



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

**VARIAÇÃO COM O CICLO SOLAR DAS  
PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS  
(1,0 – 10 mHZ) NA REGIÃO DA  
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS**

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

**PROCESSO Nº. 102220/2008-5**

**Willian Rigon Silva - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas  
LFSMIM/CRS/INPE – MCT  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
CRS/INPE – MCT  
E-mail: [willianr@lacesm.ufsm.br](mailto:willianr@lacesm.ufsm.br)**

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

**Santa Maria, Julho de 2009**



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

**PROJETO**

**VARIAÇÃO COM O CICLO SOLAR DAS PULSAÇÕES  
GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS (1,0 – 10 mHZ) NA  
REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL –  
AMAS**

**PROCESSO: 102220/2008-5**

Relatório elaborado por **Willian Rigon Silva** relatando as atividades  
executadas por:

**Willian Rigon Silva** - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
E-mail: [willianr@lacesm.ufsm.br](mailto:willianr@lacesm.ufsm.br)

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

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

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



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:**

### **Bolsista:**

**Willian Rigon Silva**

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

### **Processo:**

**N ° 102220/2008-5**

### **Orientador:**

**Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra**

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

### **Co-Orientador:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

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

**Dr. Nalin B. Trivedi**

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

### **Colaboradores:**

**Cassio E. Antunes**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

**Fernando de Souza Savian**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM

**Josemar de Siqueira**

Acadêmico do Curso de Física – UFSM

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

Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas -  
LFSMIM/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da  
Serra, RS.

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



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



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



Identificação

Recursos Humanos

Linhas de Pesquisa

Indicadores do Grupo

**Identificação**

**Dados básicos**

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

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

**Ano de formação:** 1996

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

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

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

**Área predominante:** Ciências Exatas e da Terra; Geociências

**Instituição:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Órgão:** Coordenação de Gestão Científica - CIE

**Unidade:** Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

**Endereço**

**Logradouro:** Caixa Postal 5021

**Bairro:** Camobi

**CEP:** 97110970

**Cidade:** Santa Maria

**UF:** RS

**Telefone:** 33012026

**Fax:** 33012030

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

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

**Repercussões dos trabalhos do grupo**

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



## Recursos humanos

### Pesquisadores Total: 42

<a href="#">Ademar Michels</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>
<a href="#">Alan Prestes</a>	<a href="#">Joao Paulo Minussi</a>
<a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a>	<a href="#">Jose Humberto Andrade Sobral</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Juliano Moro</a>
<a href="#">Antonio Claret Palerosi</a>	<a href="#">Mangalathayil Ali Abdu</a>
<a href="#">Barclay Robert Clemesha</a>	<a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>
<a href="#">Caitano Luiz da Silva</a>	<a href="#">Marco Ivan Rodrigues Sampaio</a>
<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>
<a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a>	<a href="#">Nalin Babulal Trivedi</a>
<a href="#">Cristiano Max Wrasse</a>	<a href="#">Natanael Rodrigues Gomes</a>
<a href="#">Delano Gobbi</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>
<a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a>	<a href="#">Nivaor Rodolfo Rigozo</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Odin Mendes Junior</a>
<a href="#">Fabiano Luis de Sousa</a>	<a href="#">Osmar Pinto Junior</a>
<a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Fernanda de São Sabbas Tavares</a>	<a href="#">Pawel Rozenfeld</a>
<a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a>	<a href="#">Petrônio Noronha de Souza</a>
<a href="#">Gelson Lauro Dal' Forno</a>	<a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>
<a href="#">Hisao Takahashi</a>	<a href="#">Rajaram Purushottam Kane</a>
<a href="#">Ijar Milagre da Fonseca</a>	<a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>
<a href="#">Jean Carlo Santos</a>	<a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>

### Estudantes Total: 32

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

### Técnicos Total: 2

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

### Linhas de pesquisa Total: 4

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



- [MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

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



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



### Linha de Pesquisa MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

#### Linha de pesquisa

#### MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

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

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

#### Pesquisadores:

[Alisson Dal Lago](#)  
[Clezio Marcos De Nardin](#)  
[Gelson Lauro Dal' Forno](#)  
[Jean Carlo Santos](#)  
[Joao Paulo Minussi](#)  
[Mangalathayil Ali Abdu](#)  
[Nalin Babulal Trivedi](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Osmar Pinto Junior](#)  
[Pawel Rozenfeld](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

#### Estudantes:

[Aline Seeger Santos](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Celito Muck Felipetto](#)  
[Claudio Machado Paulo](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)  
[Willian Rigon Silva](#)

#### Árvore do conhecimento:

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

#### Setores de aplicação:

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



**Objetivo:**

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



**Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil**



**Linha de Pesquisa**

**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

**Linha de pesquisa**

**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

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

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

**Pesquisadores:**

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

**Estudantes:**

[Bernardo Henz](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Celito Muck Felipetto](#)  
[Eduardo Escobar Bürger](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Guilherme Grams](#)  
[Guilherme Simon da Rosa](#)  
[Igor Freitas Fagundes](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)



[Lucas Antunes Tambara](#)  
[Lucas Lopes Costa](#)  
[Lucas Ramos Vieira](#)  
[Luis Fernando Nicolini](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Rafael Lopes Costa](#)  
[Ricardo Cartier dos Santos](#)  
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)  
[Tiago Jaskulski](#)  
[Willian Rigon Silva](#)

**Árvore do conhecimento:**

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

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

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



## **Agradecimentos**

Meus sinceros agradecimentos: A todos os servidores do CRS/INPE-MCT e do LACESM/CT – UFSM que de várias maneiras contribuíram para oferecer ótimas condições de trabalho; Ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento pessoal e profissional; Ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCT.

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch – CRS/INPE-MCT, meu co-orientador, pela oportunidade de poder interagir com este Centro de Pesquisas e pela confiança em mim depositada, a qual dou muito valor. Ao Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra – DGE/INPE-MCT, meu orientador de Projeto de Pesquisa, e ao Dr. Nalin Babulal Trivedi – DGE/INPE-MCT, meu co-orientador, pela atenção, sugestões e apoio técnico e científico. Agradeço em especial, aos meus colegas de laboratório Cássio E. Antunes, Fernando de Souza Savian e Josemar de Siqueira pela amizade, companheirismo e excepcional espírito de corpo, sempre estiveram prontos para ajudar a qualquer momento, não medindo esforços para tornar o trabalho e as atividades no Laboratório o mais ideal e excelente possível.



## Sumário

<b>RESUMO</b> .....	6
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	7
1.1. Introdução.....	7
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	10
2.1. Campo Magnético Terrestre.....	10
2.1.1. Origem do Campo Geomagnético.....	13
2.2. Variações do Campo Geomagnético.....	14
2.2.1. Variação Secular.....	15
2.2.2. Variações Diurna.....	17
2.3. Reversões do Campo Geomagnético.....	18
2.4. Pulsações Geomagnéticas.....	18
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	19
3.1. Magnetosfera Terrestre.....	19
3.2. Cinturão de Radiação de Van Allen.....	20
3.3. Interação Terra-Sol.....	21
3.4. Ciclo Solar.....	24
3.5. Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS.....	25
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	28
4.1. Aquisição dos dados e Instrumentação.....	28
4.1.1. Magnetômetro <i>fluxgate</i> (núcleo saturado).....	28
4.1.2. Filtragem digital.....	30
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	31
5.1. Resultados.....	31
5.1.1. Dias Escolhidos da Fase de Máximo Solar.....	32
5.1.2. Dias Escolhidos da Fase de Mínimo Solar.....	34
5.2. Processamento dos Dados dos Dias Escolhidos.....	36
5.2.1 Processamento dos Dias Escolhidos para a Fase do Máximo Solar.....	36
5.2.1.1 Processamento dos Dias Calmos da Fase do Máximo Solar.....	36
5.2.1.2 Processamento dos Dias Perturbados da Fase do Máximo Solar.....	42
5.2.2 Processamento dos Dias Escolhidos para a Fase do Mínimo Solar.....	47
5.2.2.1 Processamento dos Dias Calmos da Fase do Mínimo Solar.....	47



	2
5.2.2.2 Processamento dos Dias Perturbados da Fase do Mínimo Solar.....	53
5.3. Análise do Processamento dos Dados .....	58
5.3.1 Comparação CM – Cm.....	60
5.3.2 Comparação PM – Pm.....	60
5.3.3 Comparação PM – CM e Pm – Cm.....	61
5.3.4 Comparação PM – Cm e Pm – CM.....	61
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>63</b>
6.1. Conclusões.....	63
<b>Referências</b> .....	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>66</b>
<b>ANEXOS 1 – Programas em Linguagem MATLAB</b> .....	<b>67</b>
<b>ANEXOS 2 – Certificados de Participação em Eventos</b> .....	<b>76</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: O CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRS/ INPE-MCT. ....	9
FIGURA 1.2: PRÉDIO PRINCIPAL DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL OES/CRS/INPE - MCT. ....	9
FIGURA 2.1: ELEMENTOS VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	10
FIGURA 2.2: CAMPO GEOMAGNÉTICO, MODELO DIPOLAR. ....	12
FIGURA 2.3: O MODELO 3D FEITO POR GLATZMAIER-ROBERTS SIMULANDO O CAMPO GEOMAGNÉTICO (GEODÍNAMO). AS LINHAS AZUIS “ENTRAM” E AS LINHAS LARANJAS “SAEM”. O EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA É VERTICAL AO CENTRO. AS LINHAS DO CAMPO SE ESTENDEM ATÉ DUAS VEZES O RAIOS DA TERRA. ....	12
FIGURA 2.4: ORIGEM DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	13
FIGURA 2.5: VARIAÇÃO GEOMAGNÉTICA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS EM 1600. ....	15
FIGURA 2.6: VARIAÇÃO GEOMAGNÉTICA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS EM 1700. ....	15
FIGURA 2.7: VARIAÇÃO GEOMAGNÉTICA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS EM 1900. ....	16
FIGURA 2.8: VARIAÇÃO GEOMAGNÉTICA, COORDENADAS GEOGRÁFICAS EM 2000. ....	16
FIGURA 2.9: DIVISÃO DA ATMOSFERA E IONOSFERA. ....	17
FIGURA 3.1: ESTRUTURAS DA MAGNETOSFERA TERRESTRE. ....	19
FIGURA 3.2: CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN AO REDOR DA TERRA. ....	20
FIGURA 3.3: INTERAÇÃO SOL – TERRA COM SUAS CARACTERÍSTICAS IDENTIFICADAS. ....	21
FIGURA 3.4: REPRESENTAÇÃO ARTÍSTICA DA INTERAÇÃO TERRA- SOL, MOSTRANDO A FORMA DA MAGNETOSFERA TERRESTRE .....	22
FIGURA 3.5: DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DOS OBSERVATÓRIOS Kp. ....	23
FIGURA 3.6: ATIVIDADE SOLAR RELACIONADA COM O CICLO SOLAR. ....	24
FIGURA 3.7: MAPA MAGNÉTICO DA TERRA. A ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL EM AZUL ESCURO. ....	25
FIGURA 3.8: A POSIÇÃO DE SATÉLITES ONDE SOFRERAM DANOS NA MEMÓRIA DO COMPUTADOR. MAIOR CONCENTRAÇÃO SOBRE A REGIÃO DA AMAS. ....	27
FIGURA 4.1: CIRCUITO DO MAGNETÔMETRO FLUXGATE INSTALADO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL –OES/CRS/INPE – MCT. ....	29
TABELA 5.2: DIAS PERTURBADOS DO MÁXIMO SOLAR (PM). ....	32
FIGURA 5.1: DIAGRAMA MUSICAL DE BARTELS DO ANO 2001. ....	33
FIGURA 5.2: DIAGRAMA MUSICAL DE BARTLES DO ANO DE 2008. ....	35
FIGURA 5.3: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	37
SMS – 04/02/2001. ....	37
FIGURA 5.4: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. SMS – 04/02/2001. ....	37
FIGURA 5.5: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	38
SMS – 28/06/2001. ....	38
FIGURA 5.6: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. SMS – 28/06/2001. ....	38
FIGURA 5.7: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	39
SMS – 31/05/2001. ....	39
FIGURA 5.8: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. SMS – 31/05/2008. ....	39
FIGURA 5.9: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	40
SMS – 01/01/2001. ....	40
FIGURA 5.10: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	40
SMS – 01/01/2001. ....	40
FIGURA 5.11: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	41
SMS – 28/07/2001. ....	41
FIGURA 5.12: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	41
SMS – 28/07/2001. ....	41
FIGURA 5.13: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS. ....	42
SMS – 31/03/2001. ....	42
FIGURA 5.14: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES Pc-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	42
SMS – 31/03/2001. ....	42



	4
FIGURA 5.15: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	43
SMS – 06/11/2001. ....	43
FIGURA 5.16: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	43
SMS – 06/11/2001. ....	43
FIGURA 5.17: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	44
SMS – 22/10/2001. ....	44
FIGURA 5.18: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	44
SMS – 22/10/2001. ....	44
FIGURA 5.19: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	45
SMS – 24/11/2001. ....	45
FIGURA 5.20: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	45
SMS – 24/11/2001. ....	45
FIGURA 5.21: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	46
SMS – 08/04/2001. ....	46
FIGURA 5.22: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	46
SMS – 08/04/2001. ....	46
FIGURA 5.23: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	47
SMS – 01/12/2008. ....	47
FIGURA 5.24: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	48
SMS – 01/12/2008. ....	48
FIGURA 5.25: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	48
SMS – 02/12/2008. ....	48
FIGURA 5.26: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	49
SMS – 02/12/2008. ....	49
FIGURA 5.27: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	49
SMS – 22/11/2008. ....	49
FIGURA 5.28: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	50
SMS – 22/11/2008. ....	50
FIGURA 5.29: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	50
SMS – 13/09/2008. ....	50
FIGURA 5.30: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	51
SMS – 13/09/2008. ....	51
FIGURA 5.31: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	51
SMS – 21/11/2008. ....	51
FIGURA 5.32: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	52
SMS – 21/11/2008. ....	52
FIGURA 5.33: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	53
SMS – 27/03/2008. ....	53
FIGURA 5.34: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	53
SMS – 27/03/2008. ....	53
FIGURA 5.35: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	54
SMS – 11/10/2008. ....	54
FIGURA 5.36: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	54
SMS – 11/10/2008. ....	54
FIGURA 5.37: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	55
SMS – 29/02/2008. ....	55
FIGURA 5.38: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	55
SMS – 29/02/2008. ....	55
FIGURA 5.39: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	56
SMS – 04/09/2008. ....	56
FIGURA 5.40: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	56
SMS – 04/09/2008. ....	56
FIGURA 5.41: VARIAÇÃO DIÁRIA DA INTENSIDADE DAS 3 COMPONENTES VETORIAIS DO CAMPO GEOMAGNÉTICOS.....	57
SMS – 09/03/2008. ....	57
FIGURA 5.42: INTENSIDADE DAS PULSAÇÕES PC-5 NAS COMPONENTES H E D DO CAMPO GEOMAGNÉTICO. ....	57



SMS – 09/03/2008. ....	57
------------------------	----

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1: CLASSIFICAÇÃO DAS PULSAÇÕES CONTÍNUAS.....	18
TABELA 2.2: CLASSIFICAÇÃO DAS PULSAÇÕES IRREGULARES. ....	18
TABELA 3.1: ÍNDICE Kp EM RELAÇÃO AO ÍNDICE AP. ....	23
TABELA 5.1: DIAS CALMOS DO MÁXIMO SOLAR (CM).....	32
TABELA 5.3: DIAS CALMOS DO MÍNIMO SOLAR (CM). ....	34
TABELA 5.4: DIAS PERTURBADOS DO MÍNIMO SOLAR (PM). ....	34
TABELA 5.5: VARIAÇÃO DIÁRIA E AMPLITUDE FILTRADA PARA DIAS CALMOS NO MÁXIMO SOLAR (CM). ....	59
TABELA 5.6: VARIAÇÃO DIÁRIA E AMPLITUDE FILTRADA PARA DIAS CALMOS NO MÍNIMO SOLAR (CM). ....	59
TABELA 5.7: VARIAÇÃO DIÁRIA E AMPLITUDE FILTRADA PARA DIAS PERTURBADOS NO MÁXIMO SOLAR (PM). ....	59
TABELA 5.8: VARIAÇÃO DIÁRIA E AMPLITUDE FILTRADA PARA DIAS PERTURBADOS NO MÍNIMO SOLAR (PM). ....	59

## RESUMO

O campo magnético da Terra é essencial para a manutenção da vida terrestre. A hipótese mais aceita de sua origem é a do dínamo geomagnético (geodínamo). Ou seja, o campo principal tem sua origem no movimento de correntes elétricas no núcleo externo líquido do planeta. Sem o campo geomagnético, a superfície da Terra seria bombardeada com partículas de altas energias oriundas do espaço exterior e do vento solar, tornando o meio ambiente terrestre extremamente hostil à vida. Uma de suas características, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), com centro situado na vizinhança do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS, (29.42°S, 53.87°O, 480m a.n.m.), é a região de menor intensidade de todo o campo geomagnético, tornando mais fácil a precipitação de partículas de altas energias na sua atmosfera. O campo geomagnético observado apresenta, variações temporais que vão desde pequenos períodos, na faixa de milisegundos, até períodos longos, em séculos. As variações de intervalo de tempo curto são conhecidas como pulsações geomagnéticas (entre 0,2 e 1000 segundos) e são resultantes da interação do vento solar com o campo geomagnético. A interação origina a magnetosfera terrestre, com suas linhas de campo alongadas ao longo do espaço no lado noturno e comprimidas no diurno. O Sol possui vários ciclos na sua atividade e o principal, de 11 anos, possui em geral 4 fases distintas de seu ciclo sendo uma fase de mínima atividade (mínimo solar), uma ascendente, uma de máxima (máximo solar) e uma descendente. O objetivo do projeto é estudar as pulsações geomagnéticas de períodos entre 100 e 1000 segundos (1.0 – 10mHz), com maior ênfase nas pulsações contínuas Pc5 (períodos entre 150-600 segundos e frequência na faixa 2-7 milihertz), relacionadas com o ciclo solar e a região da AMAS. A aquisição de dados é feita através de magnetômetros *fluxgate* instalados no Observatório Espacial do Sul. A análise dos dados é feita com programas de filtragem digital em linguagem Matlab.



# CAPÍTULO 1

## 1.1. Introdução

Através do Programa de Iniciação Científica, PIBIC/INPE-CNPq/MCT, foram planejadas e realizadas atividades de pesquisa no Projeto “**VARIAÇÃO COM CICLO SOLAR DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS (1,0 – 10 mHz) NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS**”, que se encontra em desenvolvimento no **Laboratório de Física Solar do Meio Interplanetário e Magnetosferas - LFSMIM/CRS/INPE – MCT**, do **Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE – MCT**, Figura 1.1. O objetivo do Projeto é fazer um estudo das características das pulsações geomagnéticas de períodos longos, entre 100 e 1000 segundos, da faixa espectral de 1,0 – 10 mHz na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Na atual fase do Projeto está sendo dada ênfase ao estudo das características das pulsações de períodos entre 150 – 600 segundos (2 – 7 mHz), conhecidas por Pc-5 (pulsações contínuas).

O estudo das variações geomagnéticas pode revelar importantes informações sobre os processos físicos que ocorrem na magnetosfera através da interação do vento solar com o campo magnético da Terra. O estudo é importante, pois através dele podemos compreender e prever com alguma antecedência a ocorrência de tempestades geomagnéticas. As tempestades geomagnéticas são capazes de afetar qualquer tipo de equipamento eletrônico sensível. Dependendo da intensidade da tempestade geomagnética ela pode afetar tanto satélites quanto redes de comunicação em geral, redes de fornecimento de energia e, em alguns casos extremos, aumentar a radiação UV sobre a superfície do nosso planeta, atingindo os seres vivos.

A teoria mais bem aceita hoje em dia da origem do campo geomagnético refere-se ao movimento de fluídos ionizados pelas altas temperaturas no núcleo externo da Terra. Provocando correntes elétricas (de grande escala espacial) que produzem um grande e intenso campo magnético, no caso, criando o chamado geodínamo. Sendo assim o campo geomagnético tem sua origem basicamente interna. Se não fosse a

influência de fatores externos à Terra e correntes de pequena escala no núcleo, que distorcem e causam perturbações no campo, ele poderia ser visto como um campo dipolar.

No campo magnético terrestre ocorrem variações de sua intensidade em períodos de tempo que vão desde frações de segundos até milhões de anos. Podemos separá-las em: variações de longo período, como a variação secular e variações de curto período como as tempestades geomagnéticas, variações diurnas Sq e pulsações geomagnéticas. As variações seculares ocorrem por fatores internos da Terra, enquanto as variações de curto período são de origem externas a Terra e estão associadas à atividade solar.

O campo magnético da Terra é assimétrico. Sua mais baixa intensidade total sobre a superfície terrestre se encontra no sul da América do Sul. Este fenômeno é denominado Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e abrange os estados brasileiros de São Paulo até o sul do Rio Grande do Sul. Como consequência o cinturão de radiação que circunda o planeta, conhecido como cinturão de Van Allen, fica a uma menor altitude sobre a atmosfera local, fazendo com que ela receba um maior bombardeamento de partículas de altas energias oriundas do espaço exterior. Nesta área há uma penetração maior de raios cósmicos (em relação à região circunvizinha) e precipitação de partículas do geoespaço (como o vento solar) ocasionando assim perturbações na ionosfera e no campo geomagnético.

A região da AMAS, descoberta no início da era dos satélites nos anos 50, é um laboratório natural e singular de pesquisa sobre Física de Plasmas e da Radiação, Geofísica Espacial, Geomagnetismo, Aeronomia e Clima Espacial.

A coleta de dados é feita com magnetômetros instalados na estação geomagnética do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT (figura 1.2), no município de São Martinho da Serra, RS, Brasil. A estação geomagnética é identificada como SMS e tem coordenadas 29,43° S, 53,82° W, elevação 488m a.n.m. Uma das atividades realizadas foi a operação dos equipamentos (magnetômetros) do Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas do Centro Regional Sul - CRS//INPE-MCT, instalados no Observatório Espacial do Sul.



**Figura 1.1:** O Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/ INPE-MCT.  
**Fonte:** <http://www.inpe.br/crs/>

Através da coleta de dados contínua em SMS, é possível fazer uma análise da característica do campo geomagnético nesta região do nosso planeta, relacionando as pulsações de períodos longos com o ciclo solar.



**Figura1.2:** Prédio principal do Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE - MCT.  
**Fonte:** arquivo LFSMIM/CRS/INPE - MCT

## CAPÍTULO 2

### 2.1. Campo Magnético Terrestre

O campo geomagnético é um campo vetorial ortogonal, isto é, tem seus eixos perpendiculares entre si. Possui componentes distintas em seus três eixos coordenados ortogonais **X**, **Y** e **Z**. Portanto possui magnitude (ou intensidade), direção e sentido. A intensidade total é chamada de **B** (ou **F**) e é independente do sistema de coordenadas (figura 2.1).

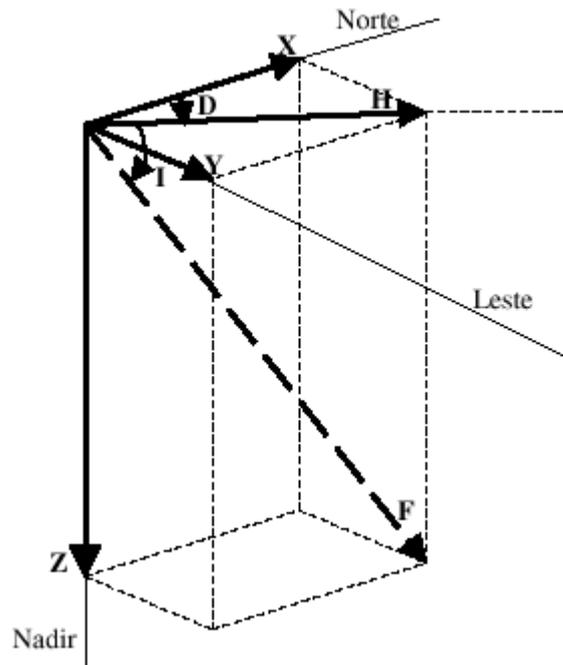


Figura 2.1: Elementos vetoriais do Campo Geomagnético.

#### Elementos lineares:

**X** – componente geográfica norte (positiva no sentido do norte geográfico);

**Y** – componente geográfica leste (positiva para leste);

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

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

**B** – (ou **F**) intensidade total do campo magnético em um determinado ponto.

**Elementos angulares:**

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

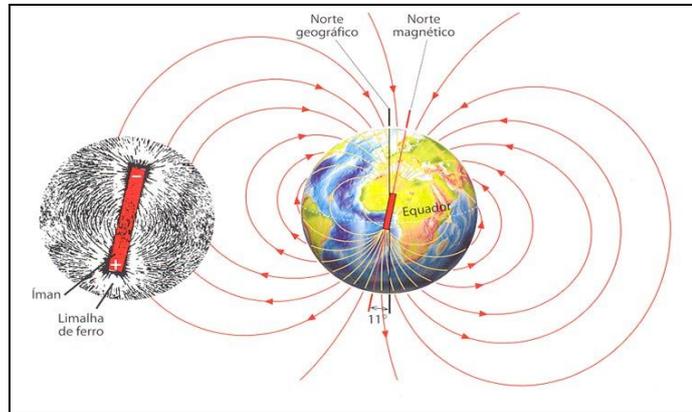
$I$  – inclinação magnética. É o ângulo entre a componente magnética horizontal ( $\mathbf{H}$ ) e o vetor intensidade total do campo magnético ( $\mathbf{B}$ ), positivo quando medido do plano horizontal para baixo.

A teoria mais aceita hoje em dia sobre a origem do campo magnético e sua manutenção refere-se a teoria do dínamo hidromagnético (ou geodínamo), desenvolvida entre os anos 1940 - 1950 por W. M. Elsasser e Sir Edward C. Bullard-H. Gellman. De acordo com esta teoria a produção do campo geomagnético se deve quase que em sua totalidade ao movimento de fluido altamente viscoso no núcleo líquido da Terra, que gira lentamente em relação ao manto sólido. A utilização da bússola como instrumento de orientação sobre a Terra, usa o princípio de que o campo geomagnético se aproxima daquele gerado por um ímã permanente, aproximadamente alinhado com o eixo de rotação do planeta, onde é possível distinguir um “pólo magnético norte”, um “pólo magnético sul” e um “equador magnético”, semelhantemente ao que ocorre com as referências geográficas. Neste sentido, podemos falar de “meridiano magnético” como a projeção, na superfície da Terra, das linhas de campo definidas pela componente  $H$ .

A inclinação magnética ( $I$ ) é o ângulo das linhas de campo com o plano tangente à Terra no ponto de observação. Uma inclinação de  $+90^\circ$  corresponde ao pólo magnético norte (por convenção), da mesma maneira que uma inclinação de  $-90^\circ$  corresponde ao pólo magnético sul. O equador magnético é constituído pelo conjunto de pontos na superfície terrestre de inclinação nula.

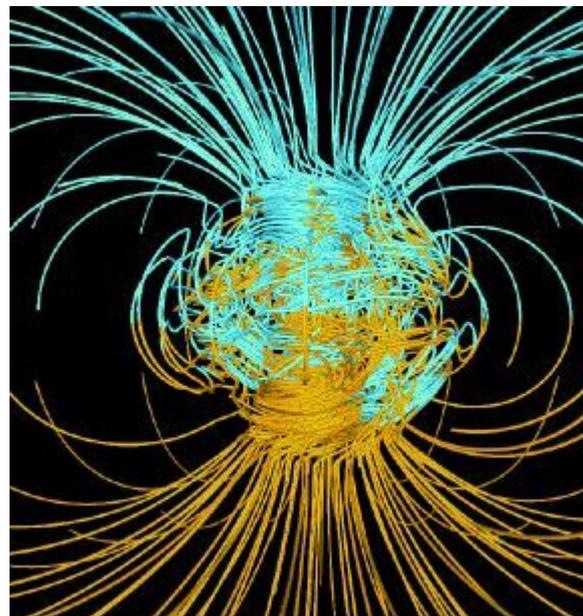
A forma final do campo geomagnético assemelha-se muito a um dipolo magnético, figura 2.2 e figura 2.3, com as linhas de campo alongadas no espaço devido à interação com o vento solar. Os pólos do campo magnético terrestre são ligeiramente afastados dos pólos geográficos formando um ângulo entre os eixos magnético e de rotação de  $10,3^\circ$  (em 2005). Gauss (1838) foi quem apresentou a prova matemática de que o campo magnético observado na superfície tem origem basicamente no interior da Terra.

Nessa altura se tinha concluído que o campo magnético terrestre manifestava uma variação secular e que as variações com pequenos intervalos de tempo tinham correlação com fenômenos atmosféricos (como as auroras boreais).



**Figura 2.2: Campo Geomagnético, modelo dipolar**

Fonte: [http://formacao.es-loule.edu.pt/biogeno/geo12/tema1/imagens/campo\\_magnetico](http://formacao.es-loule.edu.pt/biogeno/geo12/tema1/imagens/campo_magnetico)



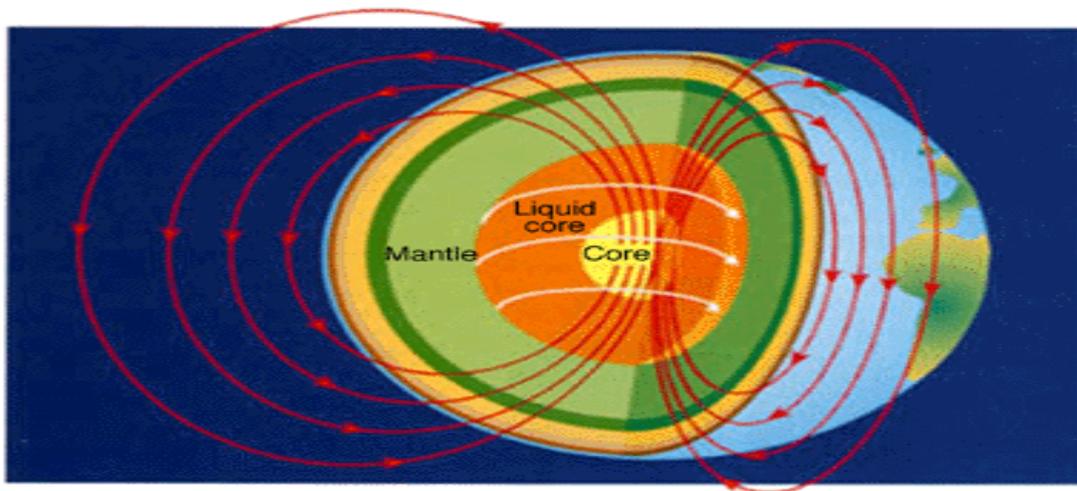
**Figura 2.3: O Modelo 3D feito por Glatzmaier-Roberts simulando o campo geomagnético (geodínamo). As linhas azuis “entram” e as linhas laranjas “saem”. O eixo de rotação da Terra é vertical ao centro. As linhas do campo se estendem até duas vezes o raio da Terra.**

Fonte: <http://www.sdsc.edu/pub/envision/v16.1/images/geo2.jpg>

### 2.1.1. Origem do Campo Geomagnético

Um campo magnético tende a sumir ao longo do tempo sem a interferência de agentes externos (na forma de sistemas de correntes elétricas). O motivo pelo qual com o campo geomagnético não acontece isso é teoricamente devido a movimentos do magma no núcleo líquido externo da Terra, produzindo correntes elétricas que dão origem a um campo magnético no próprio (de acordo com a teoria do dínamo hidromagnético), formando assim um “dínamo auto-sustentável”. O ponto crucial da teoria do geodínamo é explicar os mecanismos que existem para a manutenção do movimento das correntes no núcleo líquido.

Sendo assim, a origem do campo geomagnético é interna (figura 2.4). Sabe-se que o tempo de vida típico de um campo magnético de amplitude como o da Terra é de algumas dezenas de milhares de anos. O fato de ele existir a bilhões de anos significa que alguma coisa o tem vindo a regenerar durante este tempo todo.



**Figura 2.4: Origem do campo geomagnético.**

Fonte: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL98116.gif>



## **2.2. Variações do Campo Geomagnético**

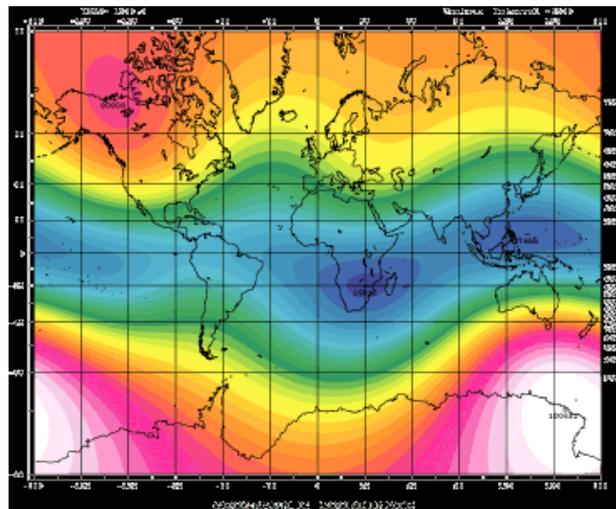
No campo geomagnético ocorrem variações que vão desde frações de segundo até milhões de anos (dentro de vários espectros delas). De maneira geral, as variações lentas são causadas por fenômenos internos da Terra, enquanto que as variações rápidas estão associadas a fenômenos externos ao planeta. As variações do campo geomagnético ligadas a interação Sol – Terra são variações rápidas. Dependendo da fase do ciclo solar as variações podem ser mais ou menos intensas.

As variações geomagnéticas são classificadas em:

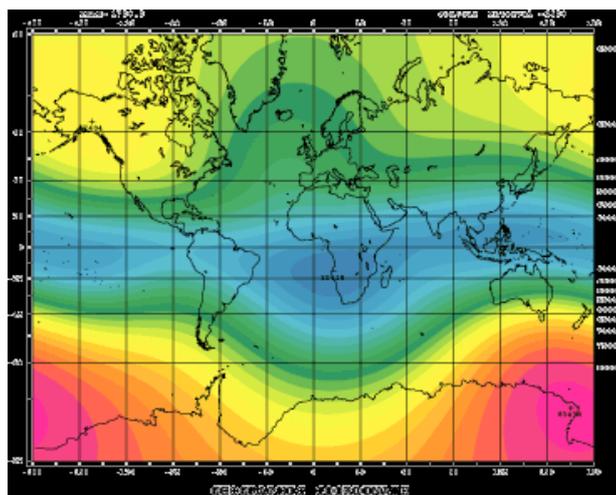
- Seculares, para períodos maiores que um ano;
- Diurnas, para período de 24 horas;
- Distúrbios, quando associados à tempestades geomagnéticas e com períodos bastantes variáveis;
- Pulsações, para períodos entre 0,2 e 1000 segundos; e
- Atmosféricas, quando períodos inferiores a 1 segundo.

### 2.2.1. Variação Secular

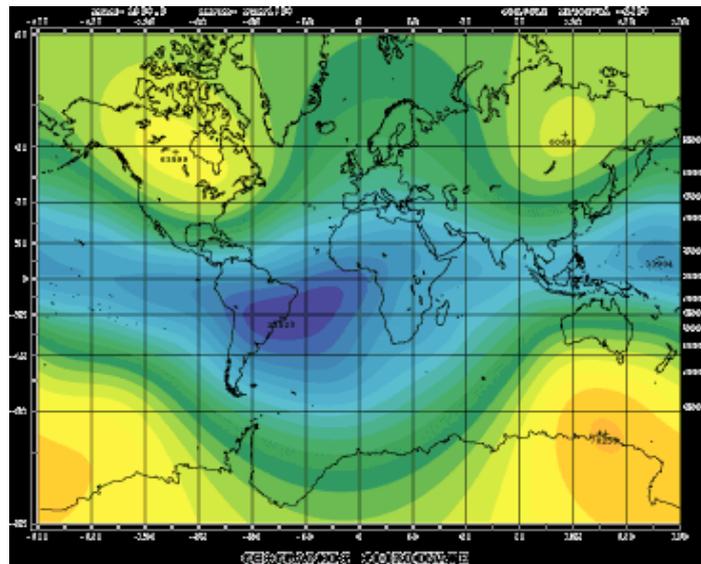
É uma variação lenta e contínua observada no campo geomagnético (figuras: 2.5 - 2.6 - 2.7 - 2.8). Ela está relacionada com as correntes elétricas que fluem no núcleo externo da Terra e fornece informações importantes para uma melhor análise dessa camada do planeta. Tem uma escala temporal que chega há mil anos e é dada pela mudança anual no valor do campo.



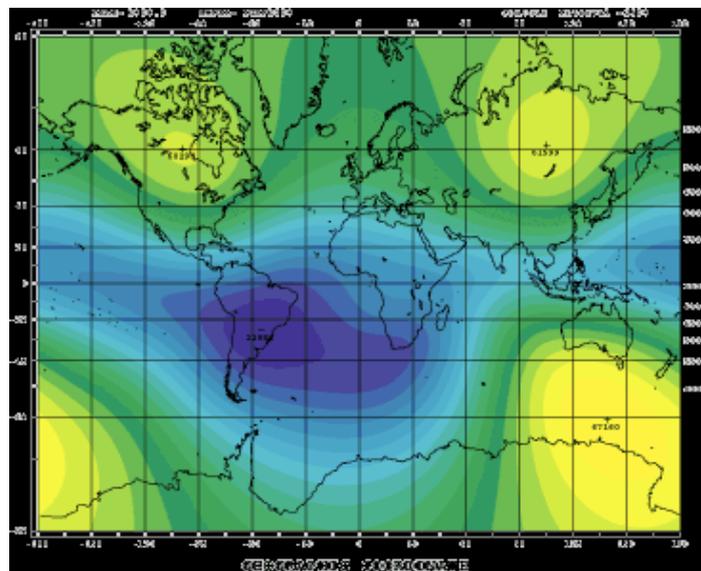
**Figura 2.5: Variação Geomagnética, Coordenadas geográficas em 1600.**  
Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/anime/index.html>



**Figura 2.6: Variação Geomagnética, Coordenadas geográficas em 1700.**  
Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/anime/index.html>



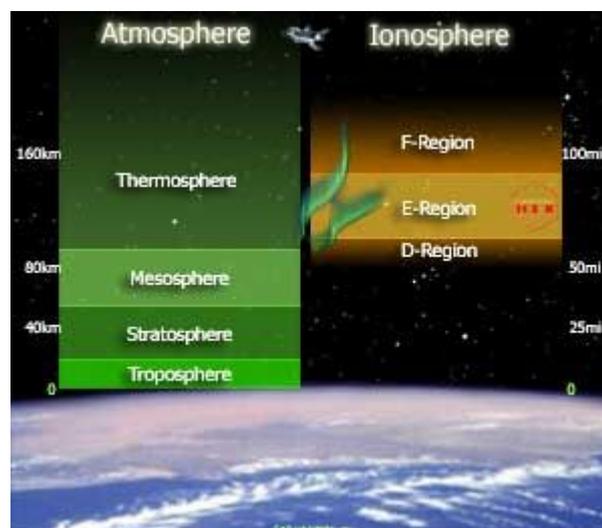
**Figura 2.7: Variação Geomagnética, Coordenadas geográficas em 1900.**  
Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/animate/index.html>



**Figura 2.8: Variação Geomagnética, Coordenadas geográficas em 2000.**  
Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/animate/index.html>

### 2.2.2. Variações Diurna

Devido a sistemas de correntes elétricas, geradas pelo movimento das camadas atmosféricas ionizadas através das linhas do campo geomagnético, são originadas as variações diurnas. Em períodos quietos (sem atividade geomagnética) e eliminando-se as contribuições de menor escala temporal, como as pulsações geomagnéticas e da Lua, tem-se a variação diurna. A região da ionosfera na qual circula o sistema de correntes que origina essa variação é a região *E* (entre 80 e 120 km de altitude), figura 2.9.



**Figura 2.9: Divisão da atmosfera e ionosfera.**

Fonte: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/ionosphere.html>

A variação diária é relacionada à época do ano, à atividade solar e à latitude geomagnética. A atividade do campo geomagnético pode ser classificada através de índices, relacionados à:

- Variação Sq (do inglês *Solar quiet*), para dias magneticamente calmos.
- Variação SD (*Solar Disturbed*) para dias de atividade mais intensa.
- Variação Dst (*Storm Time Disturbance*) nos dias de ocorrência de tempestades geomagnéticas.

### 2.3. Reversões do Campo Geomagnético

Há evidências de que o campo geomagnético sofreu várias reversões durante o seu tempo de vida. Estas evidências foram conseguidas com análises magnéticas, realizadas por navios, no meio dos oceanos e provam haver reversões do campo geomagnético ao longo da história. Durante a reversão o momento de dipolo decresce para zero, enquanto mantém sua orientação. No intervalo em que não há a componente dipolar, a parte não-dipolar parece persistir (Dutra, 2004).

### 2.4. Pulsações Geomagnéticas

As pulsações geomagnéticas tem origem externa a Terra. As pulsações são variações magnéticas em um intervalo de tempo curto (entre 0,2 segundos e 17 minutos) que ocorrem no campo geomagnético, resultantes de interações entre as partículas carregadas eletricamente do vento solar e o plasma da magnetosfera e ionosfera terrestres. Elas são classificadas como regulares (ou contínuas, Pc1 a Pc5) e irregulares (Pi1 e Pi2). Podem ser subdivididas em subgrupos, dependendo de seus períodos, segundo as seguintes faixas (Jacobs *et al.* 1964), tabelas 2.1 e 2.2:

Contínuas	Pc1	Pc2	Pc3	Pc4	Pc5
$f$	0,2–5 Hz	0,1–0,2 Hz	22–100 mHz	7–22 mHz	2–7 mHz
$T$ (s)	0,2–5	5–10	10–45	45–150	150–600

Tabela 2.1: Classificação das pulsações contínuas.

Irregulares	Pi 1	Pi 2
$f$	0,025–1 Hz	2–25 mHz
$T$ (s)	1–40	40–150

Tabela 2.2: Classificação das pulsações irregulares.

Considera-se a Pc6, acima de 600 segundos, e a Pi3, com períodos acima de 150 segundos, ambas até 1.000 segundos. Samson (1991), baseado nos processos físicos e nos mecanismos de geração, considera as pulsações divididas em três categorias: baixa frequência (1–10 mHz), média frequência (10 mHz–0,1 Hz) e alta frequência (0,1–10 Hz).

## CAPÍTULO 3

### 3.1. Magnetosfera Terrestre

A magnetosfera é a região do espaço em que o campo geomagnético controla o movimento do plasma, oriundo do vento solar. É uma estrutura dinâmica que tem sua forma alterada devido à pressão exercida pelo vento solar. A forma dipolar do campo magnético se mostra distorcida pela ação do vento solar, pois na direção voltada para o Sol forma-se uma onda de choque (*bow shock*), e na direção contrária forma-se uma extensa cauda (*magnetotail*). Após a onda de choque forma-se uma região de grande turbulência, servindo como transição entre a onda de choque e a magnetosfera, é a chamada bainha magnética (*magnetosheath*). Em seguida vem a magnetopausa, que separa as regiões do campo magnético interplanetário da região do campo geomagnético, que é o limite da magnetosfera. A distância da magnetopausa a partir da Terra é somente cerca de 10 raios terrestres na face voltada para o sol, e cerca de 10 vezes maior na direção oposta, figura 3.1.

A existência do campo geomagnético (e a região originada, a magnetosfera) é essencial para a vida terrestre, uma vez que ele protege a superfície terrestre de partículas de altas energias oriundas do vento solar e de parte dos raios cósmicos. O vento solar se choca com o campo geomagnético em velocidades supersônicas.

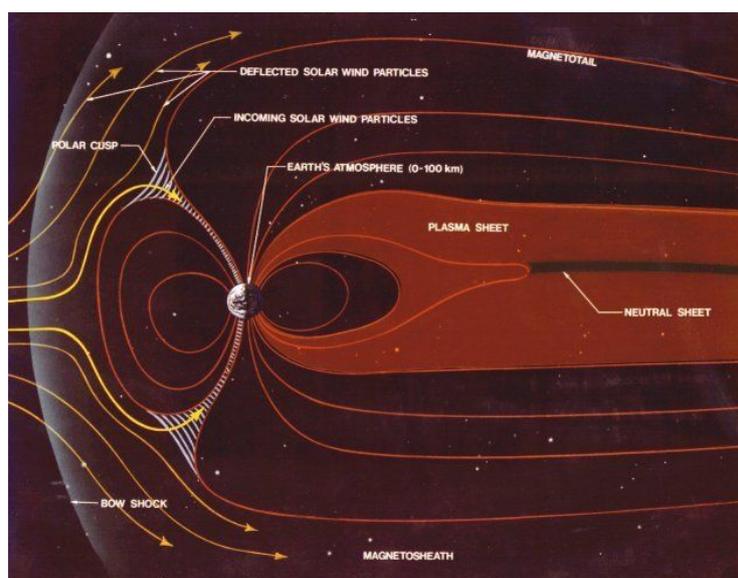
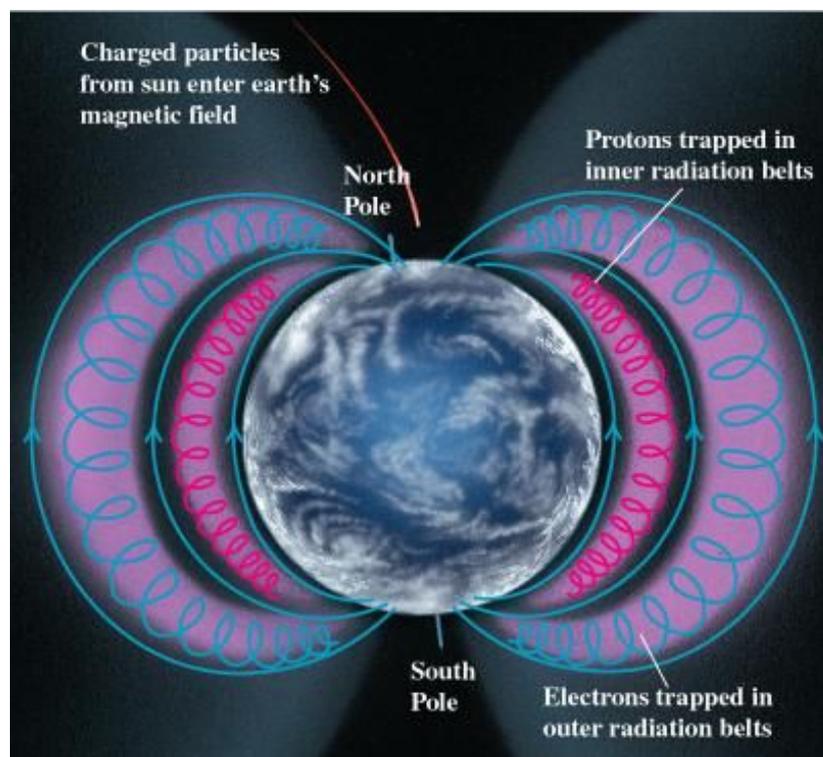


Figura 3.1: Estruturas da magnetosfera terrestre.

Fonte: <http://www.nasa.gov/>

### 3.2. Cinturão de Radiação de Van Allen

Em trabalhos feitos por Carl Störmer em 1907, início do século XX, que tratava sobre o movimento de partículas eletricamente carregadas ao longo do campo geomagnético da aurora polar, mostrou que era teoricamente possível o aprisionamento dessas partículas no campo geomagnético quando consideradas outras latitudes [Dutra, 2004]. No final dos anos 50 foram descobertas regiões imensas de radiação dentro da magnetosfera terrestre. Essas regiões foram denominadas de “cinturão de radiação de Van Allen”, em homenagem ao seu descobridor. Esses cinturões contêm prótons e elétrons de alta energia entre 1-100 Mev, oferecendo grande risco aos astronautas, pois facilmente penetram em uma nave espacial que estiver nessa região. O cinturão de Van Allen consiste de um cinturão interno de prótons (entre 2.200 e 5.000 km de distância da superfície) e um cinturão externo de elétrons (entre 13.000 55.000 km de distância da superfície), figura 3.2. O cinturão de radiação de Van Allen encontra-se em menor altitude na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul por consequência da menor intensidade do campo geomagnético na superfície terrestre.



**Figura 3.2:** Cinturão de radiação de Van Allen ao redor da Terra.  
**Fonte:** [http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/mag\\_field.htm](http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/mag_field.htm)

### 3.3. Interação Terra-Sol

Uma perturbação geomagnética, devido ao choque do vento solar com o campo geomagnético, é um fenômeno muito complexo. A intensidade dessa perturbação não é nada fácil de se caracterizar. Sabe-se que na sua totalidade a atividade geomagnética depende da fase e do ciclo solar. No Sol ocorrem explosões nucleares que liberam luz e energia. Parker (1958) fez um estudo pioneiro mostrando que a temperatura no gás da coroa solar era suficientemente alta para sobrepor a atração gravitacional do Sol, criando assim um transporte supersônico (expansão) de principalmente hélio e hidrogênio ionizados. Essa “brisa” é denominada de “vento solar”. A velocidade supersônica do vento solar é alcançada a uma distância aproximadamente de 2 a 3 raios solares. O vento solar com seu contínuo fluxo de plasma, arrasta consigo as linhas do seu campo magnético, levando-o à distâncias além de Plutão, figuras 3.3 e 3.4.

O principal responsável para a ocorrência das tempestades geomagnéticas é o vento solar no seu momento de maior variação e intensidade. As tempestades são conseqüências do aumento de correntes magnetosféricas e ionosféricas devido a interação entre o vento solar e o campo geomagnético, e a incidência de raios X solares e radiação UV solar, aumentando os sistemas de correntes ionosféricas de tal maneira que o campo geomagnético experimenta fortes perturbações. Uma tempestade típica pode ser dividida da seguinte maneira:

- Fase inicial, com duração de quatro horas em média.
- Fase principal, com várias horas de duração,
- Fase de recuperação, com duração de algumas horas a alguns dias, dependendo da intensidade da tempestade.

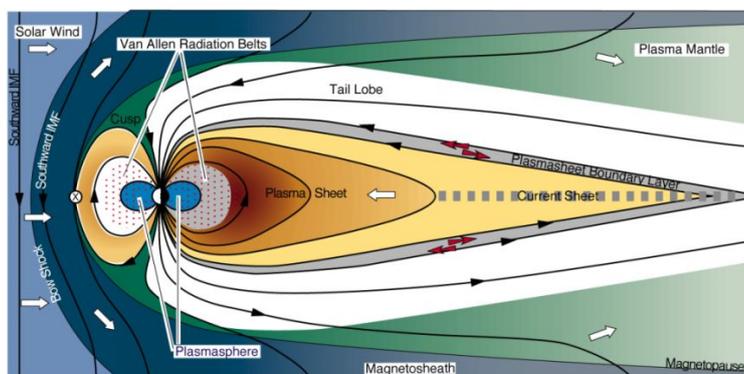
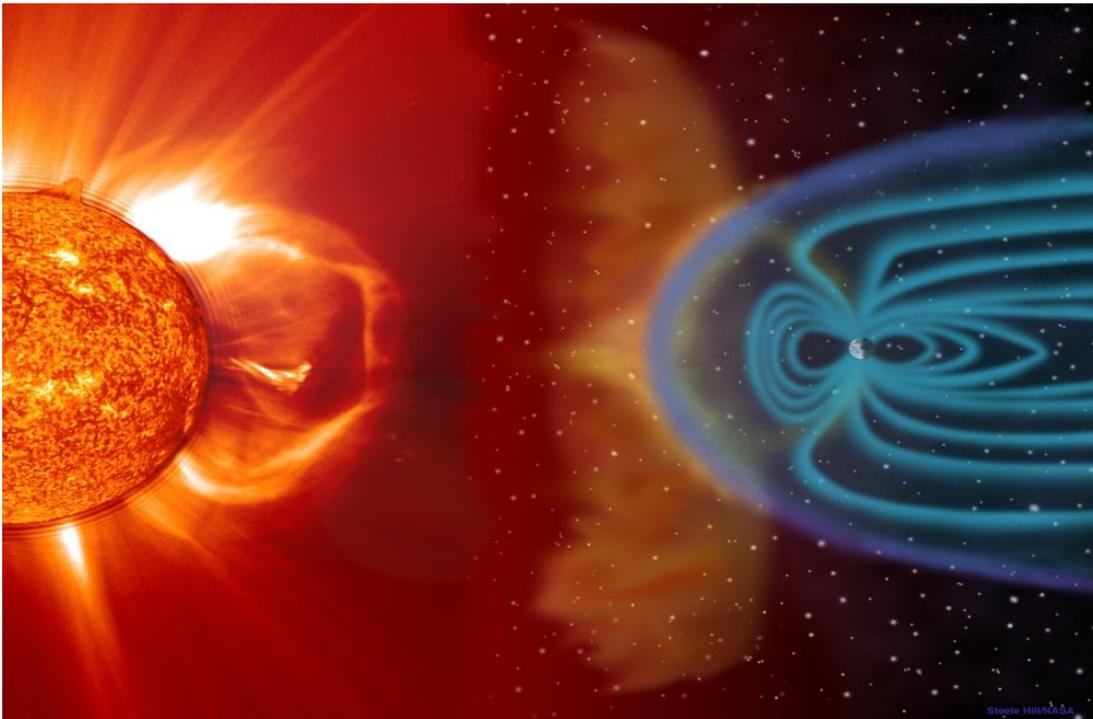


Figura 3.3: Interação Sol – Terra com suas características identificadas.

Fonte: [http://space.rice.edu/image/livefrom/5\\_magnetosphere.jpg](http://space.rice.edu/image/livefrom/5_magnetosphere.jpg)



**Figura 3.4: Representação artística da interação Terra- sol, mostrando a forma da magnetosfera terrestre.**  
Fonte: //usrlazio.artov.rm.cnr.it/eclisse2006/Interventi\_file/lezione1\_file/slide0017\_image096.jpg

É importante o monitoramento quantitativo da perturbação geomagnética ao longo do tempo. Vários índices são usados para essa finalidade. Inicialmente são índices locais, de estações magnéticas de determinada coordenada geográfica. A partir destes índices locais é formulado um índice internacional (ou planetário) para determinação de dias magneticamente calmos e perturbados. Estes índices são usados com sucesso em vários campos além do Geomagnetismo, como por exemplo Clima Espacial, Física Solar, Raios Cósmicos e Ionosfera.

O principal índice usado neste trabalho foi o índice Kp (índice de Bartels) ou chamado índice planetário. Este índice é usado para indicar a atividade geomagnética em toda a Terra, de forma internacional. Este índice é usado como referência para estudos coordenados preliminares.

Cada valor Kp é obtido a cada 3 horas em diferentes estações magnéticas ao redor do globo, totalizando 13 estações no total sendo a maioria delas em uma latitude em torno de 60° no hemisfério norte, figura 3.5.

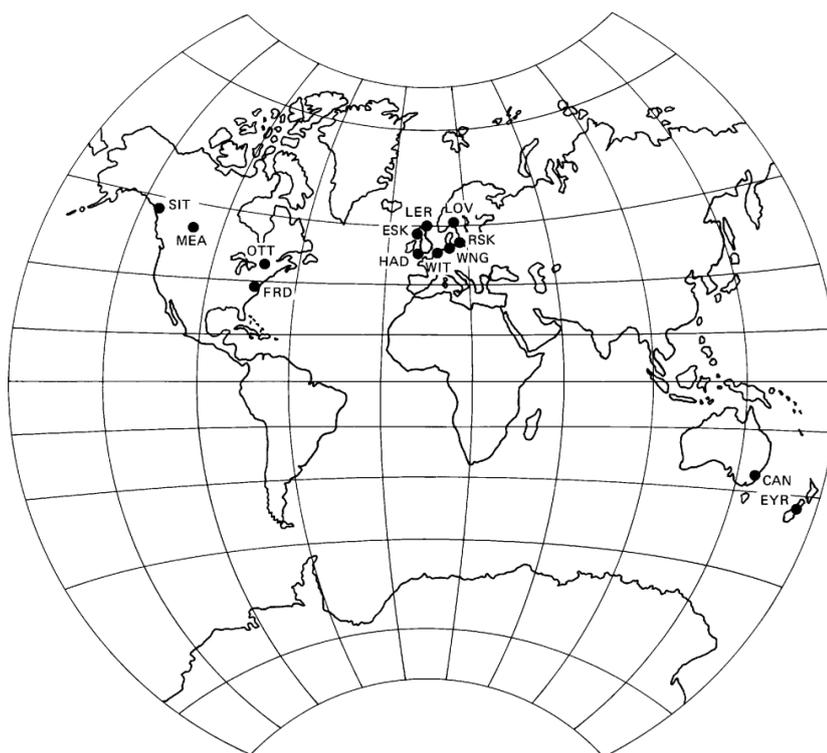


Figura 3.5: Distribuição global dos observatórios Kp.

Fonte: [http://isgi.cetp.ipsl.fr/des\\_kp\\_ind.html](http://isgi.cetp.ipsl.fr/des_kp_ind.html)

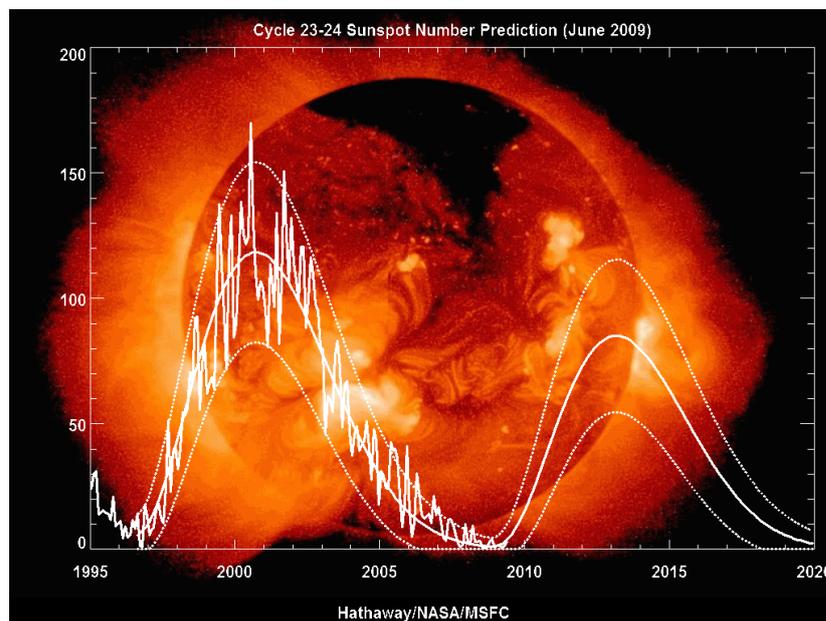
O índice  $\Sigma Kp$  é uma soma diária de oito valores Kp que indicam se o dia é magneticamente calmo ou perturbado. Ele possui uma escala de 0o até 9°, expressados em terços de unidades (por exemplo 5- é 4 + 2/3, 5o é 5 e 5+ é 5 + 1/3). Este é o índice base para determinação dos cinco dias quietos e os cinco dias perturbados de cada mês internacionalmente. Quando o  $\Sigma Kp$  para dois dias é igual, indicando aparentemente que estes dois dias são magneticamente idênticos, usa-se o índice Ap para verificar se de fato são idênticos ou um é mais perturbado magneticamente que o outro. O índice Ap é uma média aritmética diária dos 8 valores ap, que por sua vez é um índice com relação linear com o índice  $\Sigma Kp$ , demonstrado na tabela 3.1:

$\Sigma Kp$	0o	0+	1-	1°	1+	2-	2°	2+	3-	3°	3+	4-	4°	4+
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
$\Sigma Kp$	5-	5°	5+	6-	6°	6+	7-	7°	7+	8-	8°	8+	9-	9°
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Tabela 3.1: Índice Kp em relação ao índice ap.

### 3.4. Ciclo Solar

O Sol possui um ciclo de atividade de 11 anos, que é caracterizado por um aumento no número de manchas solares atingindo um período de máxima atividade e reduzindo sua atividade logo em seguida. O campo magnético interplanetário tem uma relação direta com o ciclo solar, durante esse ciclo são identificadas fases distintas: (1) fase de mínimo solar; (2) fase ascendente; (3) fase de máximo solar; e (4) fase descendente, figura 3.6.

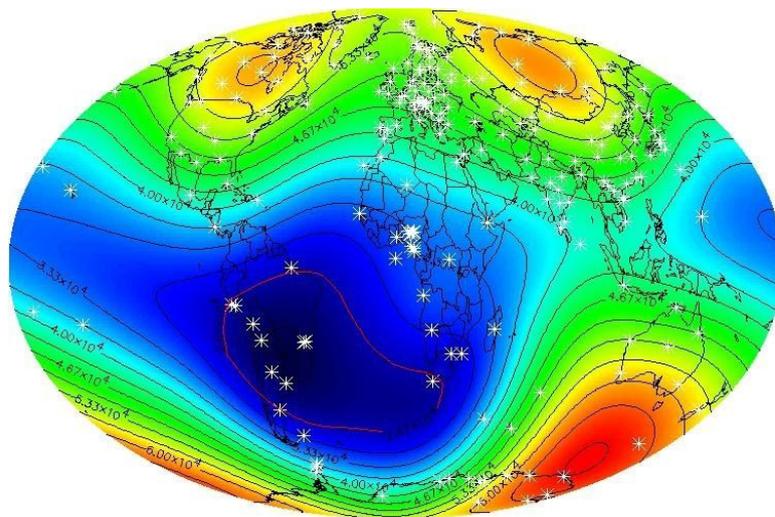


**Figura 3.6: Atividade solar relacionada com o ciclo solar.**  
Fonte: [http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn\\_predict\\_1.gif](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif)

Durante o máximo do ciclo ocorre o aumento de fenômenos energéticos nas regiões ativas associadas às manchas solares. Estes fenômenos são chamados de explosões solares (*solar flares*), podendo estar associados a ejeções coronais de massa e a tempestades geomagnéticas. Efeitos importantes da atividade no Sol, devido ao aumento da intensidade do vento solar, são os prejuízos causados em telecomunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistemas de fornecimento de energia, oleodutos, sistemas biológicos e os danos das radiações ionizantes de origem solar que podem atingir missões espaciais tripuladas (colocando em risco a saúde dos astronautas pela exposição a grande quantidade de radiação). Atualmente estamos numa fase de mínima atividade solar, iniciando o ciclo solar número 24.

### 3.5. Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS

As linhas de campo geomagnético tem um formato aproximadamente esférico, formando a magnetosfera terrestre, que fornece proteção contra as partículas eletricamente ionizadas provenientes do vento solar e de parte dos raios cósmicos. Porém o campo geomagnético não é simétrico, formando algumas anomalias na intensidade total ao redor da superfície da Terra. A única região com menor intensidade em todo o globo fica na América do Sul, denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), tem seu centro situado aproximadamente nas coordenadas 25° S e 48°O e possui um raio aproximado de 900 km, ficando sobre o território brasileiro desde o estado de São Paulo até o extremo sul do Rio Grande do Sul, figura 3.7.



**Figura 3.7: Mapa magnético da Terra. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul em azul escuro.**  
Fonte: NASA

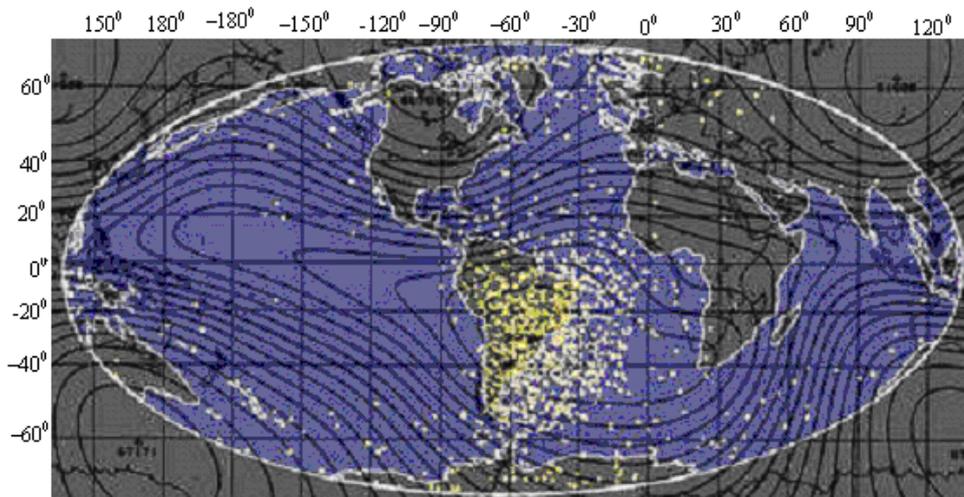
A menor intensidade do campo geomagnético na região da AMAS explica-se como sendo resultante, em grande parte, do deslocamento excêntrico do campo geomagnético em relação ao centro da Terra. Por consequência, o cinturão de radiação de Van Allen se encontra permanentemente em menor altitude sobre a região da AMAS, aumentando assim o fluxo de partículas ionizadas e oferecendo interferência no funcionamento e na comunicação de satélites, figura 3.8, (muitos deles ao passarem pela região da AMAS são desligados para evitarem possíveis danos). Esse fluxo mais intenso



de partículas ionizadas na região da AMAS também oferece risco a saúde das tripulações de veículos-espaciais que passam por esta região.

Por outro lado, por ter uma maior precipitação de partículas de altas energias do que em outros pontos do globo terrestre, esta região torna-se um excelente laboratório natural para estudos de fenômenos atmosféricos em condições de campo magnético fraco. A intensidade do campo geomagnético do nosso planeta tem decrescido nos últimos mil anos e irá desaparecer dentro dos próximos dois mil anos se a presente taxa de decréscimo persistir. Observou-se também que a taxa de decréscimo é maior próxima da América do Sul. Como na região da AMAS a intensidade total do campo geomagnético já é baixa, o campo geomagnético da América do Sul poderá desaparecer dentro de algumas centenas de anos. Sabe-se que os pólos magnéticos da Terra freqüentemente sofreram reversões durante a história do planeta. Quando os pólos magnéticos da Terra revertem, a intensidade do campo magnética torna-se muito fraca. Considera-se que os seres humanos terão que viver sobre um campo magnético extremamente fraco no futuro, implicando um maior bombardeamento de partículas de altas energias oriundas do vento solar e de raios cósmicos na atmosfera terrestre, gerando conseqüências imprevisíveis sobre a atmosfera e também no nível da superfície, afetando diretamente a vida na Terra. Esta precipitação de partículas energéticas pode agravar os problemas na redução temporária na camada de ozônio observado na região sul do Brasil, como conseqüência de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico.

É interessante a implementação de estudos das conseqüências do maior bombardeamento de partículas sobre a superfície da Terra e a vida como a conhecemos.



**Figura 3.8:** A posição de satélites onde sofreram danos na memória do computador. Maior concentração sobre a região da AMAS.

Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>

## CAPÍTULO 4

### 4.1. Aquisição dos dados e Instrumentação

Para medir a intensidade das componentes ortogonais do campo geomagnético é necessária a interação do campo com outros processos físicos para produção de efeitos mensuráveis. Devido a grande extensão espacial desse campo em relação à dimensão dos sensores, apenas medidas pontuais são obtidas. O instrumento utilizado para realizar a medição do campo geomagnético são os magnetômetros.

A aquisição de dados no Projeto “*Variação com ciclo solar das pulsações geomagnéticas de períodos longos (1,0 – 10 milihertz) na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS*” esta sendo realizada utilizando um magnetômetro tipo *fluxgate* (núcleo saturado) instalado no Observatório Espacial do Sul no município de São Martinho da Serra, RS, Brasil (SMS - 29,43° S, 53,82° W, elevação 488m a.n.m.). Após a coleta dos dados é necessário uma filtragem digital, realizada em programas com linguagem *Matlab*, para o estudo das características das pulsações desejadas.

#### 4.1.1. Magnetômetro *fluxgate* (núcleo saturado)

Magnetômetros de núcleo saturado (*fluxgate magnetometer*) são equipamentos destinados à obtenção de dados sobre o comportamento de um determinado campo magnético. O seu funcionamento deve-se a propriedades magnéticas de certos materiais ferromagnéticos que apresentam uma histerese com ponto de saturação elevado. A alta permeabilidade dos materiais utilizados na construção dos núcleos é essencial para a detecção do campo magnético que se deseja mensurar. Este tipo de magnetômetro é geralmente usado em observações geomagnéticas no solo e no espaço, na prospecção mineral, análise estrutural de materiais, aplicações na biomedicina e operações militares.

A técnica utilizada no magnetômetro *fluxgate* consiste em expor um núcleo ferromagnético a um campo de excitação  $\mathbf{H}$  gerado por uma bobina ao redor deste

núcleo. Nesta bobina são induzidos pulsos periódicos de corrente que são responsáveis pela variação do fluxo magnético do material até seu ponto de saturação.

Nesse momento o fluxo deixa de se concentrar no núcleo, não importando a intensidade do campo ao qual ele estiver exposto. Quando o material deixa o estado de saturado, a intensidade de fluxo magnético varia, gerando assim uma força eletromotriz induzida numa segunda bobina (enrolamento secundário) existente ao redor do conjunto formado pelo núcleo e o primário. O sinal de tensão gerado no secundário apresenta um conteúdo altamente harmônico que é diretamente influenciado pelo campo magnético. Os harmônicos pares do sinal detectado são os que mais sofrem influência do campo geomagnético. O segundo harmônico do sinal é o que apresenta a maior linearidade com relação à variação do campo magnético terrestre.

O magnetômetro de núcleo saturado utilizado neste projeto de pesquisa é de baixo ruído e com um período de aquisição de dois segundos (taxa de 0,5 Hz). São coletados dados das variações geomagnéticas detectadas na superfície terrestre, para as componentes **H** (norte-sul magnético), **D** (leste-oeste magnético) e **Z** (vertical magnético), sendo que o relógio do equipamento é sincronizado com os sinais do sistema GPS presentes no Observatório Espacial do Sul, figura 4.1.



**Figura 4.1:** Circuito do magnetômetro fluxgate instalado no Observatório Espacial do Sul –OES/CRS/INPE - MCT. Fonte: LFSMIM/CRS/INPE - MCT

#### 4.1.2. Filtragem digital

Ao fazermos o gráfico da intensidade das três componentes **H**, **D** e **Z** do campo geomagnético *versus* tempo, ele nos mostrará a variação diária (período de 24 horas) do campo geomagnético em cada componente. Como o objetivo deste trabalho é estudar as pulsações geomagnéticas com períodos entre 100 e 1000 segundos, se torna necessário filtrar o sinal da variação diária, permitindo que passem somente o sinal da pulsação.

O propósito da filtragem digital é obter a informação específica contida no sinal, produzindo assim um realce nas características espectrais na faixa desejada. Para estudar as pulsações geomagnéticas necessita-se de um filtro que deixe passar apenas sinais em uma banda de frequências. Esses filtros são chamados de filtros passa-faixa ou passa-banda. A aplicação de um filtro passa-banda na variação original do campo geomagnético permite obter o sinal de frequência que se deseja estudar. O filtro é aplicado nas direções direta e reversa, para não alterar a fase do sinal original, com ganho unitário dentro da banda de frequência estipulado pela filtragem. Para este trabalho de filtragem digital foi utilizado programas em linguagem *Matlab* (ver Anexos).

Os dados coletados no magnetômetro *fluxgate* usado no Observatório Espacial do Sul saem em formato binário. O primeiro processamento destes dados ocorre com o auxílio de um programa que transforma estes dados binários em um arquivo em formato ASC/II, também relacionando estes dados da intensidade das três componentes vetoriais ortogonais do campo geomagnético (**H**, **D** e **Z**) plotando um gráfico da variação diária destas 3 unidades. O arquivo em formato ASC/II contendo a informação da variação diária para as 3 componentes do campo geomagnético é utilizado nos demais processamentos feitos em programas com linguagem *Matlab*, sendo possível assim obter muitas informações sobre esta variação diária.

## CAPÍTULO 5

### 5.1. Resultados

Foram realizadas atividades inerentes à aquisição de dados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT e ao estudo de diversos fenômenos do Geomagnetismo, Geofísica Espacial e Clima Espacial. Os dados foram pré-processados e foi organizado um banco de dados contendo informações de eventos geomagnéticos em diversas estações magnéticas para serem estudadas ao longo das atividades do projeto, mantendo um bom monitoramento deles e fonte de consulta permanente para os demais integrantes do grupo no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas. Foram realizadas visitas semanais ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE-MCT para aperfeiçoamento nas medições de declinação e inclinação do campo geomagnético e para manutenção do sistema *MAGDAS* da rede mundial de observação geomagnética, que está em funcionamento através de um convênio com a Universidade de Kyushu, Japão.

Os resultados obtidos nesta fase do projeto de pesquisa visaram uma investigação básica das características das pulsações contínuas Pc-5 (2 – 7 mHz) na região da AMAS e em diferentes fases do ciclo solar. Foram escolhidos cinco dias magneticamente calmos e cinco magneticamente perturbados para cada fase do ciclo solar, sendo então dez dias escolhidos para análise no máximo solar e dez dias no mínimo solar. Para determinação destes dias foi utilizado o somatório do índice planetário  $K_p$ , que foi criado para medir a radiação das partículas oriundas do vento solar através de seus efeitos magnéticos. Se o  $\Sigma K_p$  de dois dias escolhidos for igual, mostrando que aparentemente os dois dias tiveram atividade geomagnética de mesma proporção, então é utilizado o índice  $A_p$  para verificar qual dia é mais calmo (ou perturbado) que o outro. O índice  $A_p$  é derivado do índice  $K_p$ . Para auxiliar o trabalho de escolha dos dias calmos e perturbados para cada fase do ciclo solar foi utilizado o Diagrama Musical de Bartels. Que relaciona os oito valores diários  $k_p$  para cada dia do ano com os dias da rotação solar. Para determinarmos qual período de dados está mais próximo do máximo ou mínimo solar usamos como base a figura 3.6, que mostra a

atividade solar relacionada com o ciclo solar ao longo do tempo. Notamos que o ponto de maior atividade solar, fase do máximo solar, é entre os anos 2000 – 2001. O período de menor atividade solar, fase do mínimo solar, é entre os anos 2008 – 2009. Os dados utilizados para o processamento foram da estação magnética do Observatório Espacial do Sul (SMS - 29,43° S, 53,82° W, elevação 488m) que fica aproximadamente no centro da região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).

### 5.1.1. Dias Escolhidos da Fase de Máximo Solar

Começamos escolhendo cinco dias calmos e cinco dias perturbados na fase do máximo solar. O melhor período para se analisar seria do começo do ano 2000 até o começo do ano de 2001, mas infelizmente não há dados coletados para este período no Observatório Espacial do Sul. Portanto foi escolhido o período mais próximo deste, o de começo de 2001 até final do mesmo ano. Para determinação dos dias calmos e perturbados da fase de máximo solar foi usado o índice  $\Sigma K_p$  e o índice  $A_p$  com o auxílio do diagrama musical de Bartels do ano 2001 (figura 5.1), tendo como base os dias magneticamente calmos e perturbados definidos pela IAGA, demonstradas nas tabelas 5.1 e 5.2, das informações obtidas através do endereço eletrônico:

<http://isgi.cetp.ipsl.fr/lesdonne.htm>.

Dias calmos do máximo solar (CM):

2001

**Tabela 5.1: Dias calmos do máximo solar (CM).**

Data	$A_p$	$K_p$
04/fevereiro	1	2+
28/junho	2	3-
31/maio	2	4o
01/janeiro	2	4+
28/julho	3	4+

Dias perturbados do máximo solar

(PM): 2001

**Tabela 5.2: Dias perturbados do máximo solar (PM).**

Data	$A_p$	$K_p$
31/março	192	61
06/novembro	142	54
22/outubro	771	49-
24/novembro	104	47-
08/abril	63	39-

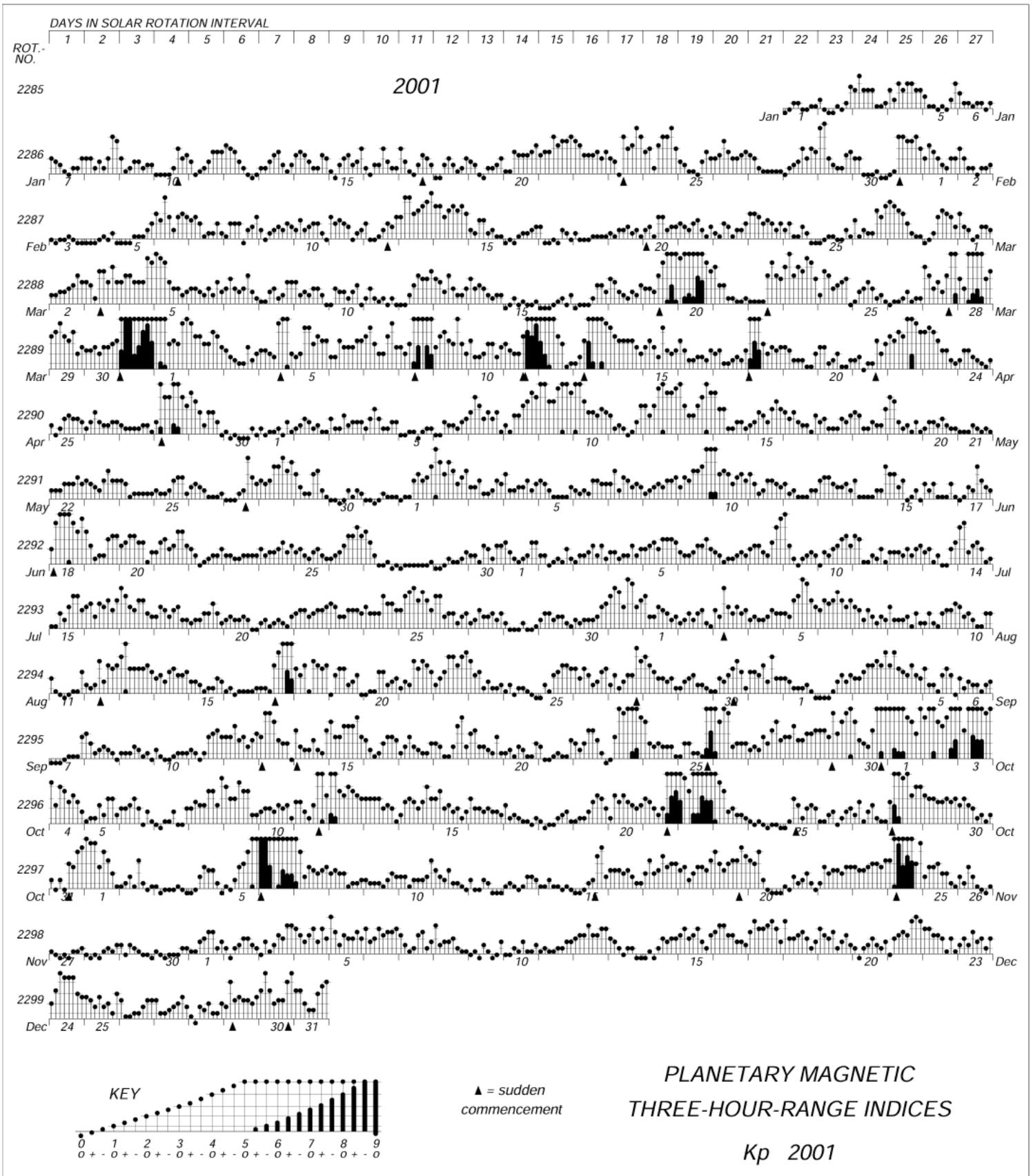


Figura 5.1: Diagrama Musical de Bartels do ano 2001.  
 Fonte: GeomaExt\_ActivKp\_WDC-Kyoto

### 5.1.2. Dias Escolhidos da Fase de Mínimo Solar

Para a escolha dos cinco dias calmos e cinco dias perturbados na fase do mínimo solar foi utilizada a mesma metodologia já aplicada para a escolha dos dias da fase do máximo solar. O melhor período para esta análise é do começo do ano 2008 até final do mesmo ano. Para determinação dos dias calmos e perturbados da fase do mínimo solar foi usado o índice  $\Sigma K_p$  e o índice  $A_p$  com o auxílio do diagrama musical de Bartels do ano 2008 (figura 5.2), tendo como base os dias magneticamente calmos e perturbados definidos pela IAGA, mostradas nas tabelas 5.3 e 5.4. Notar que os dias 1 e 2 de dezembro apresentam atividade geomagnética nula.

Dias calmos do mínimo solar (Cm): 2008

Data	$A_p$	$K_p$
01/dezembro	0	0
02/dezembro	0	0
22/novembro	0	0+
13/setembro	0	1-
21/novembro	0	1-

**Tabela 5.3: Dias calmos do mínimo solar (Cm).**

Dias perturbados do mínimo solar (Pm): 2008

Data	$A_p$	$K_p$
27/março	36	34+
11/outubro	34	30+
29/fevereiro	31	33
04/setembro	31	30+
09/março	30	32

**Tabela 5.4: Dias perturbados do mínimo solar (Pm).**



## **5.2. Processamento dos Dados dos Dias Escolhidos**

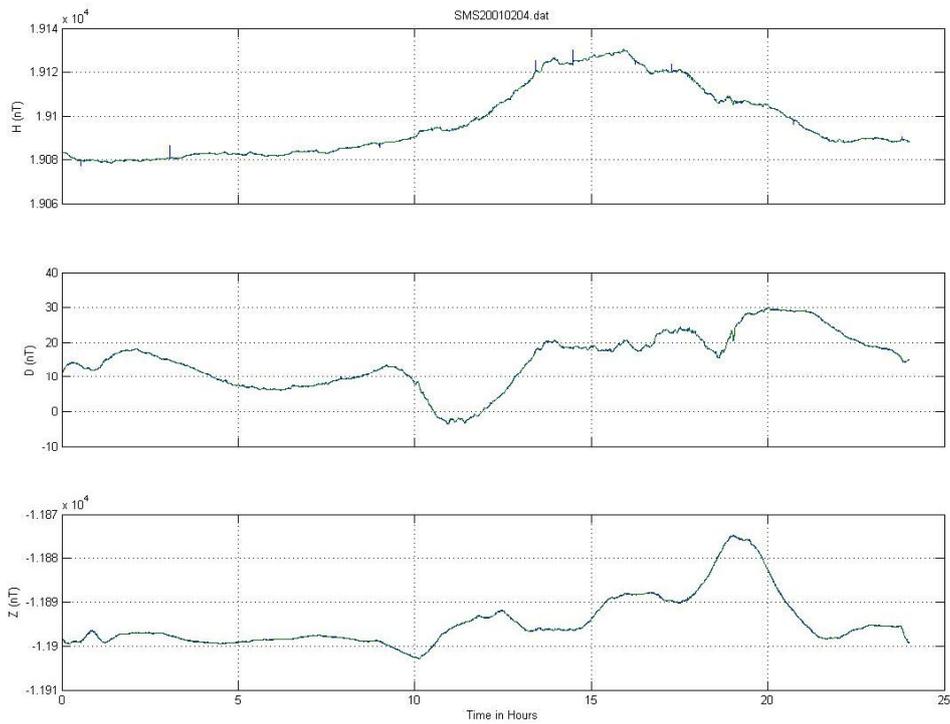
Após a escolha dos dias geomagneticamente calmos e perturbados para cada fase do ciclo solar é iniciado o processamento dos dados de cada dia escolhido, visando obter o máximo de informações e características da atividade geomagnética de cada dia. Primeiro é obtido os dados da variação diária das intensidades das três componentes do campo geomagnético. Identificando seus valores máximos e mínimos e pico-a-pico(*range*). Logo depois ocorre o processamento dos dados utilizando filtros digitais para realçar somente as pulsações contínuas Pc-5 (2 – 7mHz), novamente é identificado os valores máximos e mínimos e pico-a-pico(*range*) alcançados nas pulsações das componentes **H** e **D** para cada dia. São obtidas informações sobre o grau de polarização e espectros do período das pulsações. Mas para esta análise somente serão usados as variações diárias das intensidades das 3 componentes vetoriais e as variações diárias das pulsações Pc-5 nas componentes **H** e **D**. Notar que a escala de tempo informa a hora ZULU (ou *Universal Time*, +3 horas do horário de Brasília).

### **5.2.1 Processamento dos Dias Escolhidos para a Fase do Máximo Solar**

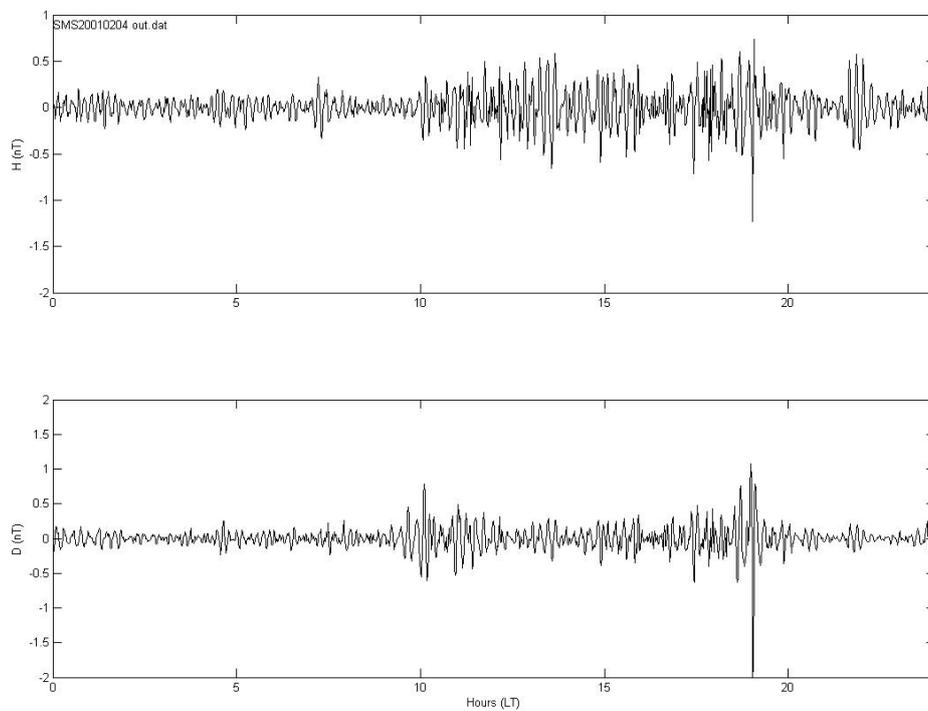
Aqui são apresentados os dados processados para os cinco dias calmos e cinco dias perturbados da fase do máximo solar.

#### **5.2.1.1 Processamento dos Dias Calmos da Fase do Máximo Solar**

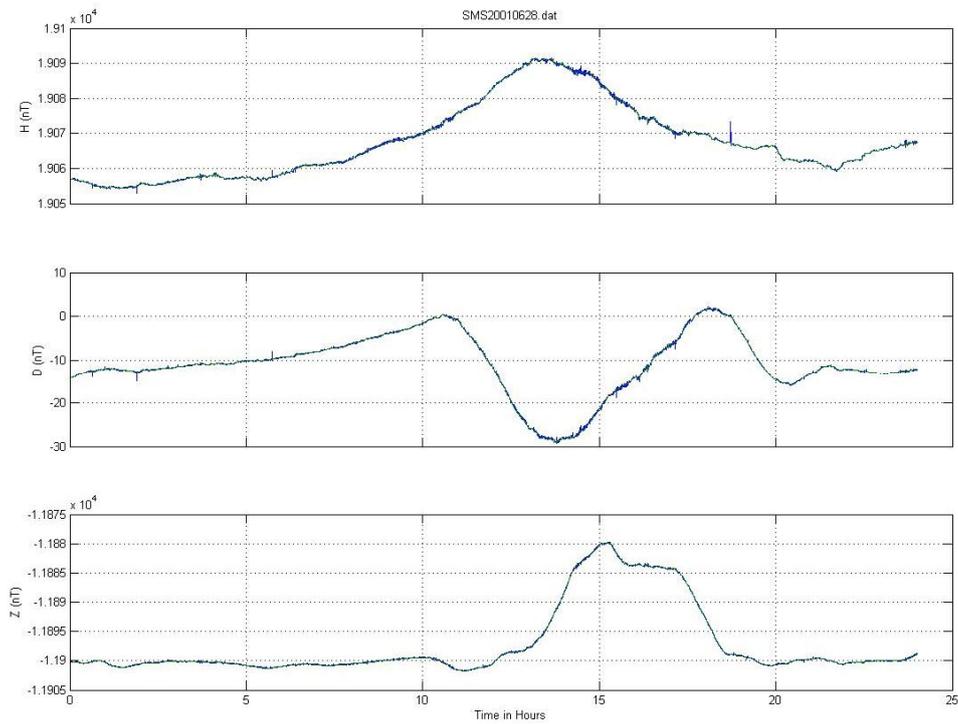
São apresentando os dados processados dos dias calmos do máximo solar (CM) nas figuras: 5.3 a 5.12, (ver tabela 5.1):



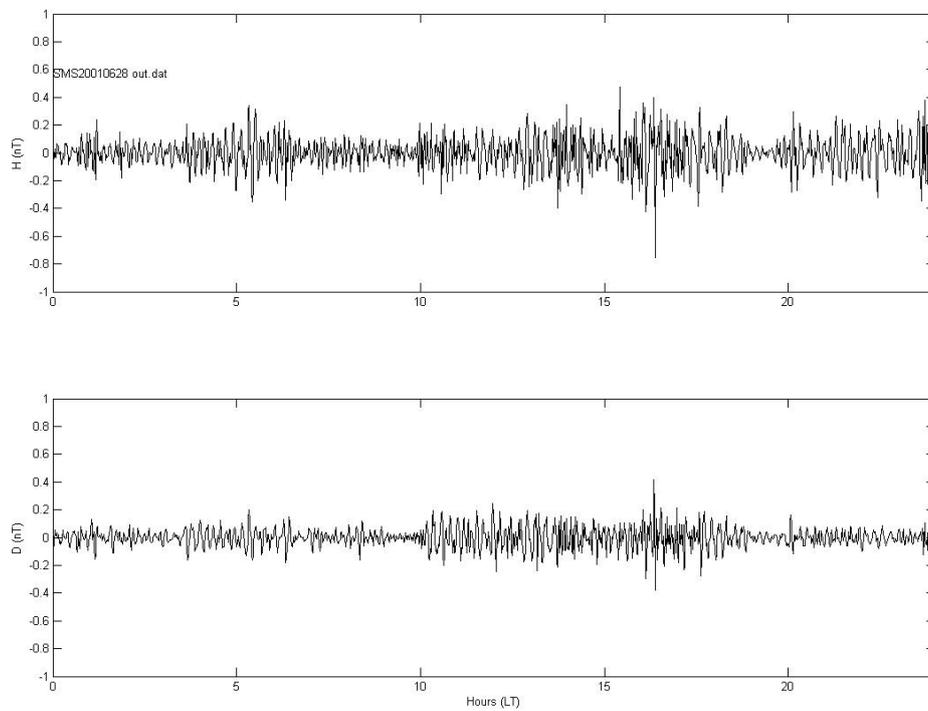
**Figura 5.3: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 04/02/2001.**



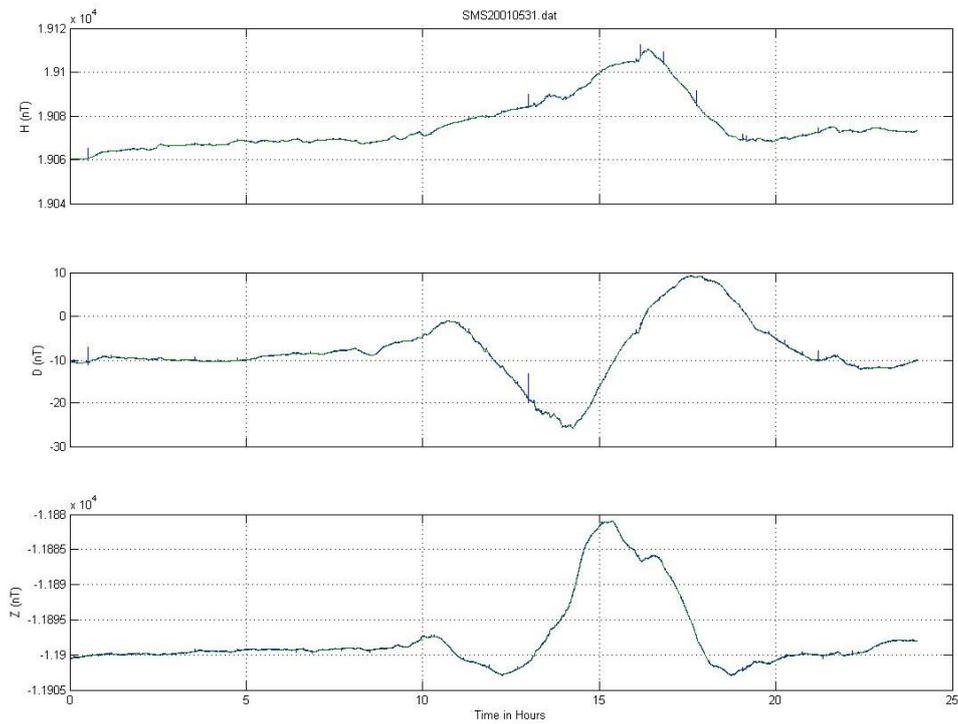
**Figura 5.4: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 04/02/2001.**



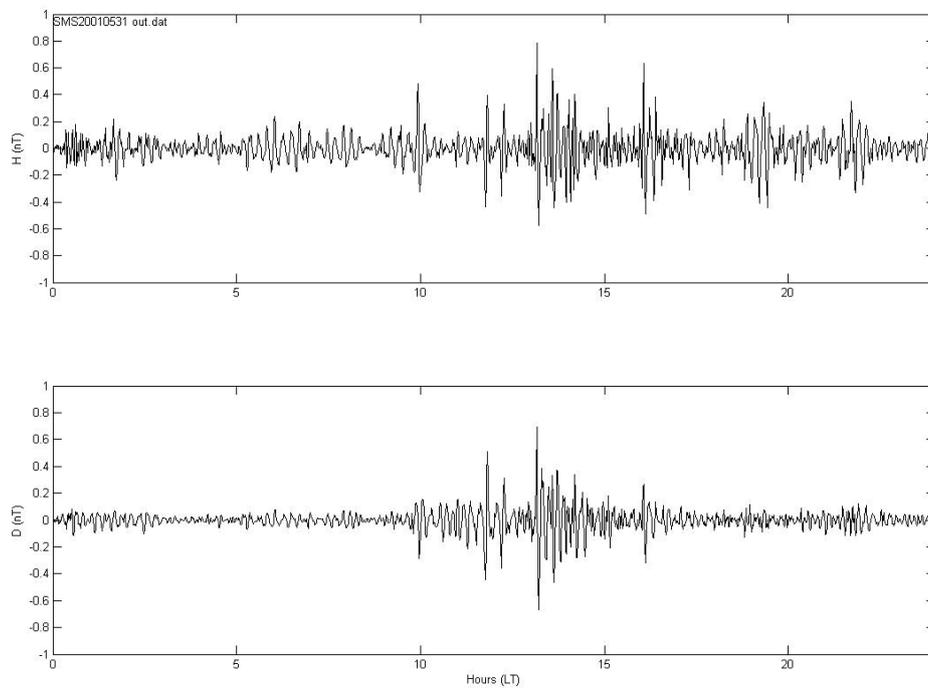
**Figura 5.5: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 28/06/2001.**



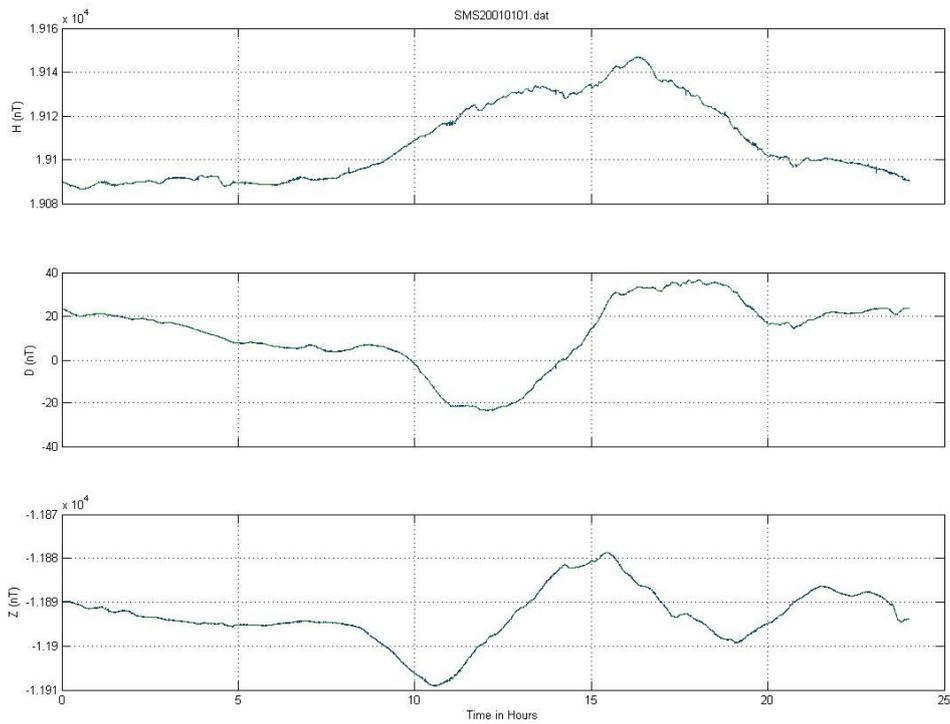
**Figura 5.6: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 28/06/2001.**



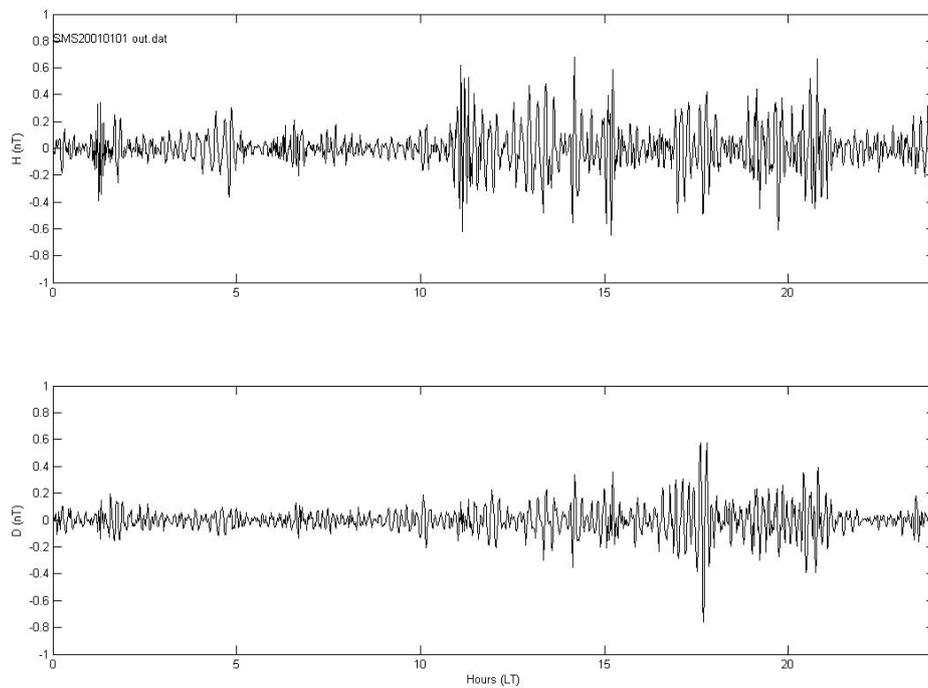
**Figura 5.7: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 31/05/2001.**



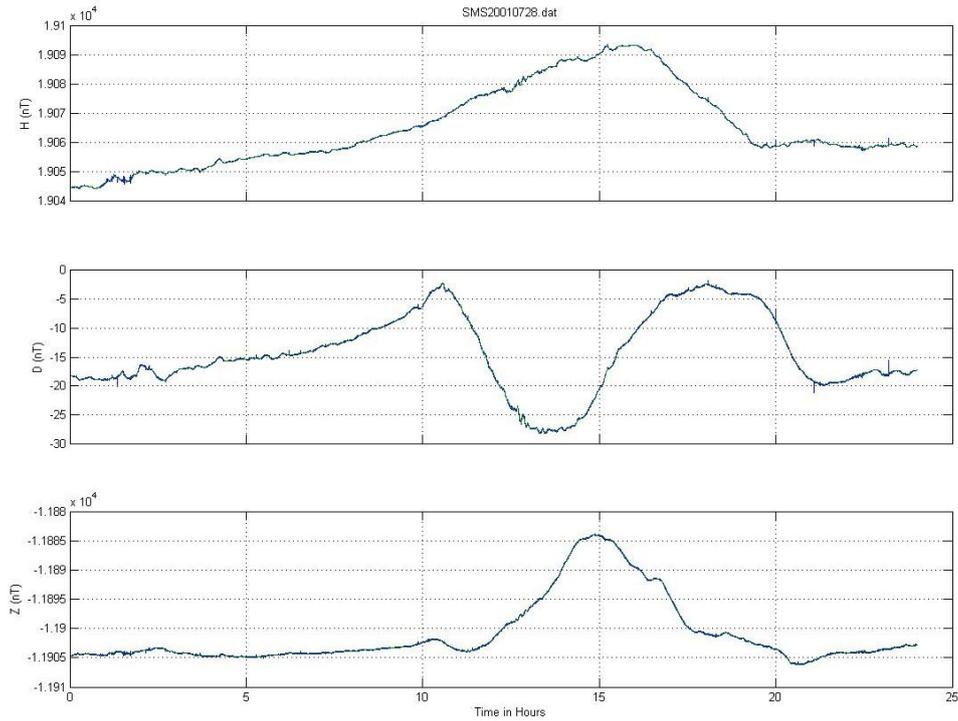
**Figura 5.8: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 31/05/2008.**



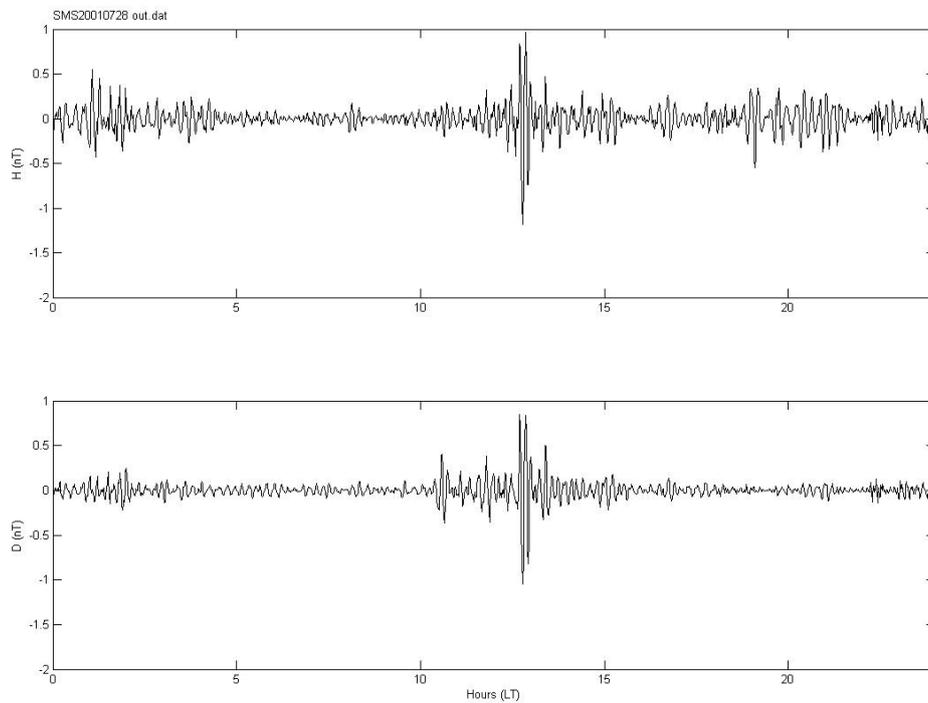
**Figura 5.9: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 01/01/2001.**



**Figura 5.10: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 01/01/2001.**



**Figura 5.11: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 28/07/2001.**



**Figura 5.12: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 28/07/2001.**

### 5.2.1.2 Processamento dos Dias Perturbados da Fase do Máximo Solar

Os dados processados dos dias perturbados do máximo solar (PM) são apresentados nas figuras de 5.13 a 5.22, (ver tabela 5.2).

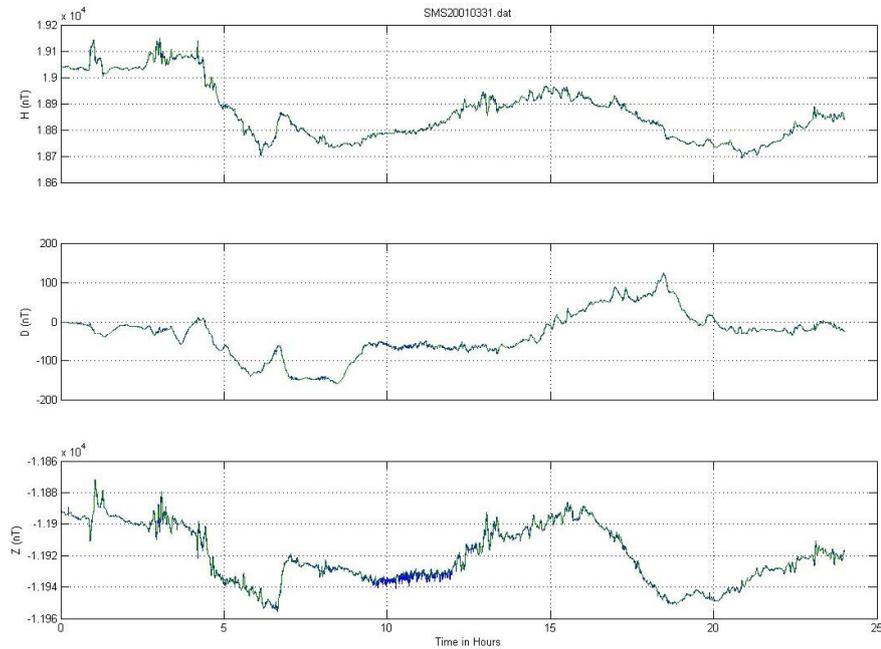


Figura 5.136: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 31/03/2001.

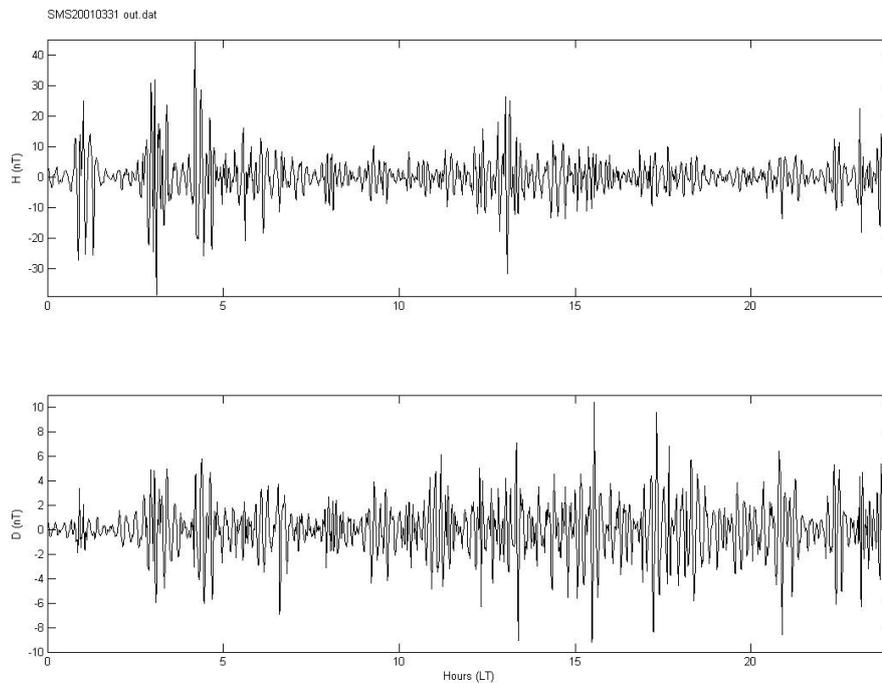
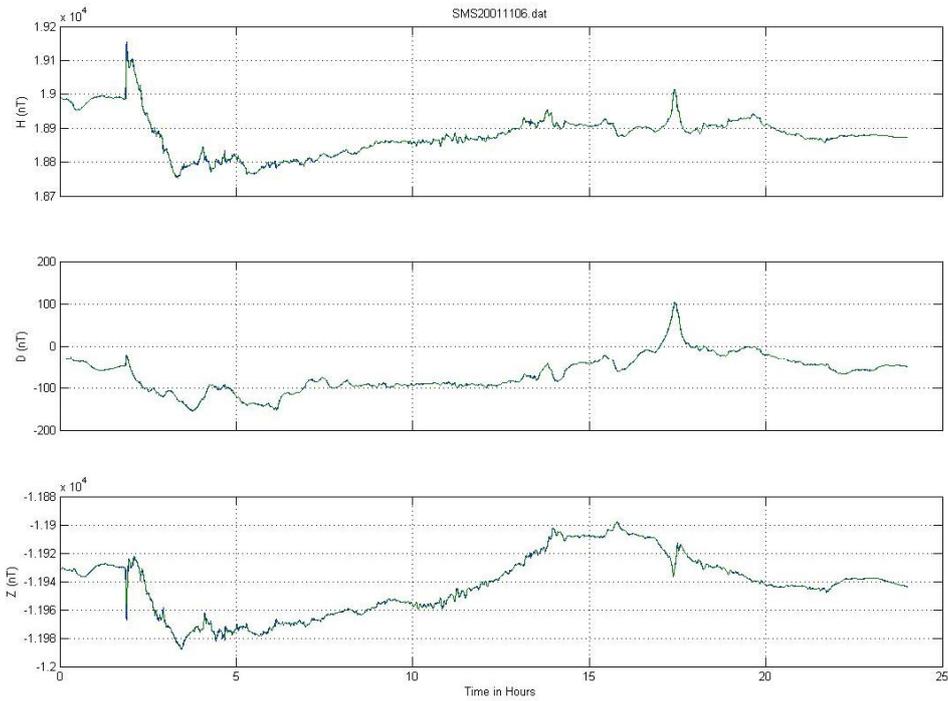
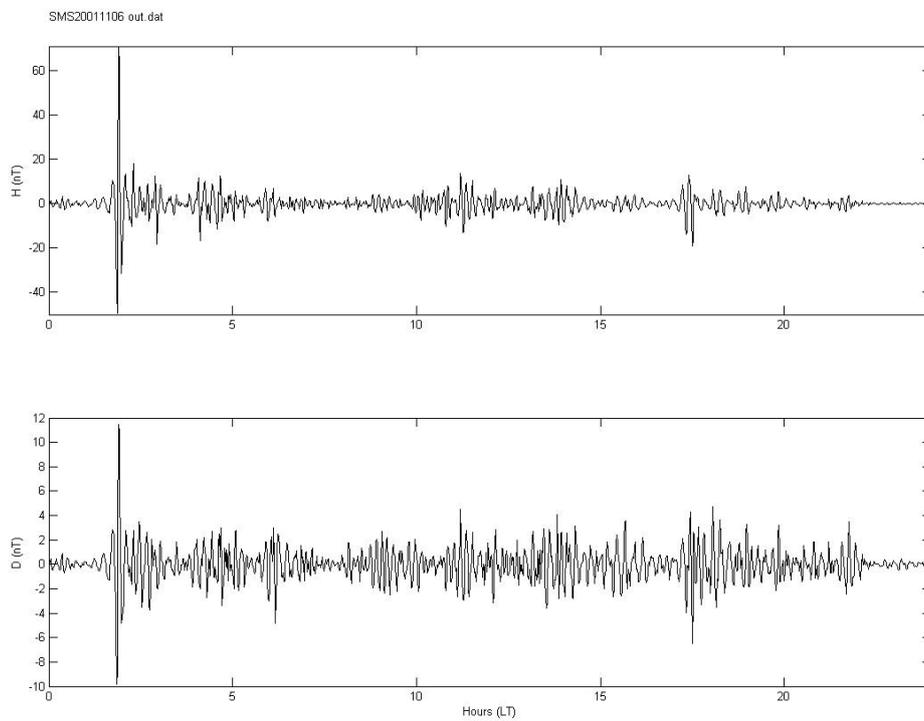


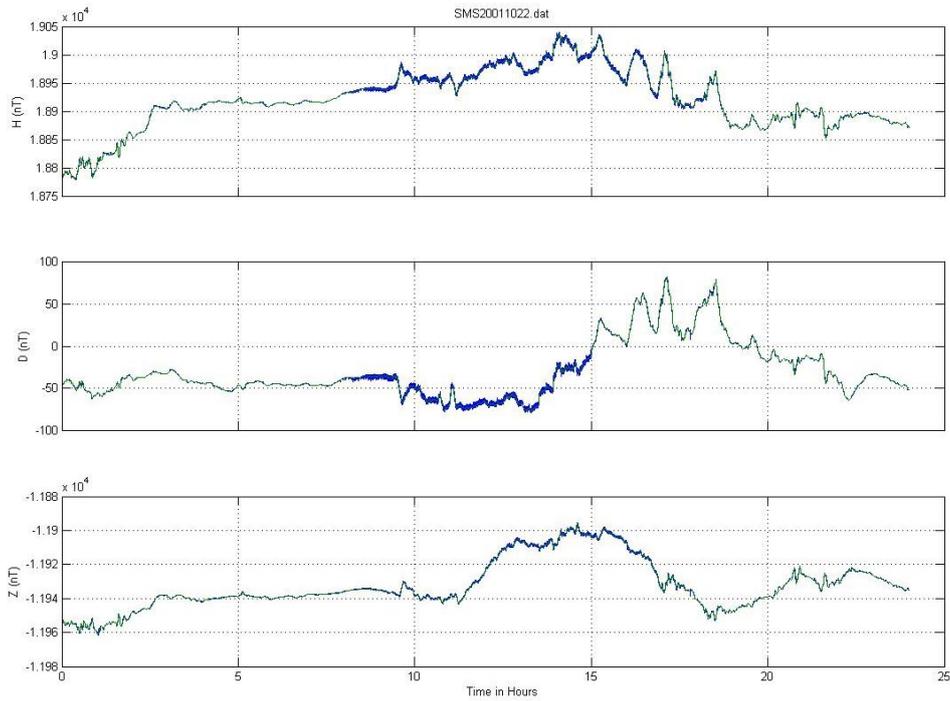
Figura 5.14: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 31/03/2001.



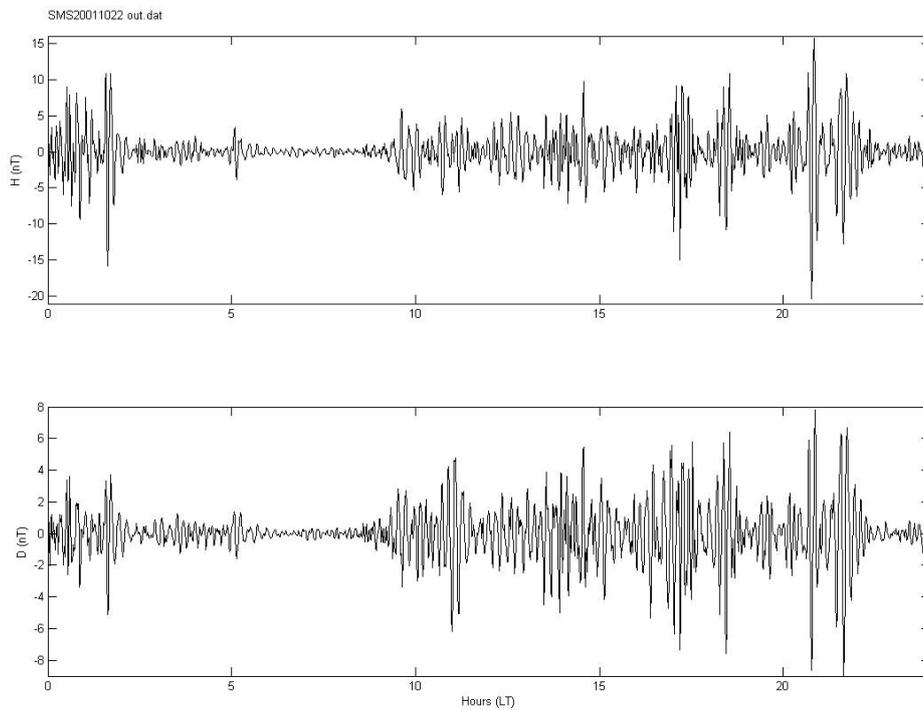
**Figura 5.15: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 06/11/2001.**



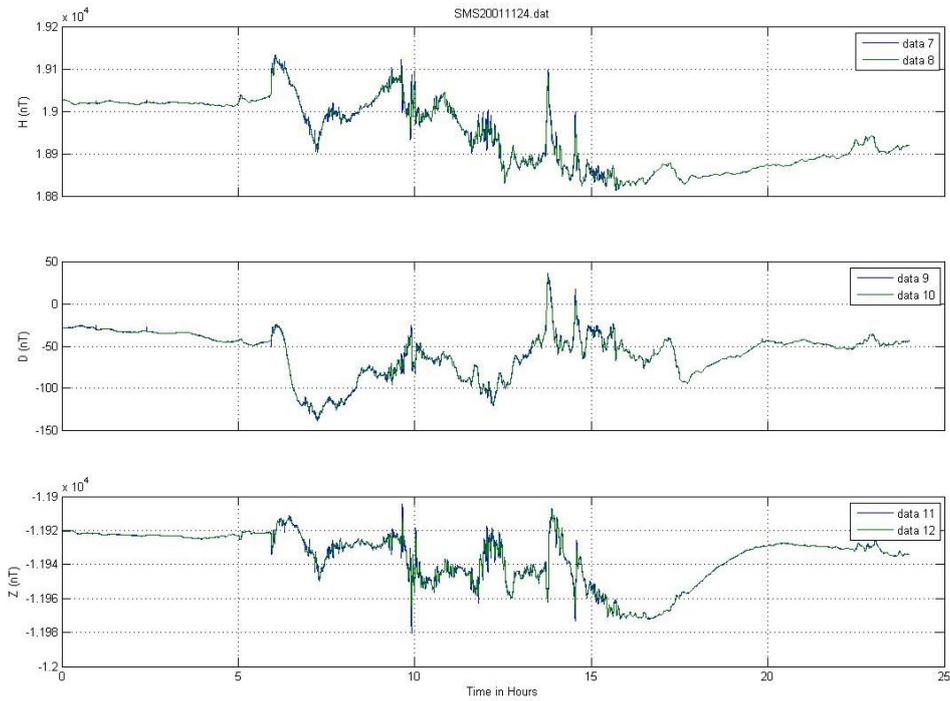
**Figura 5.16: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 06/11/2001.**



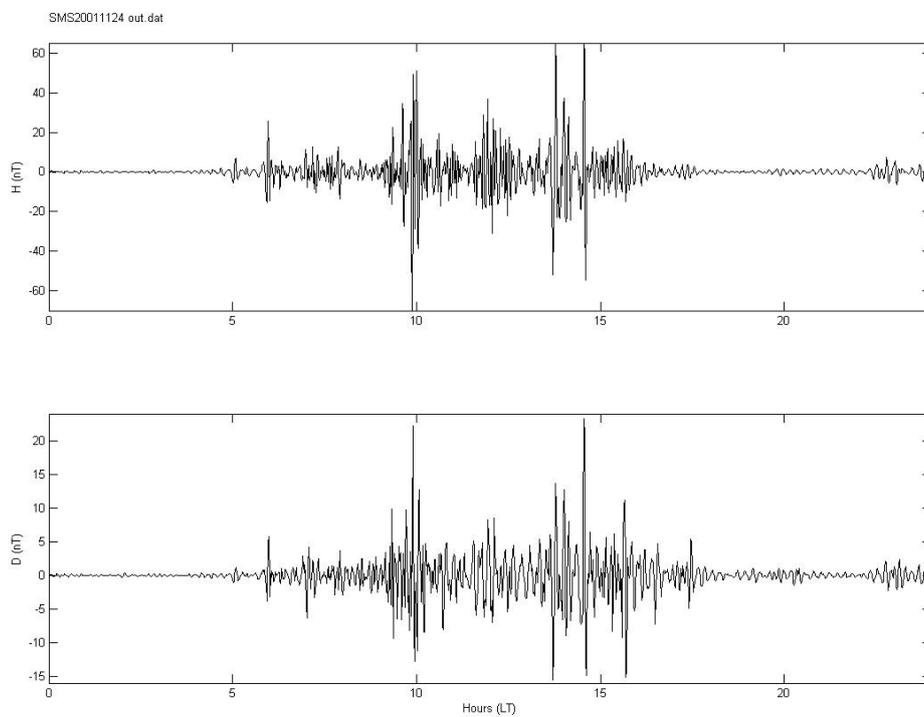
**Figura 5.17: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 22/10/2001.**



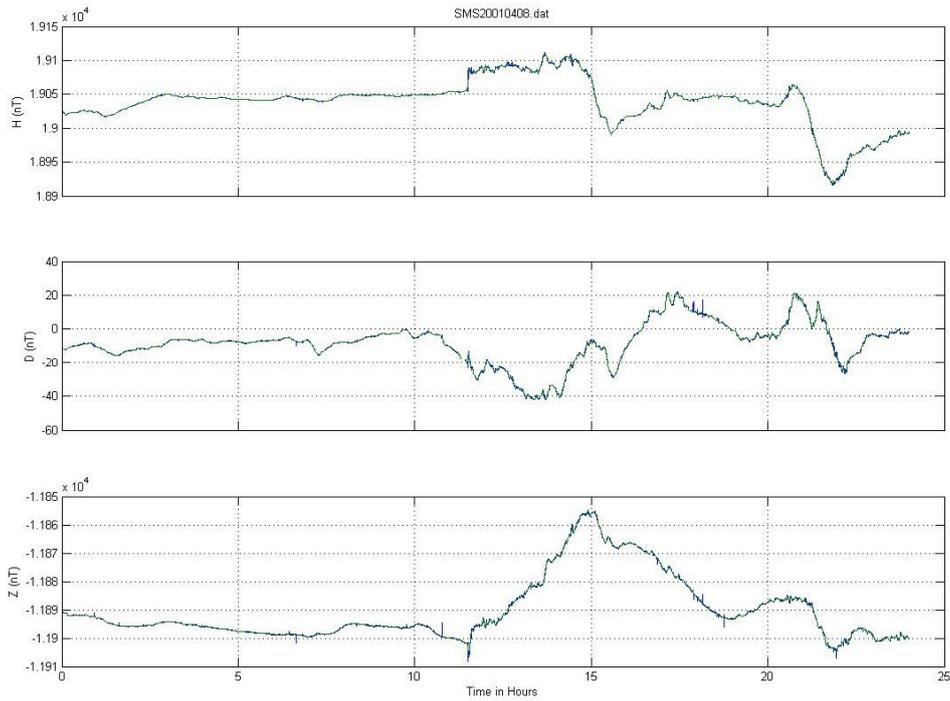
**Figura 5.18: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 22/10/2001.**



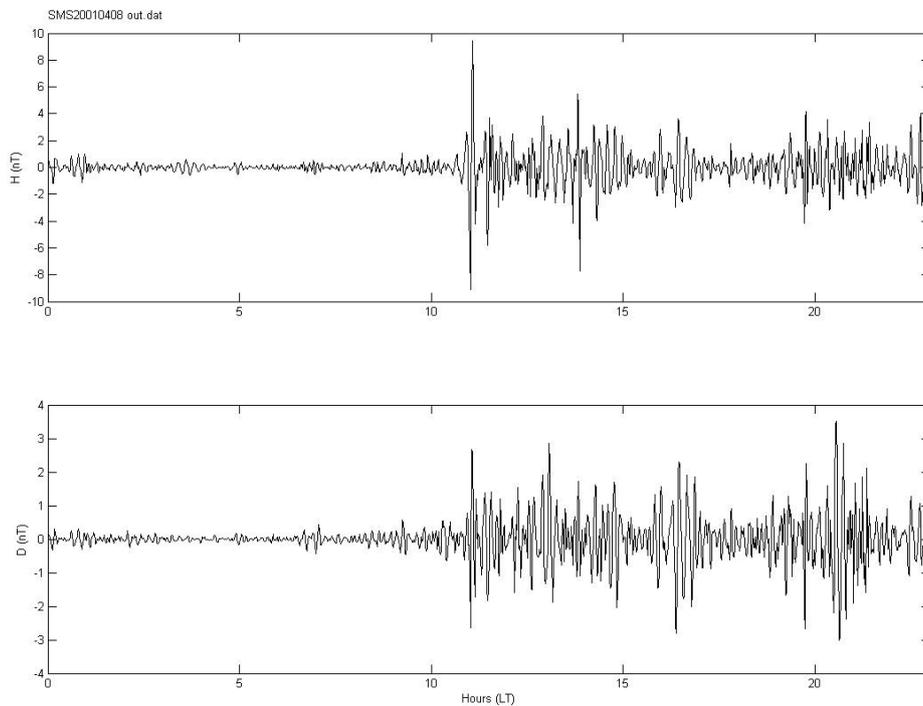
**Figura 5.19: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 24/11/2001.**



**Figura 5.20: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 24/11/2001.**



**Figura 5.21: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 08/04/2001.**



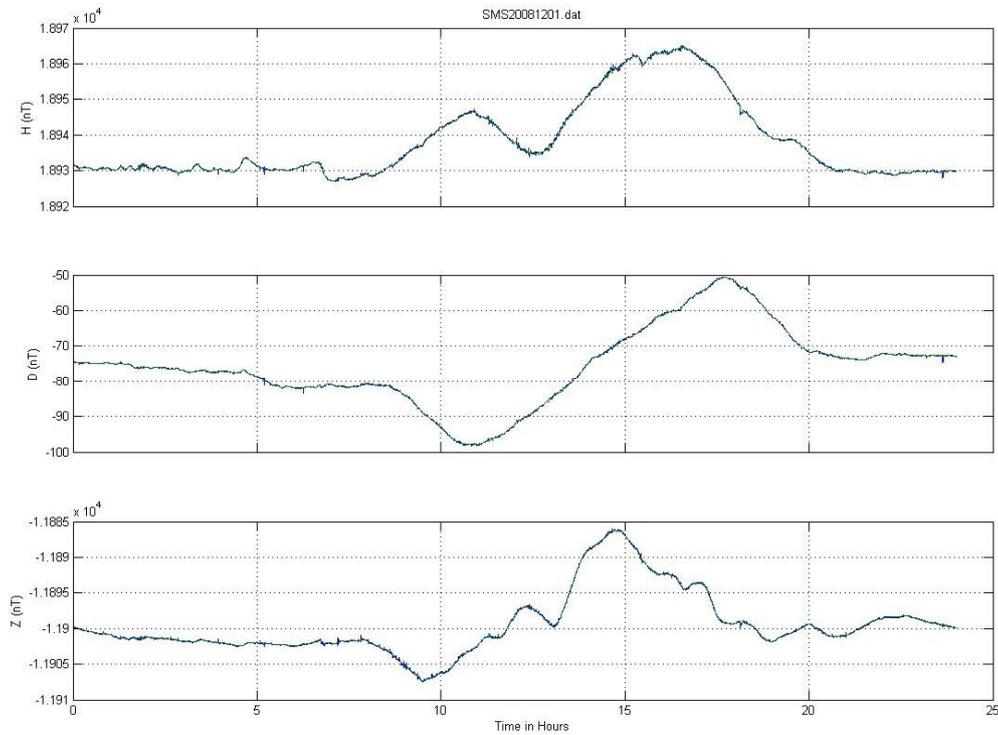
**Figura 5.22: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 08/04/2001.**

## 5.2.2 Processamento dos Dias Escolhidos para a Fase do Mínimo Solar

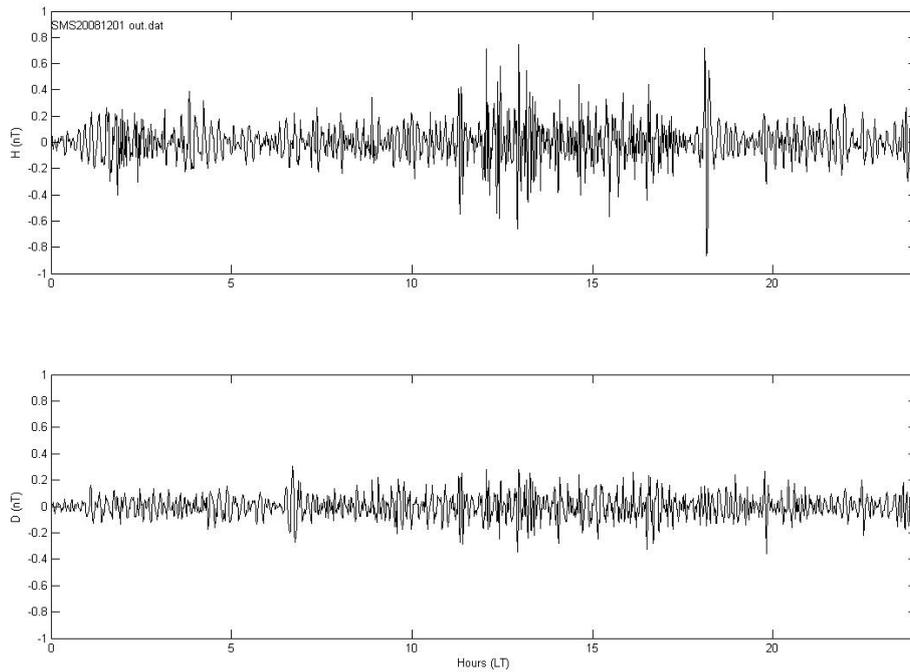
São apresentados os dados processados para os cinco dias calmos e cinco dias perturbados da fase do mínimo solar.

### 5.2.2.1 Processamento dos Dias Calmos da Fase do Mínimo Solar

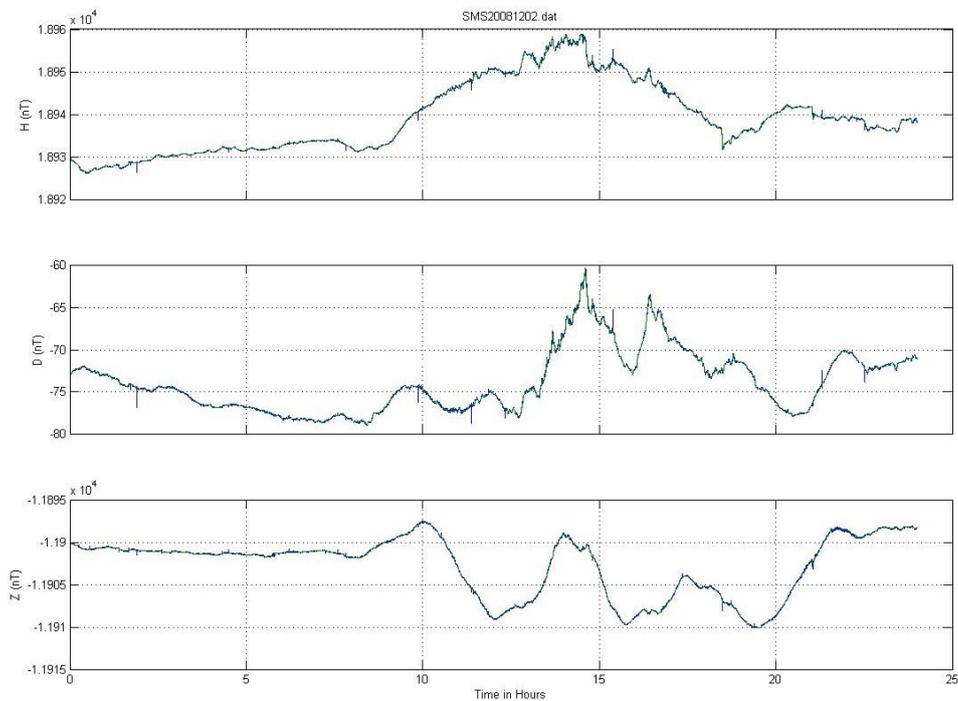
Os dados processados dos dias calmos do mínimo solar (Cm) são apresentados nas figuras: de 5.23 a 5.32, (ver tabela 5.3).



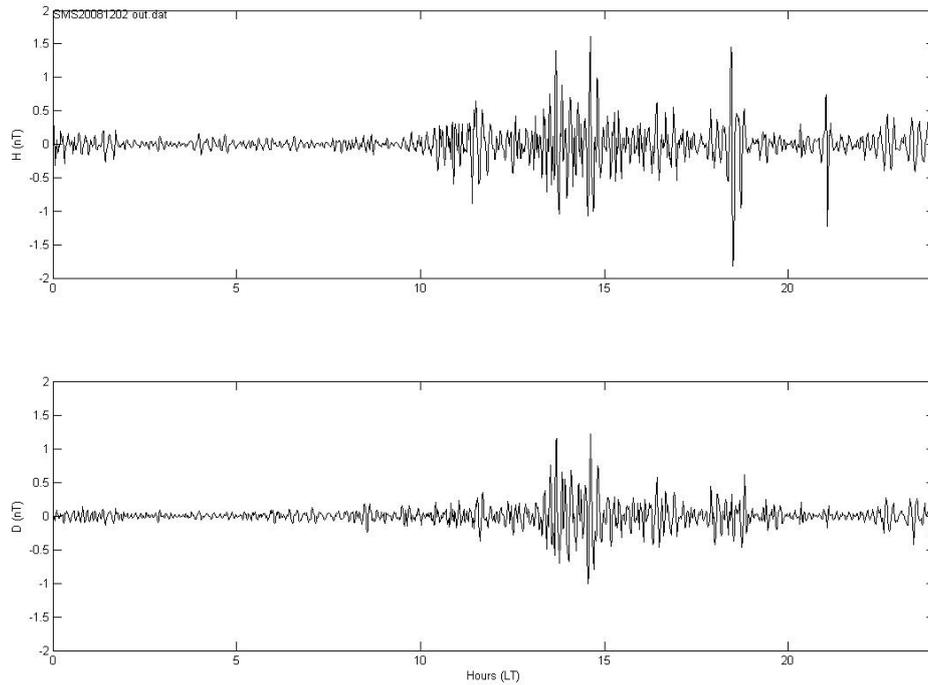
**Figura 7: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 01/12/2008.**



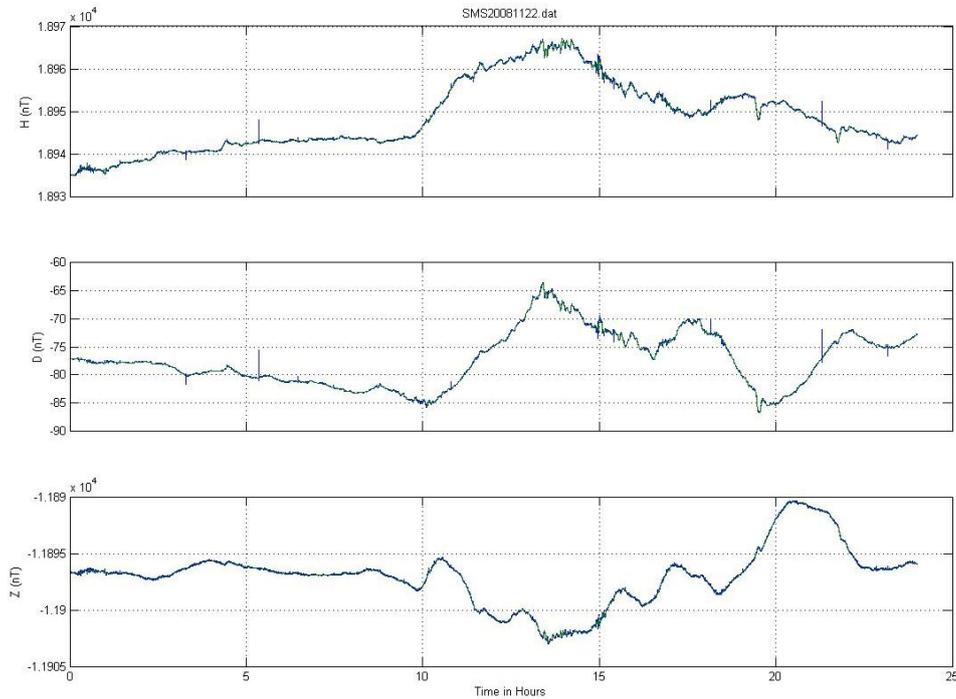
**Figura 5.24: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 01/12/2008.**



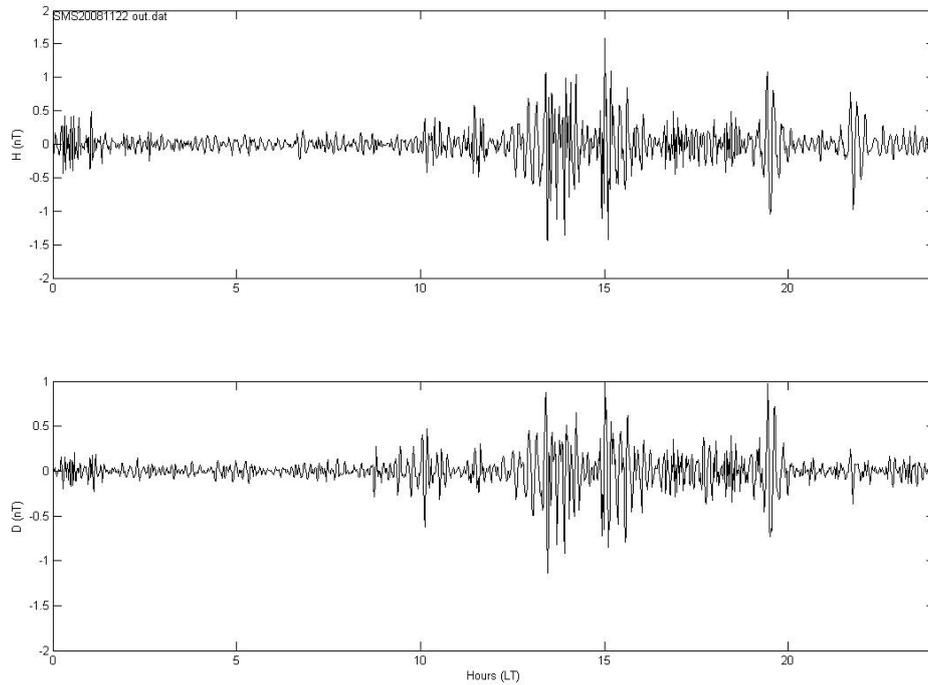
**Figura 5.25: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 02/12/2008**



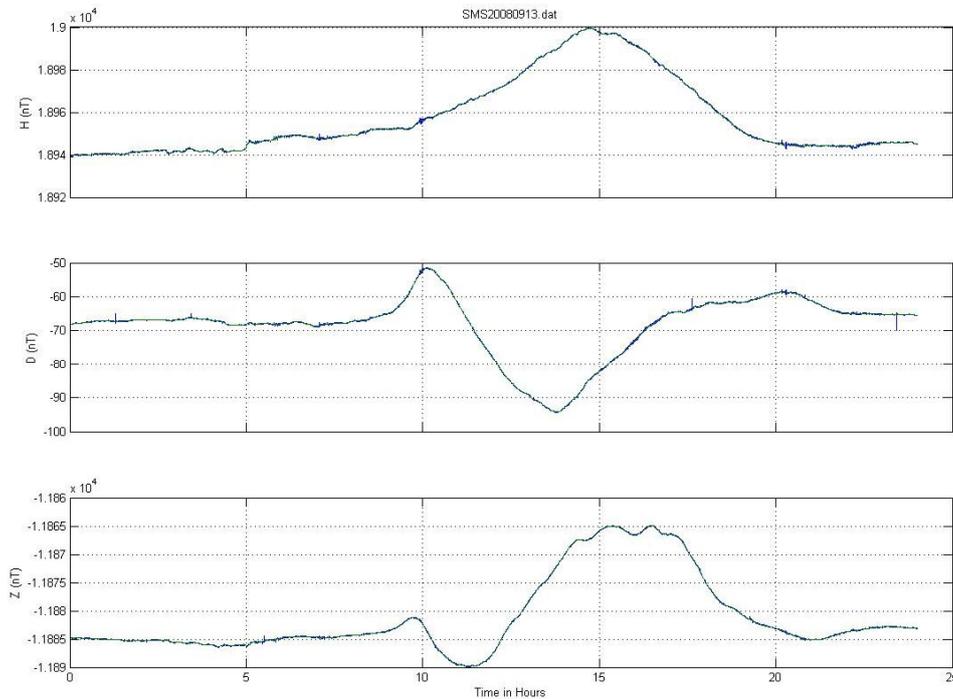
**Figura 5.26: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 02/12/2008.**



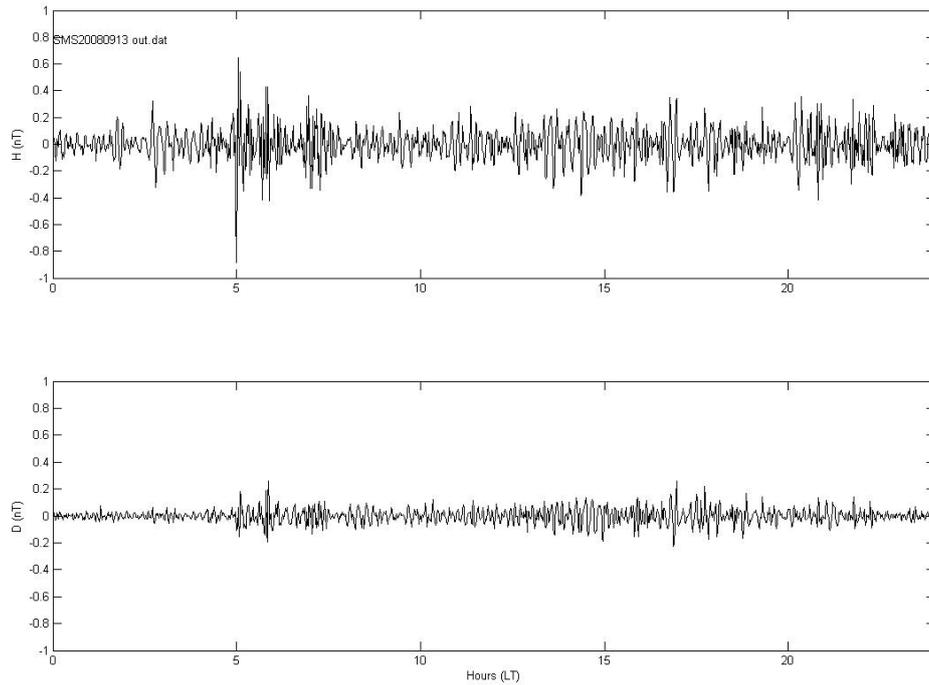
**Figura 5.27: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 22/11/2008.**



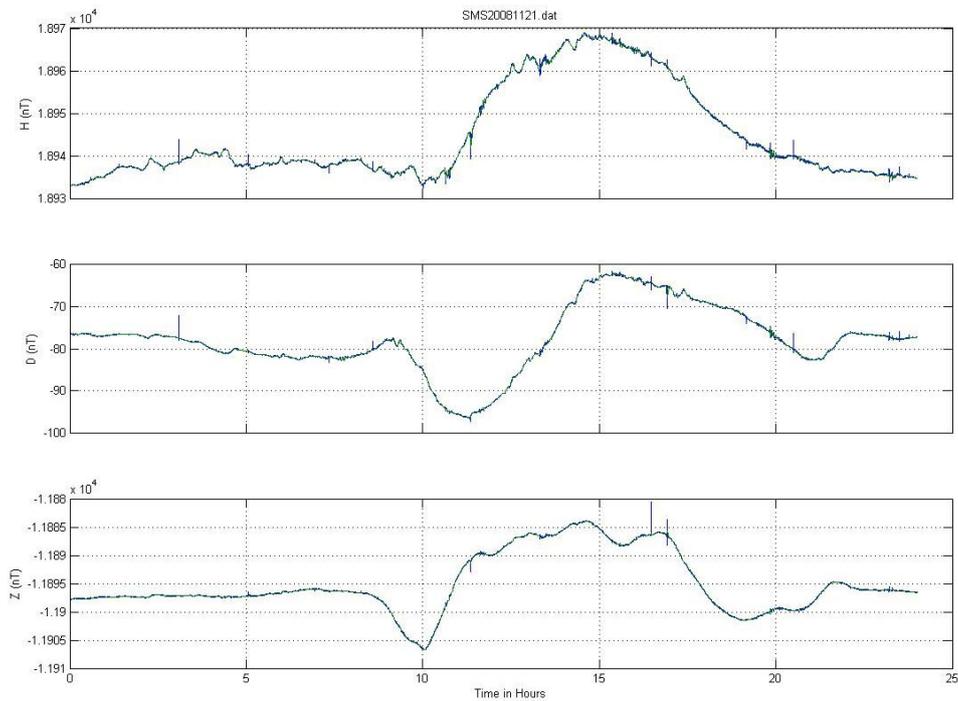
**Figura 5.28: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 22/11/2008.**



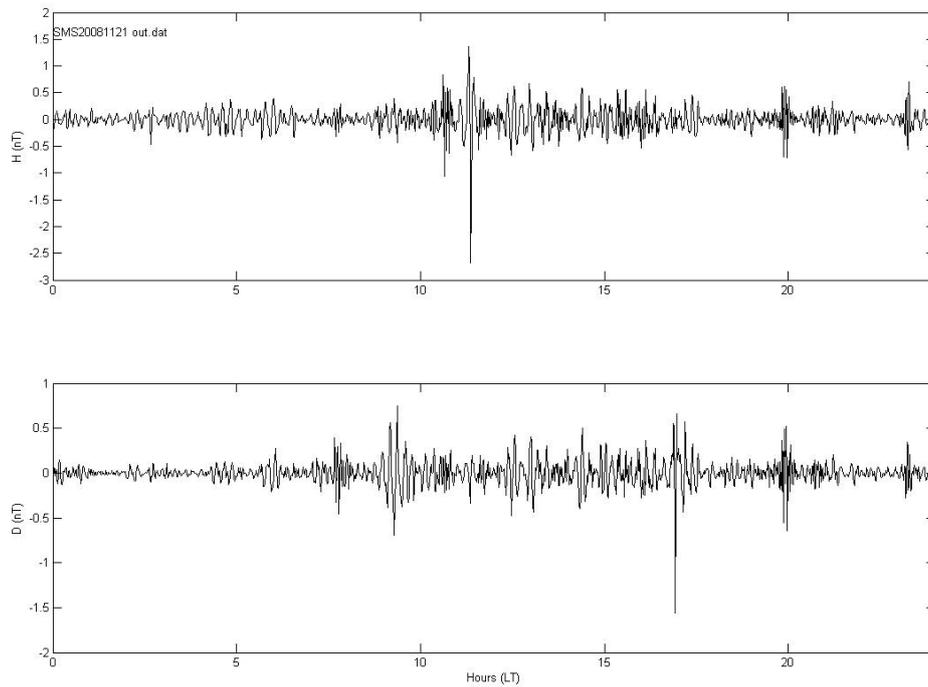
**Figura 5.29: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 13/09/2008.**



**Figura 5.30: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 13/09/2008.**



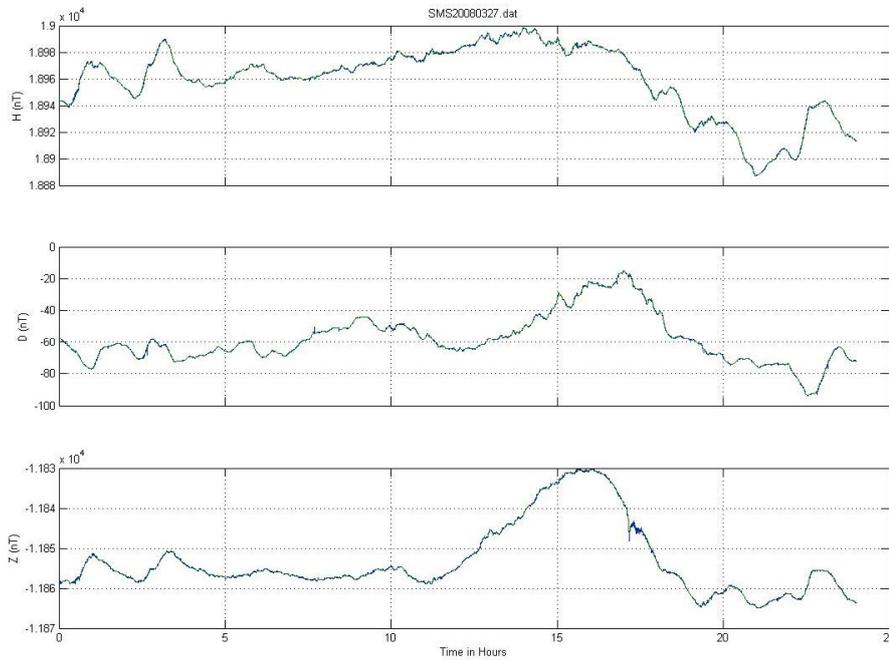
**Figura 5.31: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 21/11/2008.**



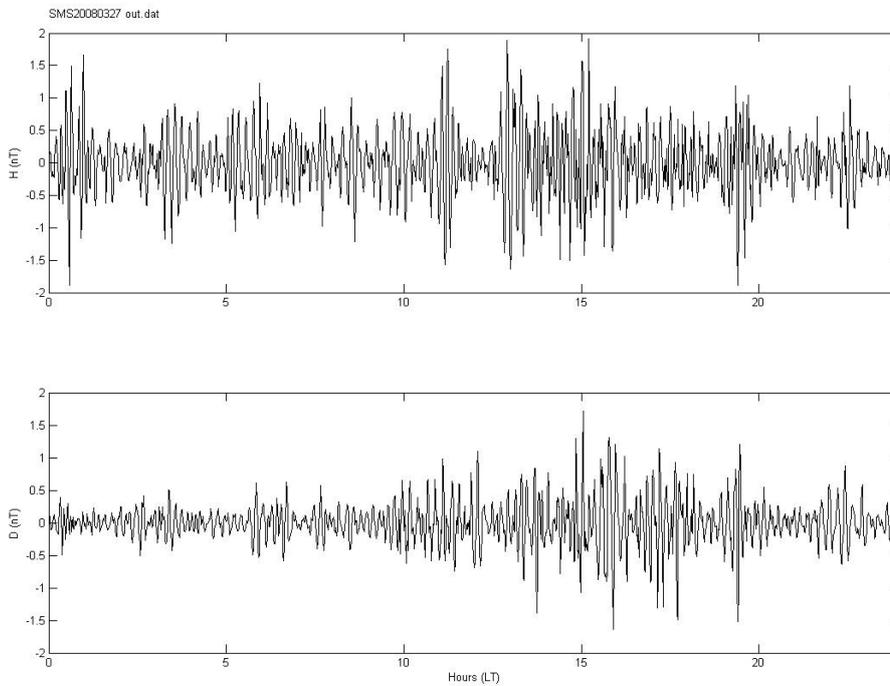
**Figura 5.32: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 21/11/2008.**

### 5.2.2.2 Processamento dos Dias Perturbados da Fase do Mínimo Solar

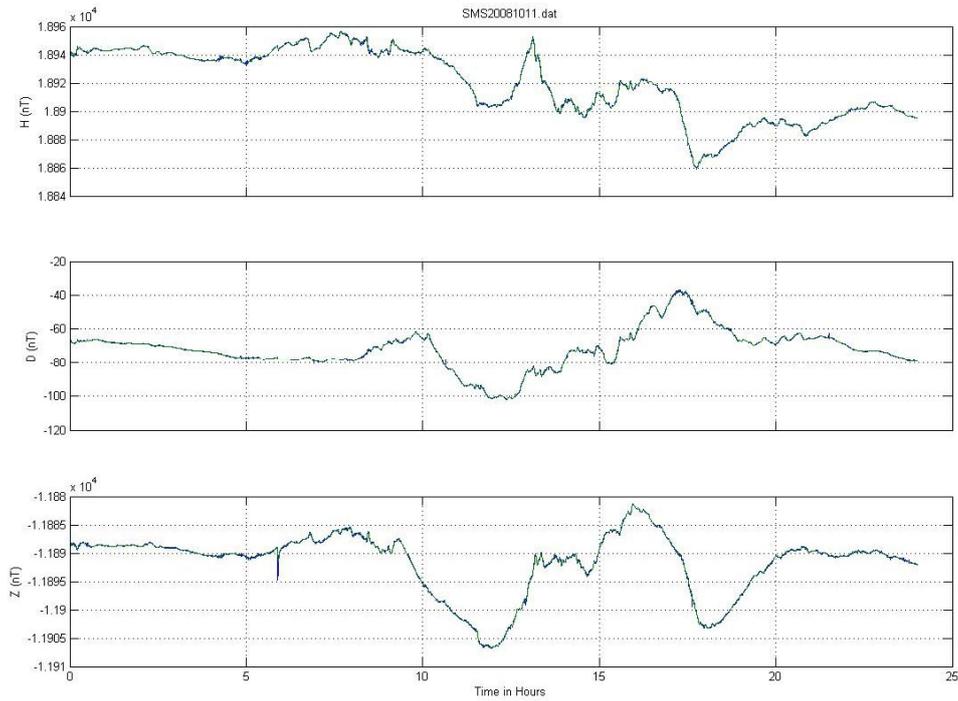
Os dados processados dos dias perturbados do mínimo solar (Pm) são apresentados nas figuras: de 5.33 a 5.42, (ver tabela 5.4).



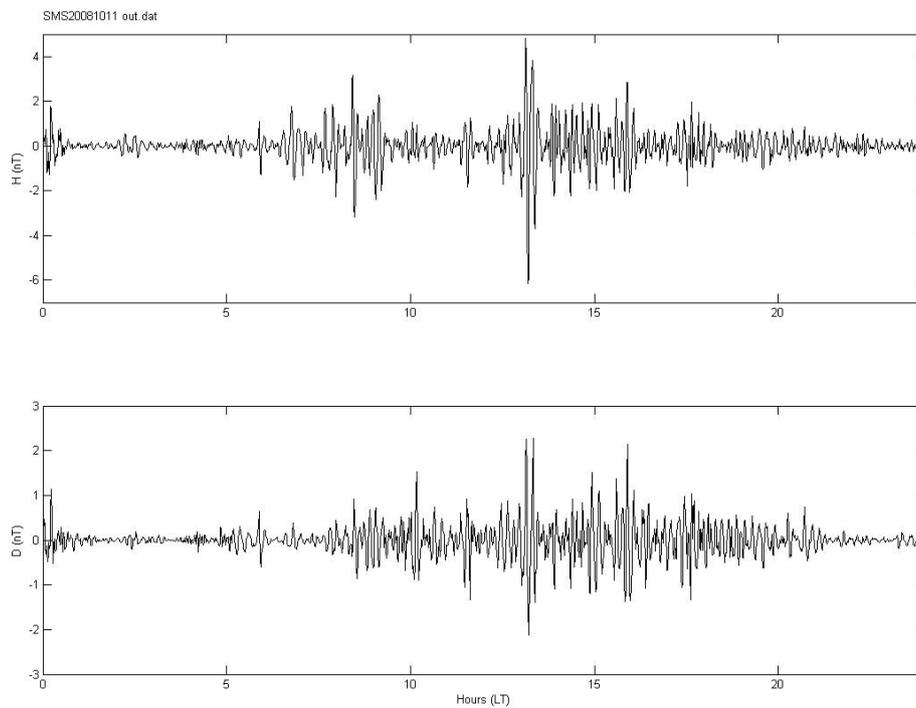
**Figura 5.33: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 27/03/2008.**



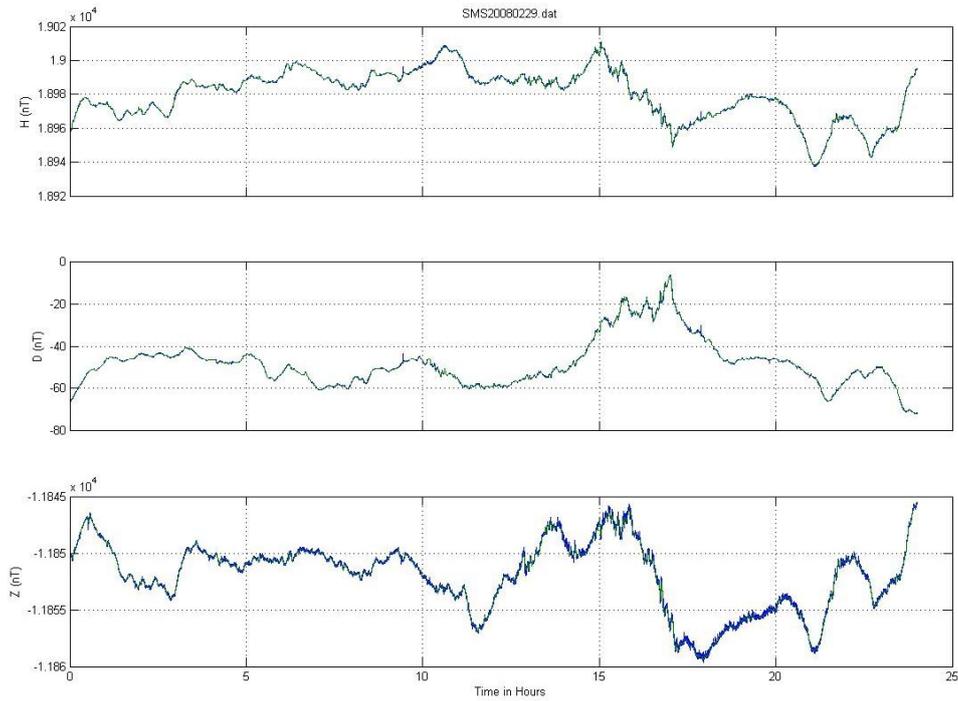
**Figura 5.34: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 27/03/2008.**



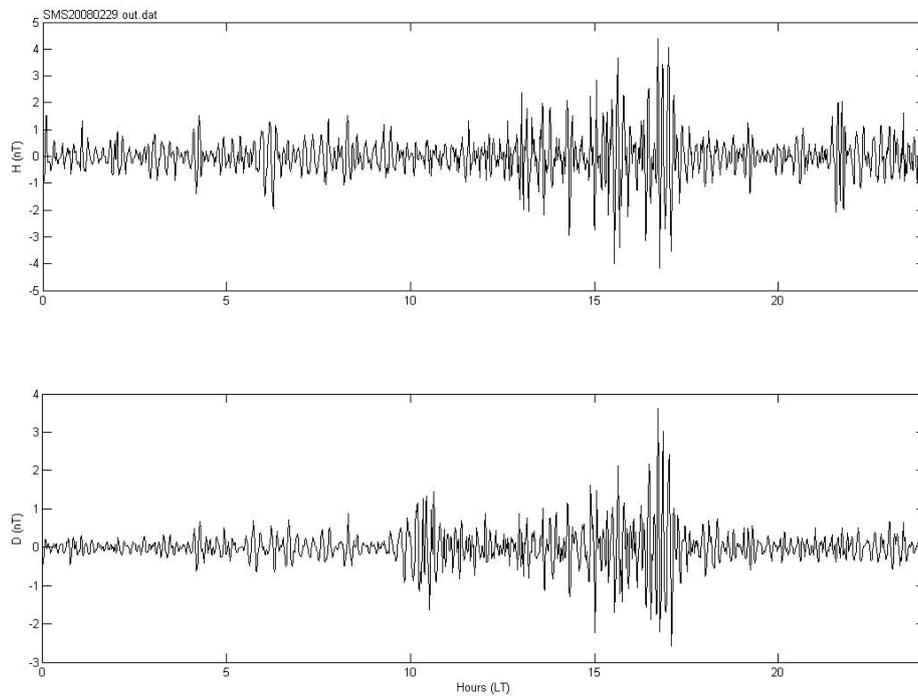
**Figura 5.35: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 11/10/2008.**



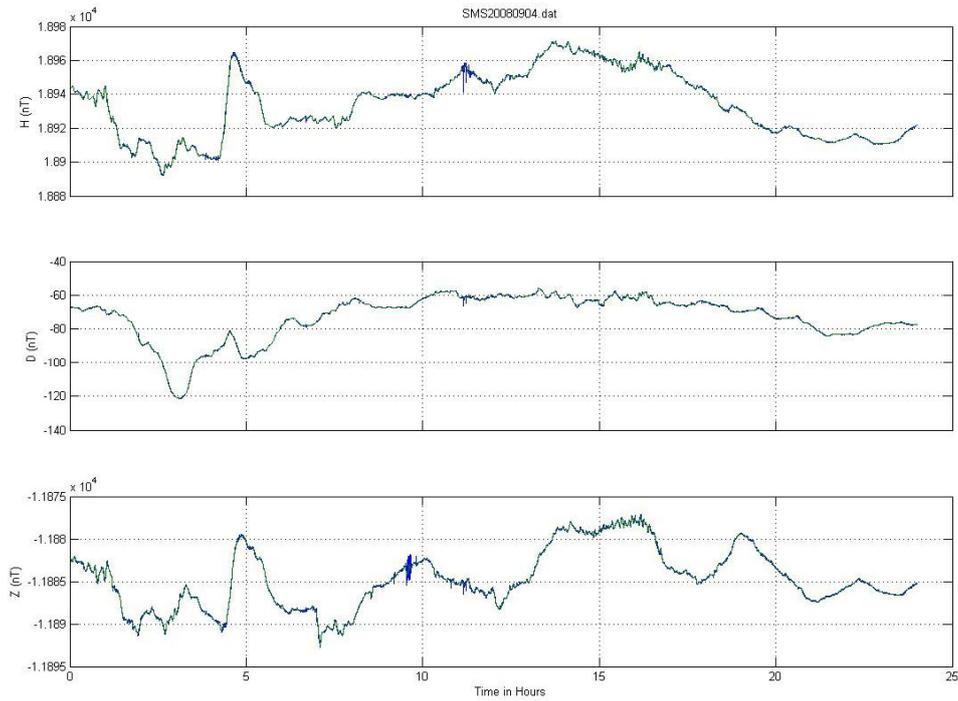
**Figura 5.36: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 11/10/2008.**



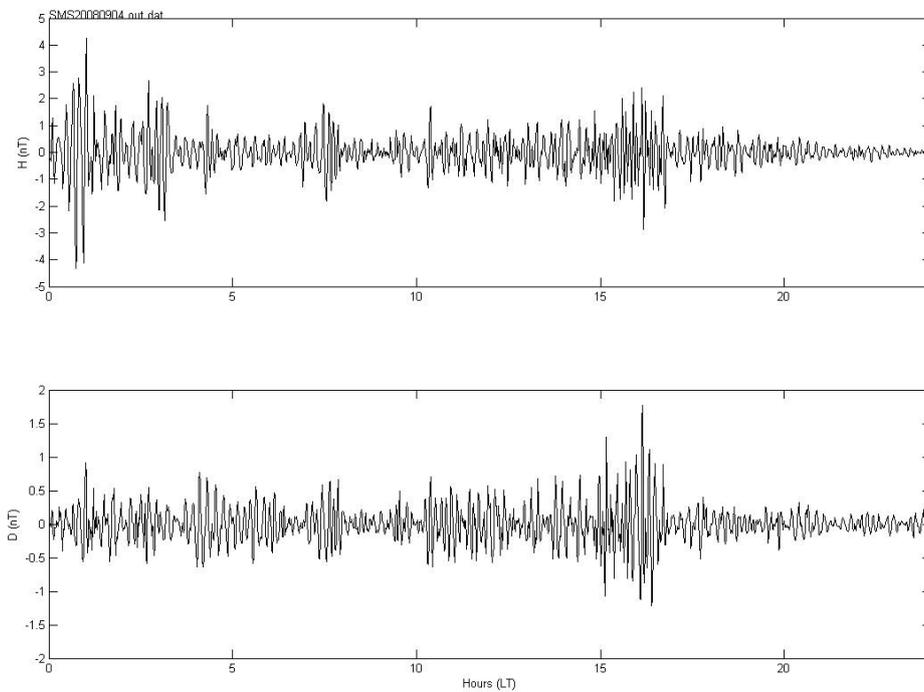
**Figura 5.37: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnéticos. SMS – 29/02/2008.**



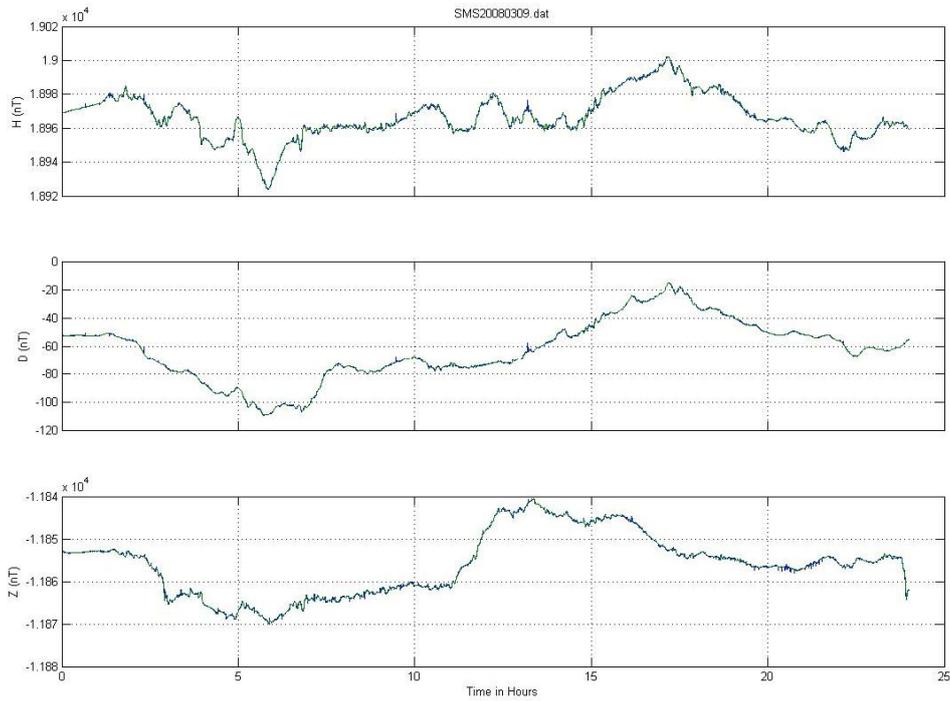
**Figura 5.38: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 29/02/2008.**



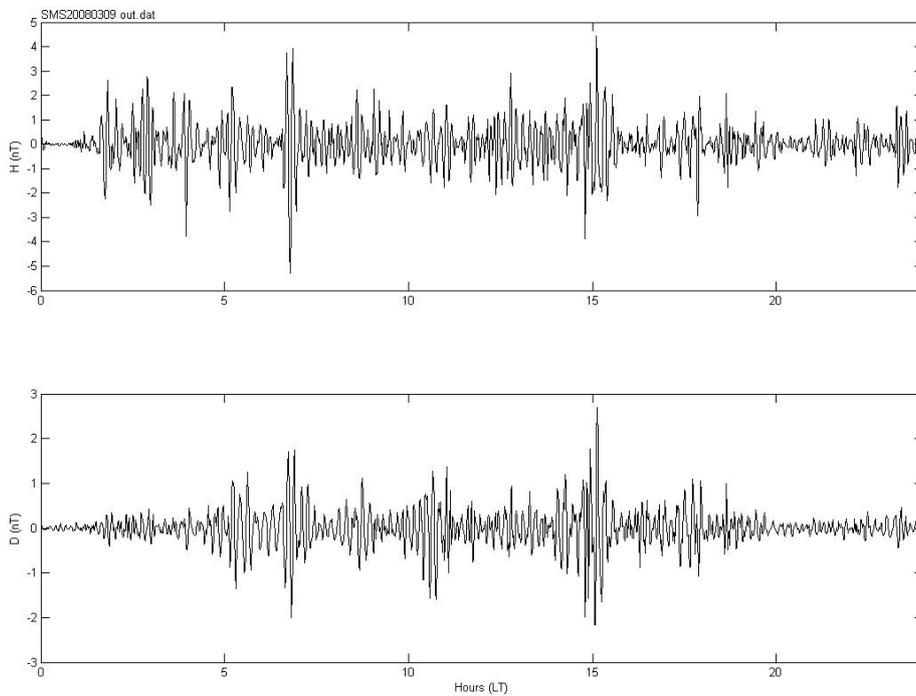
**Figura 5.39: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 04/09/2008.**



**Figura 5.40: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 04/09/2008.**



**Figura 5.41: Variação diária da intensidade das 3 componentes vetoriais do campo geomagnético. SMS – 09/03/2008.**



**Figura 5.42: Intensidade das Pulsações Pc-5 nas componentes H e D do campo geomagnético. SMS – 09/03/2008.**

### 5.3. Análise do Processamento dos Dados

Através do processamento dos dados da variação das intensidades das componentes vetoriais ortogonais **H**, **D** e **Z** do campo geomagnético, para dias calmos e perturbados de diferentes fases do ciclo solar, na região da AMAS, podemos identificar algumas características. Com as informações obtidas no processamento, podemos fazer comparações entre as intensidades e ocorrências de pulsações Pc-5 entre dias calmos da fase de máximo e de mínimo solar (CM – Cm), entre dias perturbados da fase de máximo e mínimo solar (PM – Pm) e comparações cruzadas entre dias calmos e perturbados de diferentes fases (PM – CM, Pm – Cm, PM – Cm, Pm – CM). Para análises de comparação é melhor usar a faixa pico-a-pico (*range*) do que os valores de máximo e mínimo, são usados os valores médios. É esperado que a maior diferença entre estas comparações aconteça com a análise dos dias perturbados do máximo solar com os dias calmos do mínimo (PM – Cm).

É importante notar que nos gráficos da variação diária das intensidades para as três componentes vetoriais do campo geomagnético **H**, **D** e **Z**, por uma convenção do programa em linguagem *Matlab* utilizado, a componente vetorial **Z** tem seu valor invertido. Pois no hemisfério norte, por convenção, a componente **Z** tem valores positivos, pois o campo tem sentido de “cima para baixo”. Na região da AMAS onde o estudo foi realizado, no hemisfério sul, o campo tem sentido negativo por convenção, pois o campo tem sentido “de baixo para cima”. Portanto os valores da variação da componente **Z** apresentados nos gráficos de intensidades das três componentes do campo geomagnético tem o sinal invertido.

Utilizando o valor pico-a-pico (*range*) das variações diárias das intensidades das componentes **H** e **D** e das variações das intensidades das pulsações contínuas Pc-5 nas componentes **H** e **D** de cada dia escolhido para a análise, podemos comparar quais dias (calmos ou perturbados) e qual fase do ciclo solar (máximo ou mínimo solar) teve maior variação diária e/ou ocorrência de pulsações Pc-5, os valores se encontram nas tabelas: 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8.

**Tabela 5.5: Variação diária e amplitude filtrada para dias calmos no máximo solar (CM).**

Data	Variação diária		Pulsações	
	H (nT)	D (nt)	H (nT)	D (nT)
4/fev	51,98	33,55	1,97	3,06
28/jun	37,03	30,98	1,23	0,80
31/mai	50,28	35,07	1,35	1,36
1/jan	60,57	60,40	1,32	1,33
28/jul	49,42	25,89	2,14	1,89
Média	49,86	37,18	1,60	1,69

**Tabela 5.6: Variação diária e amplitude filtrada para dias calmos no mínimo solar (Cm).**

Data	Variação diária		Pulsações	
	H (nT)	D (nt)	H (nT)	D (nT)
1/dez	38,15	47,62	1,60	0,66
2/dez	32,58	18,46	3,44	2,21
22/nov	32,16	23,01	3,02	2,11
13/set	60,58	42,79	1,53	0,48
21/nov	36,22	34,44	4,03	2,30
Média	39,94	33,26	2,72	1,55

**Tabela 5.7: Variação diária e amplitude filtrada para dias perturbados no máximo solar (PM).**

Data	Variação diária		Pulsações	
	H (nT)	D (nt)	H (nT)	D (nT)
31/mar	455,72	282,60	82,94	19,58
6/nov	399,73	259,27	119,77	21,28
22/out	261,10	161,95	36,03	16,78
24/nov	318,40	175,18	134,45	38,84
8/abr	195,02	63,92	18,55	6,52
Média	325,99	188,58	78,35	20,60

**Tabela 5.8: Variação diária e amplitude filtrada para dias perturbados no mínimo solar (Pm).**

Data	Variação diária		Pulsações	
	H (nT)	D (nt)	H (nT)	D (nT)
27/mar	110,87	78,70	3,80	3,35
11/out	96,65	64,50	10,97	4,40
29/fev	72,02	65,64	8,55	6,19
04/set	78,76	65,64	8,57	2,97
9/mar	78,04	94,40	9,72	4,86
Média	87,26	73,77	8,32	4,35

### 5.3.1 Comparação CM – Cm

A análise dos gráficos das seções 5.2.1.1 e 5.2.2.1 da variação diária das intensidades das 3 componentes vetoriais dos dias calmos do máximo e mínimo solar (CM – Cm) pode-se notar que basicamente todos os dias obedecem a um padrão natural de um dia geomagneticamente calmo, a componente **H** sobe enquanto as componentes **D** e **Z** decrescem.

Com a comparação entre os dias calmos do máximo e mínimo solar, através das tabelas 5.5 e 5.6, é de se esperar que a variação diária Sq diminua do período do máximo até o período do mínimo solar. Confirmamos isto com os dados obtidos, pois na componente **H** o valor vai de 48,86nT até 39,94nT. Portanto na região da AMAS a variação diária Sq diminui do período do máximo solar até o período do mínimo solar.

Analisando a ocorrência de pulsações contínuas Pc-5 nota-se que na fase do máximo solar elas ocorrem na componente **H** com variação no valor de 1,60nT e na fase do mínimo solar no valor de 2,72nT. Em geral as pulsações Pc-5 ocorridas nos dias geomagneticamente calmos do mínimo solar tem uma variação mais intensa do que as ocorridas durante a fase do máximo solar.

### 5.3.2 Comparação PM – Pm

A análise dos gráficos das seções 5.2.1.2 e 5.2.2.2 da variação diária das intensidades das 3 componentes vetoriais dos dias perturbados do máximo e mínimo solar (PM – Pm), pode-se notar que cada dia perturbado tem sua característica única, não obedecendo padrões, visto que dependem de alguns fatores como velocidade e intensidade do vento solar ao interagir com o campo geomagnético.

Com a comparação entre os dias perturbados do máximo e mínimo solar, através das tabelas 5.7 e 5.8, nota-se que a variação diária dos dias perturbados (SD) do período do máximo solar é consideravelmente maior do que a do período do mínimo solar. Vemos isto com os valores dos dados na componente **H**, o valor vai de 325,99nT até 87,26nT. Portanto, na região da AMAS a variação diária SD diminui do período do máximo solar até o período do mínimo solar.

Analisando a ocorrência de pulsações contínuas Pc-5 nota-se que na fase do máximo solar elas ocorrem na componente **H** com variação no valor de 78,35nT e na fase do mínimo solar no valor de 8,32nT. As pulsações Pc-5 ocorridas nos dias geomagneticamente perturbados do máximo solar tem uma variação consideravelmente mais intensa do que as ocorridas durante a fase do mínimo solar.

### **5.3.3 Comparação PM – CM e Pm – Cm**

Com a comparação entre os dias perturbados e calmos do máximo solar e entre os dias perturbados e calmos do mínimo solar, através das tabelas 5.7/5.5 e 5.8/5.6 respectivamente (PM – CM e Pm – Cm), notamos que para as duas fases que os dias perturbados tem um valor mais alto da variação diária do que os dias calmos. Sendo que a diferença na variação entre os dias perturbados e calmos do máximo solar é consideravelmente maior do que a diferença entre os dias perturbados e calmos da fase do mínimo solar.

Analisando a ocorrência de pulsações contínuas Pc-5 nota-se a mesma característica apresentada com a análise da variação diária das intensidades das componentes, com a diferença consideravelmente maior entre os dias perturbados e calmos do máximo solar. Sendo a diferença PM – CM das pulsações Pc-5 a maior encontrada de todas as comparações.

### **5.3.4 Comparação PM – Cm e Pm – CM**

Com a comparação entre os dias perturbados do máximo solar com os dias calmos do mínimo solar e dos dias perturbados do mínimo solar com os dias calmos do máximo solar, através das tabelas 5.7/5.6 e 5.8/5.5 respectivamente (PM – Cm e Pm – CM), notamos que para as duas fases que os dias perturbados tem um valor mais alto da variação diária do que os dias calmos. Sendo que a diferença na variação entre os dias perturbados do máximo solar com os dias calmos do mínimo solar é consideravelmente maior do que a diferença entre os dias perturbados do mínimo solar com os dias calmos



da fase do máximo solar. A diferença da variação diária  $PM - Cm$  é a maior diferença encontrada de todas as comparações, era esperado que isto acontecesse.

Analisando a ocorrência de pulsações contínuas Pc-5 nota-se a mesma característica apresentada com a análise da variação diária das intensidades das componentes, com a diferença consideravelmente maior entre os dias perturbados do máximo com os dias calmos do mínimo solar. Porém, a diferença  $Pm - CM$  é maior do que a encontrada em  $Pm - Cm$ .

## CAPÍTULO 6

### 6.1. Conclusões

Com o término do Projeto de Pesquisa, do estudo preliminar das características das pulsações contínuas Pc-5 (2 – 7mHz) na região da AMAS em diferentes fases do ciclo solar, concluímos que a maior diferença entre as intensidades das variações das pulsações Pc-5 ocorrem entre os dias calmos do máximo solar com os dias perturbados do máximo solar e, a menor diferença ocorre entre os dias calmos do máximo solar com os dias calmos do mínimo solar. É visto que a intensidade na variação de pulsações de períodos longos (Pc-5) são diretamente ligadas ao período de maior atividade solar, a fase de máximo solar.

Todas as atividades de embasamento teórico em Geofísica Espacial e Geomagnetismo e a pesquisa, coleta de dados e processamento dos dados foram feitas no Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas e no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS /INPE – MCT. O estudo das pulsações de períodos longos fornece informações importantes de como a interação se desenvolve na região da magnetosfera e como o campo geomagnético atua em determinadas condições de clima espacial. As variações do campo magnético da Terra têm origens interna e externa ao planeta. A variação de caráter interno é denominada secular por comportar-se quase que estavelmente. A variação externa depende principalmente da atividade do Sol e pode apresentar escala temporal de dias, horas, minutos e segundos. Em período de maior atividade solar, caracterizado pelo máximo solar, têm-se perturbações maiores na intensidade do campo geomagnético. A Terra não possui em sua superfície um campo magnético de intensidade homogênea, apresentando assim várias regiões extremas (onde a variação espacial é nula), dentre as quais a única com menor intensidade é a Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Por consequência dessa menor intensidade o cinturão de radiação de Van Allen encontra-se ali em menores alturas, criando assim uma maior precipitação de partículas eletricamente carregadas provenientes do geoespaço e penetração de raios cósmicos. Assim sendo, esse maior fluxo de partículas eletricamente carregadas sobre a



região da AMAS acaba danificando satélites de todos os tipos, causando interferência em comunicações e oferecendo um grande risco a tripulações de veículos-espaciais.

Em casos extremos de tempestades geomagnéticas pode haver bloqueio total de comunicações de alta frequência (HF) no lado diurno inteiro da Terra, podendo se estender para o lado noturno. Perde-se a precisão de sinais de baixas frequências utilizados em navegação aérea e marítima, tornando insegura a navegação. Há danos sérios e inevitáveis de radiação para astronautas ao realizar atividades extra-veicular (AEV). Alto nível de radiação para pessoas em vôos de altas altitudes (aproximadamente 100 radiografias de raios-x). Sistemas elétricos em geral podem se colapsar (linhas de alta tensão, etc). A aurora poderá ser vista em latitudes muito baixas (Dutra, 2004). Portanto, faz-se importante o estudo e monitoramento da atividade geomagnética e da interação Terra – Sol para melhor compreendermos os fenômenos ocorridos na nossa atmosfera. Desenvolvendo e aperfeiçoando ao longo do tempo algum dispositivo ou método capaz de prever com uma relativa antecedência a ocorrência de uma tempestade geomagnética.

O próximo passo na pesquisa será fazer este mesmo tipo de estudo das características das pulsações de períodos longos em diferentes fases do ciclo solar mas fora da região da AMAS, em estações magnéticas como por exemplo a de Vassouras e de Kourou, e fazer uma nova comparação com as informações obtidas na AMAS, considerando outras fases do ciclo solar, como a fase ascendente e descendente do ciclo. É interessante um estudo relacionando a maior variação na intensidade das pulsações de períodos longos na AMAS com a velocidade do vento solar em determinados dias, com a pressão exercida pelo vento solar na magnetosfera, com tempestades geomagnéticas e com maior incidência de raios cósmicos na atmosfera da região da AMAS (partículas de múons por exemplo). Será considerado outras informações obtidas com o processamento dos dados dos dias escolhidos, informações como por exemplo parâmetros de polarização (com análise espectral), comportamento da densidade de potência polarizada e o grau de polarização.

## Referências

- [1] Amarante, J.A.A. Tópicos gerais sobre geomagnetismo e estudo sobre a ocorrência de micropulsações em São José dos Campos. Conselho Nacional de Pesquisas, São José dos Campos, SP, Brasil. Relatório Interno CNAE-LAFE-048, 1966.
- [2] Campbell, W.H. Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge University Press, 1997.
- [3] Dutra, S.L.G. Noções Básicas de Geomagnetismo. INPE, São José dos Campos, dezembro de 2004 (texto preliminar).
- [4] Jacobs, J.A.; Kato, Y.; Matsushita, S.; Troitskaya, V.A. Classification of Geomagnetic Micropulsations. Journal of Geophysical Research, **69**(1):180–181, Jan. 1964.
- [5] Pinto, O., Jr., Gonzalez, W.D. Anomalia magnética Brasileira. INPE, São José dos Campos, 1989.
- [6] Samson, J.C. Geomagnetic Pulsations and Plasma Waves in the Earth's Magnetosphere. In: Jacobs, J.A. ed., Geomagnetism, London, Academic Press, **4**:481–592, 1991.
- [8] Thomson, D. J. Spectrum Estimation and Harmonic Analysis. IEEE Proc., **70**(9):1055–1096, 1982.
- [9] Zanandrea, A. Estudo das Micropulsações Geomagnéticas em Latitudes Muito Baixas, no Brasil. INPE, São José dos Campos, 1998.
- [10] Zanandrea, A. Micropulsações Geomagnéticas em Santa Maria – RS. INPE, São José dos Campos, maio de 1994.
- [11] De Lucas, A., Estudo da Dinâmica da Corrente de Anel Durante a Fase Principal de Supertempestades Geomagnéticas, INPE, São José dos Campos, 2007.



## **ANEXOS**



## **ANEXOS 1 – Programas em Linguagem MATLAB**



Programa CONVNAROD1440.M

```
%reads Narod_Mag data GPS Timing 2 second sampling
%Writes two data files, one for 2 second data 43200 points a day and
% the other for one minute average data 1440 points a day
clear all

str_temp1 = input('Filename: ','s');
str_temp1 = sprintf('%s.dat',str_temp1);
data = load(str_temp1);

%t=data(:,1);
h = data(:,3);
d = data(:,4);
z = data(:,5);
n=length(h);
t=1:length(h)
t=t / length(h)*24;

str_temp = input('filename ( 2 sec): ','s');
fid = fopen(str_temp,'w');
for i=1:n
    fprintf(fid,'%6d \t %8.2f \t %8.2f \t %8.2f\n',i,h(i),d(i),z(i));
end
fclose(fid);

%-----
str_temp2=input('filename Output 1: ','s');
fileout1 = sprintf('%s.dat',str_temp2);
fid = fopen(fileout1,'w');
k = 1;

for i=1:30:(length(h)-29)
    i0 = i;
    i1 = i0+29;
    h1(k) = mean(h(i0:i1));
    d1(k) = mean(d(i0:i1));
    z1(k) = mean(z(i0:i1));
    t1(k) = mean(t(i0:i1));
    fprintf(fid,'%8d \t %8.3f \t %8.3f \t
%8.3f\n',k,h1(k),d1(k),z1(k));
    k = k+1;
end
fclose(fid);
%-----

figure(1)
ndim=3;
nn=1;

subplot(ndim,1,nn), plot(t,h,t1,h1);
ylabel('H (nT)');
grid on
title(str_temp1)
set(gca,'XTickLabel','');
nn=nn+1;
```



```
subplot(ndim,1,nn), plot(t,d,t1,d1);  
ylabel('D (nT)');  
grid on  
set(gca,'XTickLabel','');  
nn=nn+1;  
  
subplot(ndim,1,nn), plot(t,z,t1,z1)  
ylabel('Z (nT)');  
grid on  
nn=nn+1;  
  
xlabel('Time in Hours')  
a=['!rem grafico00.tif' str_temp1 '.tif']  
eval (a)
```



### Programa FIGMTM5.M

```
clear all
str_temp1 = input('Filename: ','s');
str_temp1 = sprintf('%s.dat',str_temp1);
data = load(str_temp1);
i1=input('inicio: ')
i2=input(' fim: ')
t=data(i1:i2,1)*60/3600;
xx=data(i1:i2,2);
yy=data(i1:i2,3);
zz=data(i1:i2,4);

N=length(xx);
d=60.0;
W=2;

%---filtragem dos dados-----
fl=1/900;
fh=1/180;
fs=1/60;
[x]=bandpass(xx',fs,fl,fh,8);
[y]=bandpass(yy',fs,fl,fh,8);
[z]=bandpass(zz',fs,fl,fh,8);
%-----

[E,VV]=dpss(N,W);
k=length(E(1,:));
for i=1:k,
    tapsum=0.0;
    tapsq=0.0;
    tapsum=sum(E(:,i));
    tapsq=sum((E(:,i)).^2);
    aa=sqrt(tapsq/N);
    E(:,i)=E(:,i)/aa;
end
[SX,c,wkx,skx]=mtm(x,W,'dap',.95,E,VV);
[SY,c,wky,sky]=mtm(y,W,'dap',.95,E,VV);
[SZ,c,wkz,skz]=mtm(z,W,'dap',.95,E,VV);
for i=1:length(SX)
    freq(i)=(i-1)/(2*(length(SX)-1)*d);
    mx=(skx(i,:))';
    my=(sky(i,:))';
%   mz=(skz(i,:))';
    m=[mx,my];
    [U,S,V]=svd(m);
    pxy(i)=V(2,1)/V(1,1);
    fxy(i)=atan2(imag(pxy(i)),real(pxy(i)))*180/pi;
    grau(i)=sqrt((S(1,1)-S(2,2))^2/(S(1,1)+S(2,2))^2)*100;
    psp(i)=S(1,1)-S(2,2);
    V(3,1)=0+0i;
    [elp(i),ang(i)]=POLAR(V(1,1),V(2,1),V(3,1));
end

figure
%   str_temp = sprintf('Filename: %s (%d:%d)',str_temp1);
```



```
tlim=[round(min(t)) round(max(t))];
xlim=[round(min(x)-0.5) round(max(x)+0.5)];
ylim=[round(min(y)-0.5) round(max(y)+0.5)];
subplot(2,1,1),plot(t,x,'k'),axis([tlim xlim]),ylabel('H (nT)'),
text(min(t),max(x)*1.2,str_temp1);
subplot(2,1,2),plot(t,y,'k'),axis([tlim ylim]),
xlabel('Hours (LT)'),ylabel('D (nT)')
hold off
per=1./freq;
figure
res=[per',psp',grau',elp',ang'];

xlim=[300 1000];
xticks=linspace(min(xlim),max(xlim),5);
subplot(2,2,1)
plot(per,psp,'k'),axis([xlim min(psp) max(psp)]),ylabel('PPD
(A^2/Hz)')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),1.05*max(psp),'(a)');
text(min(xlim)*1.5,1.05*max(psp),str_temp1);
hold off
subplot(2,2,2)
plot(per,grau,'k'),axis([xlim 0 110]),ylabel('Degree of Polarization')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),116,'(b)');
hold off
subplot(2,2,3),
plot(per,elp,'k'),axis([xlim -1 1]),xlabel('Period
(s)'),ylabel('Ellipticity'),
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),1.1,'(c)');
hold off
subplot(2,2,4)
plot(per,ang,'k'),axis([xlim -100 100]),xlabel('Period
(s)'),ylabel('Azimuth')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),110,'(d)');
hold off

%save d:\user\ademil\pola\res.dat res -ascii
```



## Programa FIGMTM6.M

```
clear all
str_temp1 = input('Filename: ','s');
str_temp1 = sprintf('%s.dat',str_temp1);
data = load(str_temp1);
%load oct11.dat
%data=oct11;
t=(data(:,1)-1)/60;
xx=data(:,2);
yy=data(:,3);
zz=data(:,4);
d=60.0;
N=length(xx);
W=2;
nc=128;
ovrlap=0.5;
%---filtragem dos dados-----
fl=1/900;
fh=1/180;
fs=1/d;
[x]=bandpass(xx',fs,fl,fh,8);
[y]=bandpass(yy',fs,fl,fh,8);
[z]=bandpass(zz',fs,fl,fh,8);
%-----

%t=((1:length(x))-1)*d;t=t';

nshift=min(nc,max(1,fix(nc*(1.-ovrlap)+.5)));
nsgmts=fix(1+(N-nc)/nshift);

for is=1:nsgmts,
    for nsamp=1:nc
        workx(nsamp,is)=0.0;
        worky(nsamp,is)=0.0;
        workz(nsamp,is)=0.0;
        workx(nsamp,is)=x(nshift*(is-1)+nsamp);
        worky(nsamp,is)=y(nshift*(is-1)+nsamp);
        workz(nsamp,is)=z(nshift*(is-1)+nsamp);
    end
end

[E,VV]=dpss(nc,W);
k=length(E(1,:));
for i=1:k,
    tapsum=0.0;
    tapsq=0.0;
    tapsum=sum(E(:,i));
    tapsq=sum((E(:,i)).^2);
    aa=sqrt(tapsq/nc);
    E(:,i)=E(:,i)/aa;
end

for is=1:nsgmts,
    [SX,c,wkx,skx]=mtm(workx(:,is),W,'dap',.95,E,VV);
    [SY,c,wky,sky]=mtm(worky(:,is),W,'dap',.95,E,VV);
    [SZ,c,wkz,skz]=mtm(workz(:,is),W,'dap',.95,E,VV);
```



```
for i=1:(length(SX))
    freq(i)=(i-1)/(2*(length(SX)-1)*d);
    mx=(skx(i,:))';
    my=(sky(i,:))';
%   mz=(skz(i,:))';
    m=[mx,my];
    [U,S,V]=svd(m);
    pxy(i)=V(2,1)/V(1,1);
    fxy(i)=atan2(imag(pxy(i)),real(pxy(i)))*180/pi;
    grau(i)=((S(1,1)-S(2,2))^2/(S(1,1)+S(2,2))^2)*100;
    psp(i)=S(1,1)-S(2,2);
    pspm(i,is)=psp(i);
    V(3,1)=0+0i;
    [elp(i),ang(i)]=POLAR(V(1,1),V(2,1),V(3,1));
    graum(i,is)=grau(i);
    elpm(i,is)=elp(i);
    angm(i,is)=ang(i);
    fxy(m(i,is))=fxy(i);
end
end

seg_start = ((0:nsgmts-1)*nshift)+1;
seg_med=seg_start+fix(nc/2);
tt = seg_med'*d;
tscale=((1:nsgmts)-1)/(nsgmts-1)*N*d/3600;
per=1./freq;
mif=1/1000;
maf=1/200;
xticks=[0:24];
xticks_label='0 | | 2 | | 4 | | 6 | | 8 | | 10 | | 12 | | 14 | | 16 |
| 18 | | 20 | | 22 | | 24';
yticks=1./[1000 600 400 200];
%yticks=1./[900 700 500 300];
yticks_label=1./yticks;

%---cores-----
escl=1-exp(-1*(1/10)*((1:8)-8).^2);
cor1= [escl' escl' escl'];
%-----

figure

%--- Plot time series
subplot(4,1,1)
plot(t,x,'k'),axis([round(min(t)) round(max(t)) min(x) max(x)])
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel','')
ylabel('H (nT)')
m1=get(gca,'Position');
text(round(min(t)),1.2*max(x),'(a)');
hold off

%--- Plot time series
subplot(4,1,2)
plot(t,y,'k'),axis([round(min(t)) round(max(t)) min(y) max(y)])
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel','')
ylabel('D (nT)')
m2=get(gca,'Position');
```



```
text(round(min(t)),1.2*max(y),'(b)');
hold off

%--- Contour plot wavelet power spectrum
subplot(4,1,3)
pcolor(tscale,freq,pspm),shading interp,colormap(cor1), colorbar
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel','')
set(gca,'YLim',[mif maf])
set(gca,'YTick',yticks,'YTickLabel',yticks_label)
set(gca,'TickDir','out')
set(gca,'YDir','reverse')
ylabel('Period (sec)')
m3=get(gca,'Position');
h=text(1.06*max(tscale),mif-(maf-mif)*0.15,'PPD (A^2/Hz)');
text(1.07*min(tscale),mif-(maf-mif)*0.1,'(c)');
hold off

%--- Contour plot wavelet power spectrum

subplot(4,1,4)
pcolor(tscale,freq,gram),shading interp,colormap(cor1),caxis([0
100]),colorbar
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel',xticks_label)
set(gca,'YLim',[mif maf])
set(gca,'YTick',yticks,'YTickLabel',yticks_label)
set(gca,'TickDir','out')
set(gca,'YDir','reverse')
xlabel('Hours (LT)')
ylabel('Period (sec)')
m4=get(gca,'Position');
h=text(1.06*max(tscale),mif-(maf-mif)*0.15,'DEG (%)');
text(1.07*min(tscale),mif-(maf-mif)*0.1,'(d)');
hold off

subplot(4,1,1),
set(gca,'Position',[m1(1) m1(2) m3(3) m1(4)]);
subplot(4,1,2),
set(gca,'Position',[m2(1) m2(2) m3(3) m2(4)]);

%---cores-----
esc2=1-exp(-1*(1/10)*((1:8)-8).^2);
cor2=[esc2' esc2' esc2'];
%-----

figure
subplot(3,1,1)
pcolor(tscale,freq,elpm),shading interp; colormap(cor2),colorbar
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel','')
set(gca,'YLim',[mif maf])
set(gca,'YTick',yticks,'YTickLabel',yticks_label)
set(gca,'TickDir','out')
set(gca,'YDir','reverse')
ylabel('Period (sec)')
h=text(1.06*max(tscale),mif-(maf-mif)*0.12,'Ellipticity');
text(1.07*min(tscale),mif-(maf-mif)*0.1,'(a)');
hold off
```



```
subplot(3,1,2)
pcolor(tscale,freq,angm),shading interp; colormap(cor2),colorbar
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel','')
set(gca,'YLim',[mif maf])
set(gca,'YTick',yticks,'YTickLabel',yticks_label)
set(gca,'TickDir','out')
set(gca,'YDir','reverse')
ylabel('Period (sec)')
h=text(1.06*max(tscale),mif-(maf-mif)*0.12,'Azimuth (^o)');
text(1.07*min(tscale),mif-(maf-mif)*0.1,'(b)');
hold off
```

```
subplot(3,1,3)
pcolor(tscale,freq,fxym),shading interp;
colormap(cor2),colorbar,caxis([0 1])
set(gca,'XTick',xticks,'XTickLabel',xticks_label)
set(gca,'YLim',[mif maf])
set(gca,'YTick',yticks,'YTickLabel',yticks_label)
set(gca,'TickDir','out')
set(gca,'YDir','reverse')
xlabel('Hours (LT)')
ylabel('Period (sec)')
h=text(1.06*max(tscale),mif-(maf-mif)*0.12,'Phase (^o)');
text(1.07*min(tscale),mif-(maf-mif)*0.1,'(c)');
hold off
```

```
%save d:\user\ademil\data\simula.dat simula -ascii
%save d:\user\ademil\pola\psp\simula.dat pspm -ascii
%save d:\user\ademil\pola\grau\simula.dat graum -ascii
%save d:\user\ademil\pola\elipse\simula.dat elpm -ascii
%save d:\user\ademil\pola\angulo\simula.dat angm -ascii
%save d:\user\ademil\pola\fase\simula.dat fxym -ascii
```



## **ANEXOS 2 – Certificados de Participação em Eventos**

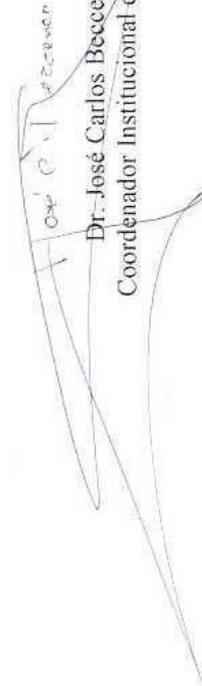


MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

### PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - PIBIC/INPE/CNPq

Conferimos o presente Certificado a **WILLIAN RIGON SILVA** por sua participação no Seminário de Iniciação Científica do INPE-SICINPE, realizado em São José dos Campos-SP, nos dias 15 e 16 de julho de 2008 e apresentação do trabalho intitulado: "VARIACÃO COM O CICLO SOLAR DAS PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS DE PERÍODOS LONGOS (1.0 – 10 mHz) NA REGIÃO DA ANOMALIAMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL – AMAS", orientado pelo(a) Prof(a). Severino Luiz Guimarães Dutra.

São José dos Campos, 16 de julho de 2008.



Dr. José Carlos Becceneri  
Coordenador Institucional do PIBIC

