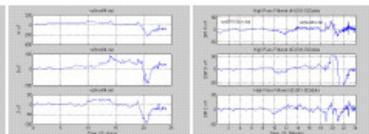


Figure 11: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 9 November 2004 at VSS.

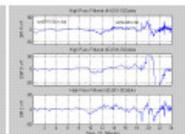


Figure 12: Diff H, Diff D and Diff Z on 9 November 2004.

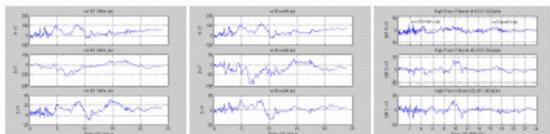


Figure 13: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 10 November 2004 at SMS.

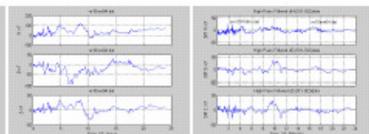


Figure 14: Geomagnetic field variations (H, D, and Z) on 10 November 2004 at VSS.

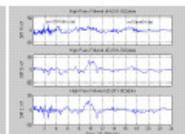


Figure 15: Diff H, Diff D and Diff Z on 10 November 2004.

The following Figures 16 to 23 show computed polarization parameters for the period from 16:40 UT to 06:00 UT on 7-8 November 2004 and from 18:40 UT to 04:40 UT on 9-10 November 2004.

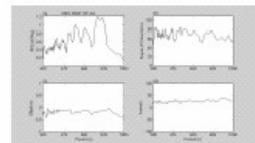


Figure 16: Computed polarization parameters from 16:00 UT and 23:36 UT on 7 November 2004 at SMS.

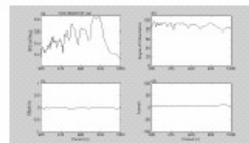


Figure 17: Computed polarization parameters from 16:00 UT and 23:36 UT on 7 November 2004 at VSS.

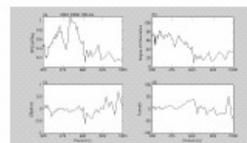


Figure 18: Computed polarization parameters from 01:13 UT and 06:00 UT on 8 November 2004 at SMS.

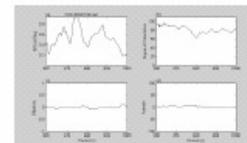


Figure 19: Computed polarization parameters from 01:13 UT and 06:00 UT on 8 November 2004 at VSS.

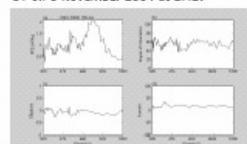


Figure 20: Computed polarization parameters from 18:00 UT and 24:00 UT on 9 November 2004 at SMS.

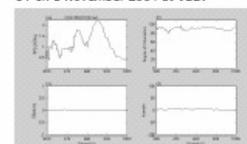


Figure 21: Computed polarization parameters from 18:00 UT and 24:00 UT on 9 November 2004 at VSS.

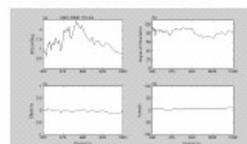


Figure 22: Computed polarization parameters from 00:00 UT and 04:40 UT on 10 November 2004 at SMS.

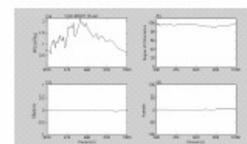


Figure 23: Computed polarization parameters from 00:00 UT and 04:40 UT on 10 November 2004 at VSS.

CONCLUSIONS

We note that the storm time variations in the horizontal components of the geomagnetic field at the two stations, SMS and VSS, separated by only 10 degrees in longitude, exhibit surprising differences. We are not certain about their causes. The differences could be due to DS variations in the SAMA region or they are due to large declination differences between SMS and VSS. We need to study these differences analysing a larger number of storms and also studying such variations during geomagnetically quiet days. The power spectrum analysis of the pulsations show the characteristics seen at low latitude stations specially the linear polarization. The amplitude of power spectrum at SMS is slightly larger compared to VSS. The reason for the larger amplitude at SMS could be due to its proximity to the center of SAMA.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to the CNPq of Brazil for the financial support: PIBIC/Process 118992/2004-0, 104441/2004-6 and 100755/2004-6.

REFERENCES

- Trivedi, N. B.; Schuch, N. J.; Pathan, B. M.; Barneto, I. M.; Dutra, S. L. G. Geomagnetic Phenomena in the South Atlantic Anomaly Region in Brazil. *Advances in Space Research*, England, v. 32, 2003.
- Dessler, A. J. Effect of magnetic anomaly on particle radiation trapped in geomagnetic field. *J. Geophys. Res.*, v. 64, p. 713-719, 1959.
- Vernov, S. N.; Gorchakov, E. V.; Sharvin, P. I.; Sharvina, K. N. *Terrestrial corpuscular radiation and cosmic rays*. Space Science Review, v.7, p. 490-533, 1967.
- Roederer, J. G. *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*. Springer-Verlag, 1970.
- Roederer, J. G. Geomagnetic field distortions and their effects on radiation belt particles. *Reviews of Geophysics*, v. 10, p. 599-630, 1972.
- Kanasowich, E. R. *Time Sequence Analysis in Geophysics*. Third Edition, 1981.





INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE/MCT
CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRSPE/INPE - MCT
OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRSPE/INPE – MCT

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM/MEC
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT/UFMS
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA – LACESM/CT/UFMS
PARCERIA: INPE/MCT – UFSM/MEC



MONITORAMENTO CONTÍNUO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL - AMAS

CONTINUOUS MONITORING OF EARTH'S MAGNETIC FIELD IN THE REGION OF SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY - SAMA

Everton Friaça^(a, b), Eduardo Andrighetto^(a, b), Jairo Francisco Savian^(a, b), Elias Fernando Berra^(a, b), Severino Luiz Guimarães Dutra^(a) e Nelson Jorge Schuch^(a), Nalin Babulal Trivedi^(c)

^(a) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria, RS, Brasil.

^(b) Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil.

^(c) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial – São José dos Campos, SP, Brasil.

Contato: everton@lacs-sm.ufsm.br

1 - INTRODUÇÃO

Cerca de 99% do Campo Magnético Terrestre é gerado no interior da Terra, devido ao fluxo de correntes elétricas na parte líquida do núcleo terrestre, o que constitui o chamado campo principal. A parte restante é gerada por correntes elétricas presentes nas regiões ionizadas vizinhas ao planeta. A região delimitada pelas linhas do Campo Geomagnético é denominada Magnetosfera Terrestre, que devido à sua interação com o plasma emitido continuamente pelo Sol – Vento Solar – sofre uma deformação como é ilustrado na Figura 1.

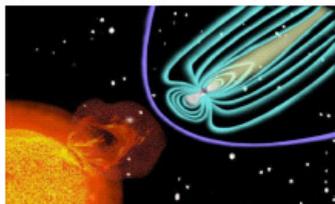


Figura 1: Interação do Plasma Solar com o Campo Magnético Terrestre. Fonte: <http://www.nasa.gov>

O Campo Geomagnético apresenta variações temporais e espaciais com amplitudes muito inferiores ao campo gerado no interior da Terra. Essas variações estendem-se desde frações de segundos até milhões de anos, sendo que as variações de longo período são de origem interna à Terra e as de período menores que poucos dias têm origens externas à Terra (Campbell, 1997).

2 – OBJETIVOS

Este trabalho visa estudar as pulsações geomagnéticas na faixa de 10 a 1000 segundos e as variações regulares diurnas com períodos de 24 horas, observadas na região da AMAS (Figura 2).

US/UK World Magnetic Chart -- Epoch 2000
Total Intensity - Main Field (F)

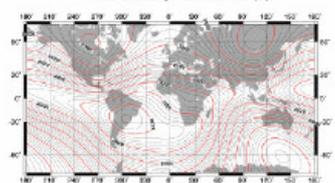


Figura 2: Carta Magnética Mundial do ano de 2000, mostrando a intensidade total F do Campo Magnético Terrestre medida em nT. Fonte: <http://www.ngs.gov/MapChart>

3 - METODOLOGIA

Para realizar medidas das três componentes ortogonais do Campo Geomagnético utiliza-se magnetômetros do tipo "Fluxgate" instalados na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS (Figura 3), localizada nas proximidades do centro da AMAS, onde se observa a menor intensidade do Campo Magnético Terrestre, e na Estação do Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ, localizada na borda da AMAS.



Figura 3: Magnetômetro Fluxgate de alta resolução instalado no OES/CRSPE/INPE - MCT.

Os dados geomagnéticos adquiridos em formato binário foram convertidos para o formato ASCII e posteriormente construídos gráficos das três componentes do Campo Geomagnético em função do tempo através do programa Narod Fluxgate. Utilizou-se a comparação entre variações geomagnéticas observadas em São Martinho da Serra e Vassouras em dias magneticamente quietos e magneticamente perturbados, no período de Outubro a Novembro de 2003.

4 – RESULTADOS

A seguir são mostrados gráficos das variações geomagnéticas observadas nas duas estações para dois dias. Nas Figuras seguintes, a componente H (Norte – Sul) do Campo Geomagnético é representada na cor verde, a componente D (Leste – Oeste) é representada na cor azul e a componente Z (Vertical) é representada na cor vermelha. O dia 11/10/2003 é um dia magneticamente calmo e o dia 15/11/2003 é um dia magneticamente perturbado.

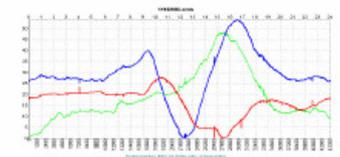


Figura 4: Variações Geomagnéticas observadas em São Martinho da Serra no dia 11/10/2003.

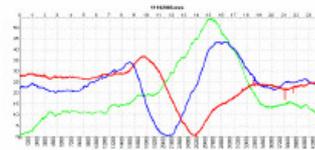


Figura 5: Variações Geomagnéticas observadas em Vassouras no dia 11/10/2003.



Figura 6: Variações Geomagnéticas observadas em São Martinho da Serra no dia 15/11/2003.



Figura 7: Variações Geomagnéticas observadas em Vassouras no dia 15/11/2003.

5 – CONCLUSÕES

Verifica-se que em dias magneticamente calmos (Figuras 4 e 5), observa-se nas duas estações geomagnéticas variações diurnas regulares, enquanto que em alguns dias magneticamente perturbados (Figuras 6 e 7), observa-se em São Martinho da Serra, pulsações geomagnéticas com amplitudes maiores que as observadas em Vassouras. Esses fenômenos indicam a precipitação de partículas eletricamente carregadas em decorrência da baixa intensidade do Campo Geomagnético na região da AMAS.

6 – REFERÊNCIAS

Campbell, W. H.; Introduction to Geomagnetic Fields, Cambridge University Press, New York, 1997

Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 01204, 2005
SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-01204
© European Geosciences Union 2005



Geomagnetic storm - time variations in the South Atlantic Anomaly region

E. F. Berra (1,3), E. Frigo (1,3), E. Andrighetto (1,3), C. E. Antunes (1,3), N. B. Trivedi(2,4), S. L. G. Dutra (2), N. J. Schuch(3)

(1) Space Science Laboratory of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil, (2) National Institute for Space Research, São José dos Campos, SP, Brazil, (3) Southern Regional Space Research Center, Santa Maria, RS, Brazil, (4) Partnership FURNAS/FATEC, Santa Maria, RS, Brazil
(efb@lacsma.ufsm.br) / Fax: +55-55-2208021

Geomagnetic variations in the horizontal components H (North-South) and D (East-West) during the large geomagnetic storm of 7 to 10 November 2004 are studied from the data collected at the stations São Martinho da Serra – SMS (29.43° S, 53.82° W and 33° dip) and Vassouras – VSS (22.40° S, 43.65° W and 33° dip). We have observed small amplitude differences in the H variations and larger amplitude differences in the D variations between the two stations. We observed intense pulsation activity from 16:40 UT to 06:00 UT on 7-8 November 2004 and from 18:40 UT to 04:40 UT on 9-10 November 2004. We subjected the H and D data for these two intervals of time to a spectrum analysis and computed polarization parameters of the pulsations. The results are presented and discussed. An attempt is made to explain the results due to the large differences of declination values at the two stations and also the presence of South Atlantic Magnetic Anomaly.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
12º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP

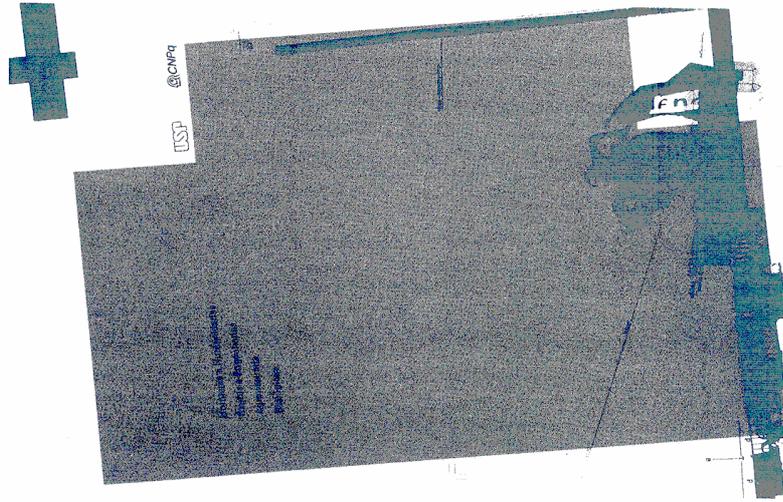
Certificado

Certificamos que **Everton Frigo, Eduardo Andrighetto, Jairo Francisco Savian, Elias Fernando Berra, Severino Luiz Guimarães Dutra, Nelson Jorge Schuch, Nalin Babulal Trivedi** participaram do 12º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SIICUSP com o trabalho "MONITORAMENTO CONTÍNUO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL - AMAS", no evento Engenharias e Exatas, realizado nos dias 25 e 26 de novembro de 2004, no "campus" da USP de São Paulo, SP.

São Paulo, 22 de novembro de 2004.

Prof. Dr. Luiz Nunes de Oliveira
PRO-REITOR DE PESQUISA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Prof. Dr. Raul Machado Neto
PRESIDENTE DA COMISSÃO COORDENADORA DO
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
12º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP

Certificado

Certificamos que **Everton Frigo, Eduardo Andrighetto, Jairo Francisco Savian, Elias Fernando Berra, Severino Luiz Guimarães Dutra, Nelson Jorge Schuch, Nalin Babulal Trivedi** participaram do 12º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SIICUSP com o trabalho "MONITORAMENTO CONTÍNUO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL - AMAS", no evento Engenharias e Exatas, realizado nos dias 25 e 26 de novembro de 2004, no "campus" da USP de São Paulo, SP.

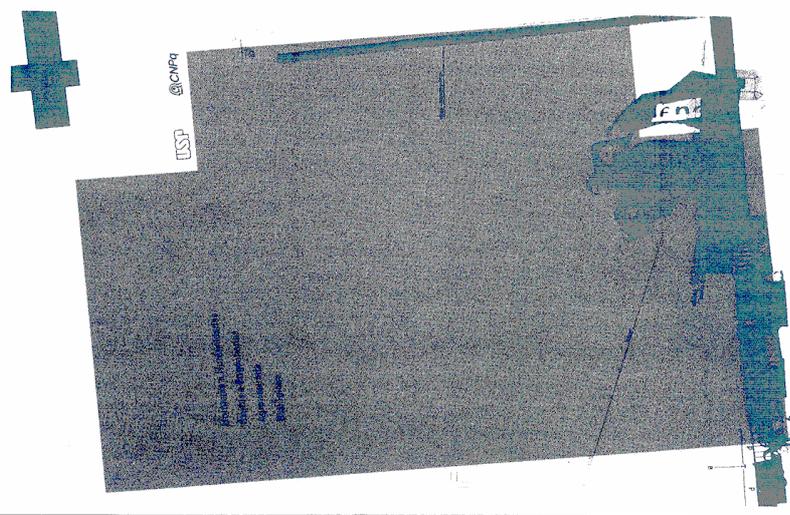
São Paulo, 22 de novembro de 2004.



Prof. Dr. Luiz Nunes de Oliveira
PRO-REITOR DE PESQUISA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Prof. Dr. Raul Machado Neto
PRESIDENTE DA COMISSÃO COORDENADORA DO
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP





XIX JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA

Ministério da Educação – Universidade Federal de Santa Maria

elhor que uma boa idéia, só outra idéia melhor.

CERTIFICADO

Certificamos que

VIRNEI SILVA MOREIRA
NELSON JORGE SCHUCH
EDUARDO ANDRICHETTO
EVERTON FRIGO

participaram da XIX Jornada Acadêmica Integrada, realizada nos dias 19, 20 e 21 de outubro de 2004, com o trabalho:

ESTUDOS GEOMAGNÉTICOS NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL - AMAS

Comissão Executiva
Outubro de 2004

UFSM
www.ufsm.br/jornada