



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 201144/2006-0

**Fagner Chagas Rother (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)**

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

**Elias Fernando Berra (UFSM, Bolsista substituído)**

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

**Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra (DGE/INPE-MCT, Orientador)**

**E-mail: [dutra@dge.inpe.br](mailto:dutra@dge.inpe.br)**

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

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

Santa Maria, Junho de 2006.



## DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

### **Bolsista:**

Fagner Chagas Rother  
Acadêmico do Curso de Física Licenciatura Plena  
Laboratório de Magnetosferas, Interações Terra-Sol e Geomagnetismo –  
LACESM/CT-UFSM  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

### **Orientador:**

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra  
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE - MCT  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

### **Co-Orientador:**

Dr. Nelson Jorge Schuch  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRESPE/INPE-MCT

## Título do 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.**

### **Local de execução do projeto:**

- Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas - CRESPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS.
- Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/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, em Santa Maria, RS.

### **Pesquisadores e Estudantes Colaboradores:**

- Acadêmico Cássio Espindola Antunes – Curso de Engenharia Elétrica - UFSM
- Acadêmico Sandro Bertagnolli – Curso de Engenharia Elétrica - UFSM
- Acadêmico Josemar Siqueira – Curso de Física – UFSM
- Acadêmico Elias Fernando Berra – Curso de Engenharia Florestal - UFSM



**Participantes da Cooperação Brasil-Japão em Ciências Espaciais Básicas diretamente envolvidos no Projeto:**

- Dr. Kiyohumi Yumoto – Kyushu University, Japão.
- Dr. Kazuo Makita – National Institute of Polar Research, Japão.



## **Agradecimentos**

Aproveito este espaço para agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do INPE/MCT do Dr. José Carlos Becceneri, coordenador da proposta PIBIC/INPE-CNPq-MCT pela oportunidade de poder me desenvolver técnica e cientificamente e também pelo apoio financeiro, ao Dr. Nelson Jorge Schuch, meu Co-Orientador e Coordenador da Ação de Implantação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, pela oportunidade em poder interagir com este Centro – CRESPE/INPE-MCT e pelos conselhos que muito ajudaram na formação pessoal, ao Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra meu Orientador de Projeto de Pesquisa pela paciência, dedicação e rapidez com que sempre respondeu minhas perguntas e incansável em fazer deste um projeto de excelência, em especial, agradeço ao grande amigo Evandro L. Barreto pelo apoio e incentivo a mim creditado no decorrer das atividades de estudos e pesquisas, mostrando sempre o caminho correto a seguir tanto no âmbito pessoal quanto profissional, aos meus colegas de Laboratório, Cássio E. Antunes, Sandro Bertagnolli, Josemar Siquera e Elias Fernando Berra pelo companheirismo e auxílio no desenvolvimento do Projeto e de atividades no Laboratório Magnetosferas Interação Terra-Sol/Geomagnetismo do CRESPE/INPE-MCT. Ainda, aos funcionários do CRESPE/INPE-MCT que de várias maneiras contribuíram para oferecer ótimas condições de trabalho, em especial a Professora Dra Damaris K. Pinheiro, Angelita e Maria Celia.



## RESUMO

Pulsações geomagnéticas são variações de pequena amplitude na faixa ultra baixa de frequências, que se originam de várias interações complexas entre as partículas carregadas eletricamente do plasma que constitui o vento solar e aquele da magnetosfera e ionosfera terrestres. As variações características do campo magnético da Terra apresentam escalas temporais de longo e curto períodos, desde segundos até milhões de anos. As variações menores do que cinco anos são dominadas por fontes de origem externa, decorrentes da interação Sol-Terra. Essa interação apresenta uma grande variabilidade devido à atividade solar (o ciclo solar), que tem periodicidades de 11 anos entre tempos de máxima atividade e de 22 anos entre épocas de mesma polaridade do campo magnético do Sol, aproximadamente. As maiores, por outro lado, são associadas aos processos dinâmicos no interior da Terra e fornecem informações importantes para os estudos da dinâmica do núcleo líquido do planeta. O objetivo desse Projeto foi o estudo das características das pulsções geomagnéticas de períodos entre 100 a 1000 segundos, em épocas diferentes do ciclo solar, e seu relacionamento com a precipitação de partículas energéticas carregadas eletricamente na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, AMAS. As observações geomagnéticas foram realizadas por um magnetômetro do tipo *fluxgate* (núcleo saturado) instalado na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, SMS (29°,43 S, 53°,82 W), RS, e foram analisadas e comparadas com as pulsções observadas em outras estações geomagnéticas afastadas e fora da Anomalia, com ênfase na Estação Geomagnética do Observatório Nacional em Vassouras, VSS (22.40°S,43.65W), RJ, do Observatório Nacional – ON/MCT, e na Estação Geomagnética do Observatório Espacial de Eusébio, EUS (3,89°S; 38,44°O), CE. A partir de períodos geomagneticamente perturbados, como durante a tempestade ocorrida em 22 a 28 de julho de 2004, pode-se detectar pulsções de períodos longos conhecidas como Pc5–6/Pi3. Utilizando-se uma filtragem digital – um filtro tipo passa-banda com a função de analisar somente as pulsções numa faixa de 180 a 900 segundos – foi possível detectar picos de variação das pulsções Pc5 e Pc6, a potência espectral associada e, também, observar a magnitude da diferença na variação da componente *H* comparando-se resultados da estação de coleta de dados OES/SMS, localizada próximo do centro da AMAS, com as outras estações. Foram analisadas as diferenças entre as variações geomagnéticas observadas em dias magneticamente calmos e dias magneticamente perturbados e sua relação com a intensidade do campo magnético terrestre. (Trabalho em continuidade ao desenvolvido pelo ex-bolsista Elias Fernando Berra).



## ÍNDICE

1.0	Introdução.....	11
2.0	Campo Magnético Terrestre.....	13
2.1	Variações do Campo Geomagnético.....	14
2.1.1	Variação secular.....	14
2.1.2	Variação Diurna.....	14
2.2	Magnetosfera.....	15
2.3	Cinturão de Van Allen.....	16
2.4	Atividade geomagnética.....	17
2.4.1	Interação do vento solar com o campo geomagnético.....	18
2.4.2	Variações na atividade solar.....	19
2.4.3	Ciclo Solar.....	20
2.5	Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS.....	22
2.6	Pulsações Géomagnéticas.....	24
2.6.1	Pulsações Contínuas.....	25
2.6.2	Pulsações Irregulares.....	27
3.0	Aquisição e análise dos dados.....	28
3.1	Magnetômetro <i>fluxgate</i> (núcleo saturado).....	28
3.2	Magnetômetro de precessão de Prótons.....	30
3.3	Aquisição dos dados.....	31
3.4	Análise dos dados - Filtragem digital.....	33
4.0	Tratamento de Dados e Resultados.....	34
4.1	Os dados e a Variação Diária.....	35
4.2	Eventos Geomagnéticos.....	36
4.3.1	Análise da Tempestade Magnética Ocorrida Entre 21 a 29 de Julho de 2004.....	36
4.3.2	Filtragem dos Dados.....	46
4.3.3	Filtragem dos Dados Para os Dias Magnéticamente Calmos.....	47
4.3.4	Filtragem dos Dados Para os Dias Magnéticamente Perturbados.....	50
4.3.5	Aplicação do Espectro de Potência no Estudo da Intensidade da Variação do Campo Geomagnético.....	59
4.3.6	Análise da Variação Diária.....	60
4.3.7	Filtragem Digital da Componente H.....	65
4.3.8	Análise por Espectro de Potência.....	70
5.0	Conclusões.....	75
6.0	Bibliografia.....	77



## 1.0 Lista de Figuras

Índice.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
Figura 1 – O campo magnético principal gerado pela ação do dínamo no núcleo exterior quente e líquido. Acima da superfície da Terra, as linhas quase dipolares do campo são orientadas para fora no hemisfério do sul e para dentro do norte. Fonte: <a href="http://www.geomag.bgs.ac.uk/documents/wmm_2005.pdf">www.geomag.bgs.ac.uk/documents/wmm_2005.pdf</a> .	13
Figura 2 - Variação diária das três componentes do campo magnético para o dia 4 de novembro de 2004, na estação de São Martinho da Serra (SMS).....	15
Figura 3 – Interação do vento solar com o campo geomagnético terrestre .....	17
Figura 4 – Cinturões de radiação de Van Allen do campo magnético terrestre.....	19
Figura 5 - Gráfico da Atividade Solar dado em anos, mostra o Ciclo Solar de 11anos.....	21
Figura 6 - Diagrama demonstrativo do Ciclo Solar de 11 anos, desde 1750 até 2000.....	21
Figura 7 – Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS. Intensidade total magnética para 2005.0 do Modelo Magnético Mundial 2005. Intervalo de contorno é 2000 nT. Projeção de Mercator. Fonte: <a href="http://www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/image.shtml">www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/image.shtml</a> .	22
Figura 8 – Identificação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS Fonte: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23.....	23
Figura 9 – Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul: a posição de satélites onde ocorreu defeito na memória do computador. Fonte: <a href="http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm">http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm</a> .....	24
Figura 10: Magnetômetro fluxgate para medida direcional do campo geomagnético. Fonte: Adaptada de Campbell, 1997. ....	30
Figura 11 – Magnetômetro de próton para medida do campo geomagnético total. A bobina ao redor da amostra é utilizada para alinhar os prótons e detectar o período de precessão dos mesmos. Fonte: Adaptada de Campbell, 1997. ....	31
Figura 11b – Elementos do vetor magnético.....	32
Figura 12 – Componentes H, D e Z para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do dia 21 de julho de 2004 (antes da tempestade), magneticamente calmo, com um índice $\Sigma Kp = 6-$ . ....	37
Figura 13 – Componentes H, D e Z para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, do dia 21 de julho de 2004 (antes da tempestade), magneticamente calmo, com um índice $\Sigma Kp = 6-$ .....	38
Figura 14 – Componentes H, D e Z para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do dia 29 de julho de 2004 (depois da tempestade), magneticamente calmo, com um índice $\Sigma Kp = 12o$ . ....	38
Figura 15 – Componentes H, D e Z para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, do dia 29 de julho de 2004 (depois da tempestade), magneticamente calmo, com um índice $\Sigma Kp = 12o$ .....	39
Figura 16 – Aumento abrupto durante a tempestade iniciada em 22 de julho de 2004 ( $\Sigma Kp = 23-$ ), para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. ....	40
Figura 17 – Aumento abrupto da componente H durante a tempestade iniciada em 22 de julho de 2004 ( $\Sigma Kp = 23-$ ), para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS. ....	40
Figura 18 – comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 23 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do, com um índice $\Sigma Kp = 38o$ . ....	41
Figura 19 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 23 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice $\Sigma Kp = 38o$ . ....	41
Figura 20 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 24 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do, com um índice $\Sigma Kp = 33+$ . ....	42
Figura 21 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 24 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice $\Sigma Kp = 33+$ . ....	42
Figura 22 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 25 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice $\Sigma Kp = 58+$ . ....	43



*Relatório Final de Atividades*

Figura 23 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 25 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 58+$ . ..... 43

Figura 24 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 26 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 29o$  .....44

Figura 25 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 26 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 29o$ . ..... 44

Figura 26 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 27 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 60-$  ..... 45

Figura 27 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 27 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 60-$ . ..... 45

Figura 28 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 28 de julho de 2004, para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 24o$  ..... 46

Figura 29 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 28 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 24o$ . ..... 46

Figura 30 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 21 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 47

Figura 31 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 21 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 48

Figura 32 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 29 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 48

Figura 33 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 29 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 49

Figura 34 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 22 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 52

Figura 35 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 22 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 52

Figura 36 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 23 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 53

Figura 37 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 23 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 53

Figura 38 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 24 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 54

Figura 39 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 24 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 54

Figura 40 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 25 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 55

Figura 41 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 25 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 56

Figura 42 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 26 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 56

Figura 43 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 26 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 57

Figura 44 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 27 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 57





*Relatório Final de Atividades*

Figura 45 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 27 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 58

Figura 46 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 28 de julho de 2004, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 58

Figura 47 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 28 de julho de 2004, na Estação EUS. .... 59

Figura 48: Índice Dst para o mês de agosto de 2003. .... 59

Figura 49; Componente magnética H para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 43 nT e  $\Sigma Kp$ : 21+. .... 61

Figura 50; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 43 nT e  $\Sigma Kp$ : 21+. .... 61

Figura 51; Componente magnética H para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 27 nT e  $\Sigma Kp$ : 13+. .... 62

Figura 52; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 27 nT e  $\Sigma Kp$ : 13+. .... 62

Figura 53; Componente magnética H para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 151 nT e  $\Sigma Kp$ : 52+. .... 63

Figura 54; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 151 nT e  $\Sigma Kp$ : 52+. .... 63

Figura 55; Componente magnética H para a Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 126 nT e  $\Sigma Kp$ : 24+. .... 64

Figura 56; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 121 nT e  $\Sigma Kp$ : 24+. .... 64

Figura 57; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 66

Figura 58; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS. .... 66

Figura 59; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 67

Figura 60; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS. .... 67

Figura 61; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 68

Figura 62; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS. .... 68

Figura 63; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 69

Figura 64; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS. .... 69

Figura 65; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. .... 71



*Relatório Final de Atividades*

Figura 66; Espectro de potência da do sinal filtrado para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS. .... 71

Figura 67; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT..... 72

Figura 68; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS..... 72

Figura 69; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. . 73

Figura 70; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS..... 73

Figura 71; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Magnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. . 74

Figura 72; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS.....74



## 2.0 Introdução

Dentro do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT as atividades do Programa de Iniciação Científica, ao qual está vinculado este Projeto, foram desenvolvidas atividades de pesquisas segundo a definição e planejamento no âmbito do Projeto “*Variação com ciclo solar das Pulsações Geomagnéticas de Períodos Longos (1.0 – 10 milihertz) na Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul*”. O objetivo desse Projeto foi o estudo das características das pulsações geomagnéticas de períodos longos, entre 100 a 1000 segundos, e seu relacionamento com a precipitação de partículas energéticas carregadas eletricamente nessa região.

O plano de trabalho do bolsista Fagner Chagas Rother consistiu em dar continuidade ao trabalho que fora efetuado pelo ex-bolsista Elias Fernando Berra, participando das atividades técnico-científicas e da operação da Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais em São Martinho da Serra – OES/CRESPE/INPE-MCT – Estação Geomagnética que passou a ser identificada como SMS (29°,43 S, 53°,82 W), RS, detectar as pulsações geomagnéticas e comparar as características dessas pulsações com pulsações observadas nas estações afastadas e fora da região da Anomalia. Paralelamente foi realizada uma revisão teórica com literatura específica da área do Geomagnetismo.

O estudo das variações Geomagnéticas pode revelar importantes informações sobre os processos físicos ocorridos na Magnetosfera, pela interação Terra/Sol, bem como eventos ocorridos na Ionosfera que podem, por exemplo, causar interferência nos enlaces de radiocomunicações.

O movimento de fluídos ionizados pelas altas temperaturas no núcleo da Terra, provocam correntes elétricas que induzem um campo magnético dando origem ao chamado Campo Magnético da Terra. Se não fosse a influência de fontes secundárias fora da Terra, que distorcem e causam perturbações no campo, poderia ser dito como um campo dipolar. Com uma grande faixa de variação temporal do campo magnético terrestre, 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 tempestades geomagnéticas, variações diurnas  $S_q$  e micropulsações geomagnéticas. Sendo que, as variações seculares são originadas internamente, enquanto as variações de curto período são de origem externas a Terra e estão diretamente associadas às atividades solares.

O campo magnético da Terra é assimétrico. Sua mais baixa intensidade total  $B$  (ou  $F$ ), numa escala global, se encontra numa região situada principalmente no sul do equador, que compreende partes do oceano Atlântico e do território brasileiro, e vai desde o estado de São Paulo ao sul do Rio Grande do Sul. Como consequência direta desse fenômeno – denominado *Anomalia Magnética Brasileira (AMB)* ou *Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)* – o cinturão de radiação que circunda o planeta, conhecido como cinturão de Van Allen, encontra-se ali rebaixado, recebendo a atmosfera local um maior bombardeamento de partículas oriundas do espaço exterior. Aí há uma precipitação de raios cósmicos e de partículas do vento solar ocasionando perturbações na ionosfera e no campo geomagnético, além de rádio-interferência. Esta particularidade, descoberta no início da era dos satélites nos anos 50, faz da região um singular laboratório natural de pesquisa sobre Física de Plasmas e da Radiação, Geofísica Espacial, Geomagnetismo e Aeronomia. Destacam-se nesse contexto os estudos dos processos relacionados com a origem das partículas incidentes, as variações em sua intensidade e os efeitos que produzem na atmosfera local.

Devido ao fato de que a análise dos dados de satélites para baixas latitudes requer sofisticadas técnicas de processamento, grande parte das análises são feitas com magnetômetros instalados em estações no solo. As pesquisas nessa área têm como objetivos coletar e analisar os dados coletados a partir de um magnetômetro instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE – MCT e estudar essas pulsações geomagnéticas, e fazer uma comparação com as informações e dados obtidos em outras estações geomagnéticas.

## 2.0 Campo Magnético Terrestre

A Terra possui um campo de forças, chamado campo Geomagnético (Figura 1), circundando o planeta. Esse campo de forças pode ser dividido em um campo principal, que corresponde á cerca de 99% do seu total e é gerado supostamente através de correntes elétricas que fluem na parte líquida do núcleo terrestre, e vários outros, produzidos por correntes elétricas presentes nas regiões ionizadas vizinhas do planeta.

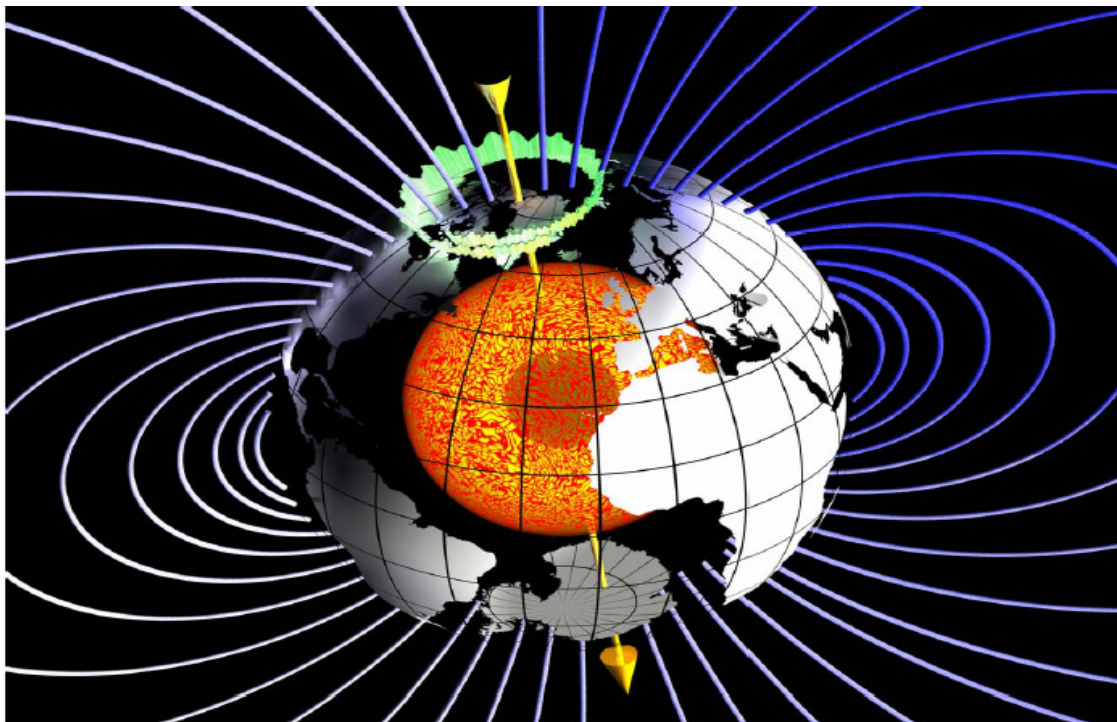


Figura 1 – O campo magnético principal gerado pela ação do dínamo no núcleo exterior quente e líquido. Acima da superfície da Terra, as linhas quase dipolares do campo são orientadas para fora do Hemisfério Sul e para dentro do Hemisfério Norte. Fonte: [www.geomag.bgs.ac.uk/documents/wmm\\_2005.pdf](http://www.geomag.bgs.ac.uk/documents/wmm_2005.pdf).

O modelo mais aceito atualmente é de que, os materiais presentes no interior da Terra apresentam-se fundidos e no estado de movimento resultante de convecção térmica, provocada por uma não uniforme geração de calor, devido ao decaimento de materiais radioativos irregularmente distribuídos. Por ação dínamo, este fluxo pode induzir forças eletromotrices capazes de manter as correntes elétricas.



## **2.1 Variações do Campo Geomagnético**

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

As variações geomagnéticas são classificadas em:

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

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

### **2.1.1 Variação secular**

A variação secular é uma lenta e continua mudança no campo principal observada no campo principal. Ela está associada com as correntes elétricas que fluem no núcleo externo da Terra e fornece informações importantes para a investigação dessa camada do planeta. Ela tem uma escala temporal que chega a mil anos e é dada pela mudança anual no valor do campo. Sua quantificação é obtida mediante a variação dos elementos magnéticos X, Y e Z.

### **2.1.2 Variações Diárias**

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

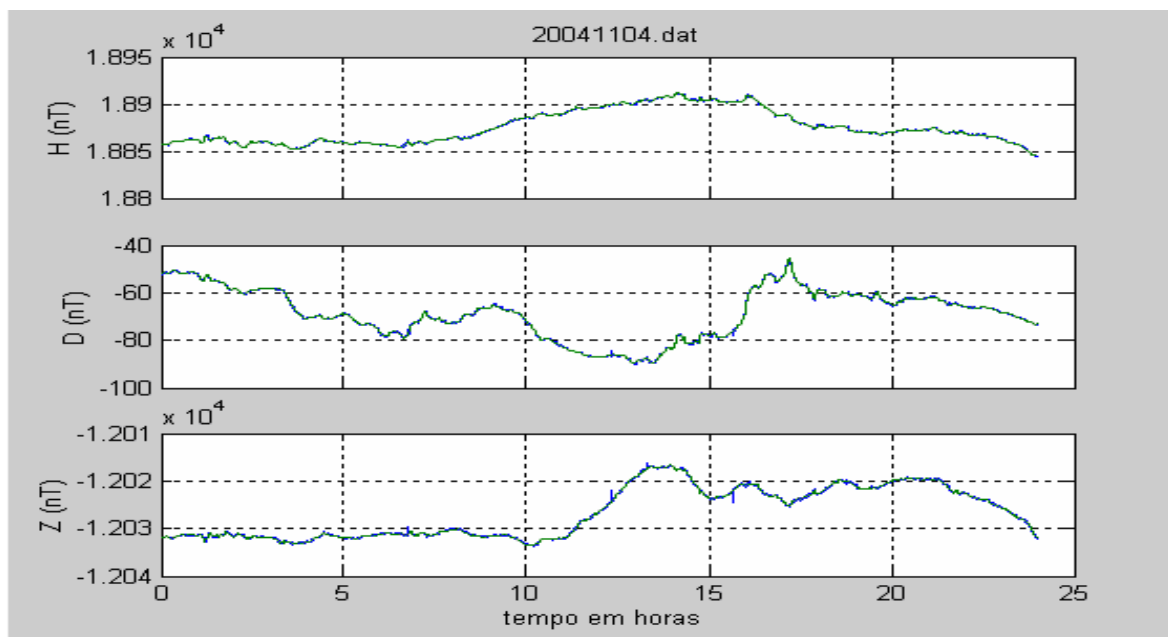


Figura 2 – Variação diária das três componentes do campo magnético para o dia 4 de novembro de 2004, observado na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRESPE/INPE-MCT de São Martinho da Serra (SMS).

## 2.2 Magnetosfera

A magnetosfera é a parte da Terra onde o campo geomagnético, modificado pelo vento solar, controla os movimentos das partículas carregadas (*Wave Propagation Standards Committee, 1997*).

A magnetosfera é conceitualmente dividida em magnetosfera externa, onde o campo geomagnético é fortemente modificado pelo vento solar, e a magnetosfera interna, onde o campo geomagnético é o mais próximo da configuração dipolar.

A magnetosfera terrestre em seu todo esta rerepresentada através de uma seção transversal ao longo do círculo máximo contendo o meridiano do meio dia e da meia noite (pontos sub-solar e anti-solar).

O vento solar, que se choca com a magnetosfera a grande velocidade ( $v \sim 300 \text{ km/s}$ ), provoca o aparecimento de uma *onda de choque* na região sub-solar. A região seguinte de grande turbulência que serve de transição entre a onda de choque e a magnetosfera propriamente dita, é a *camada de revestimento* (“magnetosheath”).

Em seguida vem a *magnetopausa*, o limite da magnetosfera, que separa as regiões do campo magnético interplanetário da região do campo geomagnético. A magnetosfera está contida nesta cavidade. Do lado sub-solar, em condições quiescentes, sua extensão é da ordem de 10 raios terrestres,  $R_T$ , tendo forma aproximadamente cilíndrica do lado anti-solar, e sua longa extensão ( $\sim 60 R_T$ ) neste lado lhe valeu a denominação de *cauda magnética*.

### 2.3 Cinturão de Van Allen

Em 1958 descobriram-se imensas regiões de radiação dentro da magnetosfera. Essas regiões, conhecidas como *cinturão de radiação de Van Allen* (Figura 5) devido ao seu descobridor, contêm prótons e elétrons energéticos presos pelo campo magnético da Terra. Quando esses intensos cinturões de radiação foram descobertos, os cientistas ficaram apreensivos quanto às serias ameaças que poderiam oferecer as viagens espaciais. Estes cinturões contêm prótons e elétrons de alta energia entre 1-100 Mev, que penetram facilmente numa nave espacial e podem causar a uma exploração prolongada, danos aos instrumentos e perigo para os astronautas. Tanto as missões tripuladas como as não tripuladas evitam essa região.

O cinturão de Van Allen é composto de duas faixas, das quais a interior se situa entre 2200 e 5000 quilômetros, e a exterior entre 13000 e 55000 quilômetros da superfície da Terra.

Cinturão Interior: Este é constituído principalmente de prótons de alta energia devido ao choque das partículas de raios Cósmita.

Cinturão Exterior: Formado principalmente por elétrons de alta energia, provenientes de raios Cósmita e por processos de aceleração Magnetosféricas.



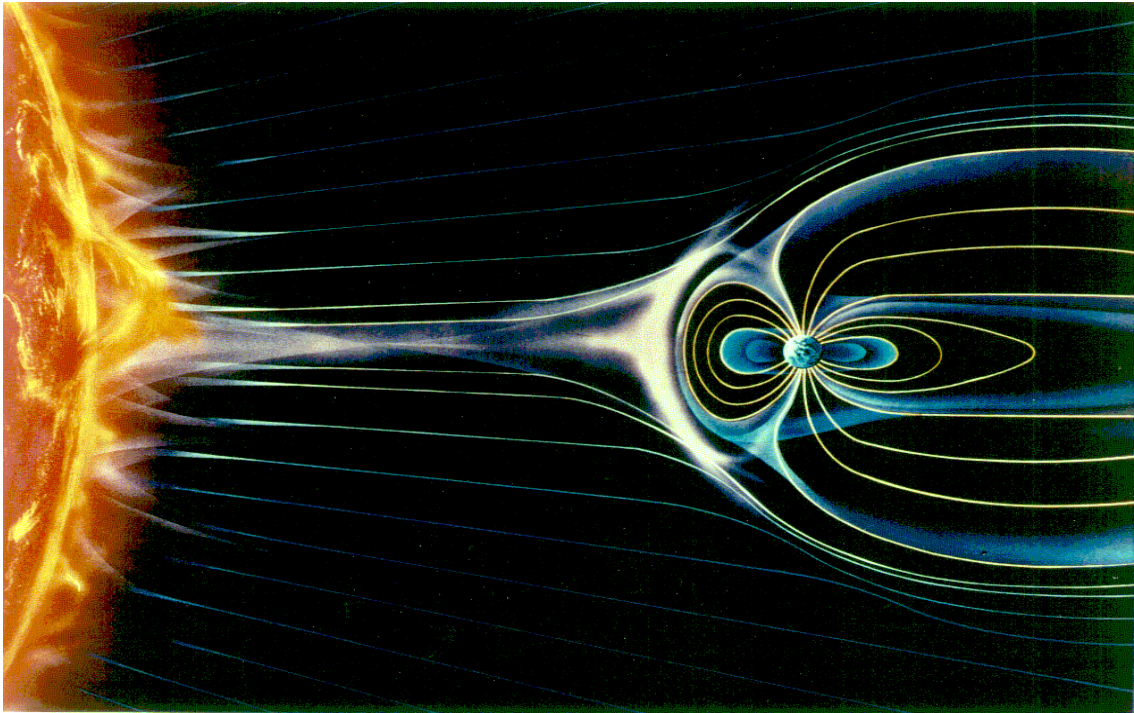


Figura 3 – Interação do vento solar com o campo geomagnético terrestre.  
Fonte: [http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/sunearth\\_lg.gif](http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/sunearth_lg.gif).

## 2.4 Atividade geomagnética

Basicamente há dois tipos de variações magnéticas: as que ocorrem a períodos magneticamente calmos e as variações mais intensas associadas a tempestades magnéticas. As variações calmas são de dois tipos principais: a variação Sq e uma mais fraca chamada variação L. A primeira é influenciada pela ação solar (S) em tempo calmo (q), e a segunda é influenciada pela Lua (L). As variações mais intensas, associadas as tempestades, são as variações perturbadas.

A fim de definir rapidamente o estado de atividade do campo magnético terrestre, foram criados vários índices, baseados nas variações medidas pelos magnetômetros. Em cada estação, o dia é dividido em oito períodos de três horas e, das três componentes do campo, aquela variação que for a maior, em cada período, é chamada a amplitude  $a$  em gamas. As variações Sq e L são previamente subtraídas de cada componente. Estas amplitudes, medidas em uma série de estações para cada período, produzem o índice planetário Ap. O índice K está relacionado às amplitudes

*a*, através de uma escala semi-logarítima própria para cada estação. Os valores numéricos de *K* variam de 0 (atividade muito calma ) a 9 (atividade magnética muito intensa), com frações intermediárias de 1/3. A medida entre varias estações corresponde o índice planetário  $K_p$  . O índice  $K_p$ , sendo um índice planetário, deveria exprimir o estado médio da atividade magnética do globo terrestre, mas para isso, a rede de magnetômetros deveria ser uniformemente distribuído, o que na realidade não ocorre, havendo muito mais observatórios no hemisfério norte.

#### **2.4.1 Interação do vento solar com o campo geomagnético**

O Sol, estrela fornecedora de energia ao nosso planeta, emite permanentemente um plasma, o vento solar, e apresenta freqüentemente erupções solares causadas pela sua própria dinâmica. Essas erupções liberam plasma, espalhando-se pelo espaço cósmico e compondo-se com o vento solar que viaja a velocidades supersônicas. As partículas do vento solar interagem com o campo magnético terrestre e na região da magnetosfera a ação deste campo é forte o suficiente para manter essas partículas sob seu controle.

Os distúrbios magnéticos resultam da entrada de grandes quantidades de plasma solar na Magnetosfera (figura 4), por ocasião de tempestades magnéticas. Ao deparar-se com o campo geomagnético o vento solar achata esse campo na parte que esta diretamente exposta ao sol e expande na parte anti-solar.

Como a deformação do campo geomagnético, depende da quantidade de plasma ejetado pelo Sol, quando há grandes erupções solares ocorrem as tempestades magnéticas que são detectadas primeiramente por plataformas geoestacionárias e depois pelos magnetômetros espalhados por diversos pontos no globo.

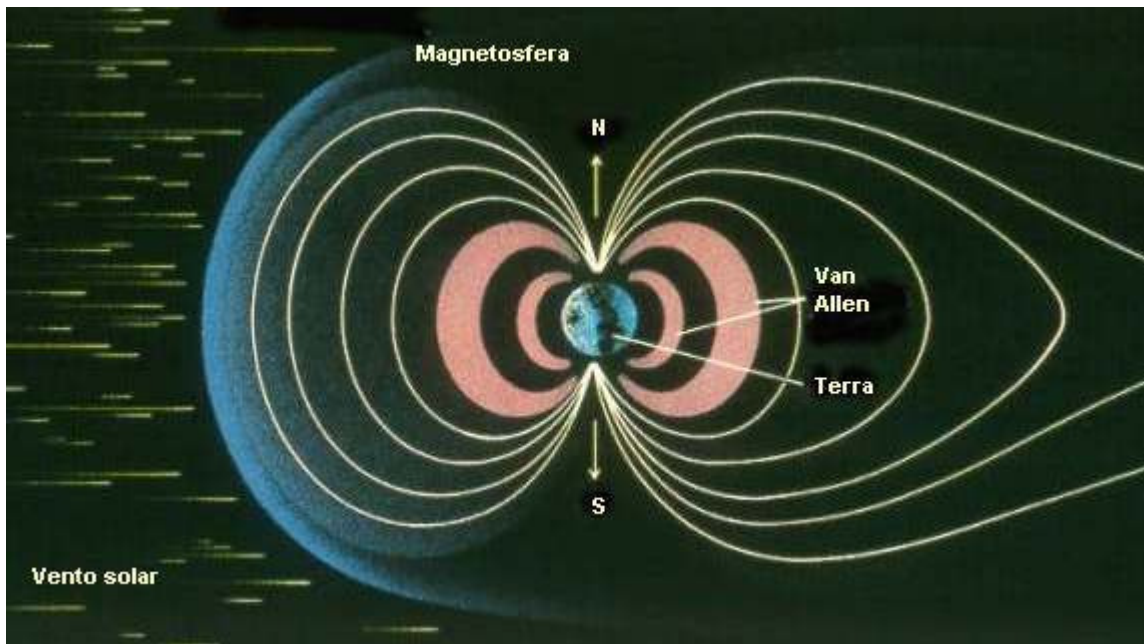


Figura 4 – Cinturões de radiação de Van Allen do campo magnético terrestre.  
Fonte: <http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica5/leituras/vanallen>.

#### 2.4.2 Variações na atividade solar

As tempestades magnéticas 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 magnético experimenta fortes perturbações. Uma tempestade magnética típica pode ser dividida em uma fase inicial, com duração de quatro horas, uma fase principal, com várias horas de duração, e uma fase de recuperação, com duração de algumas horas e alguns dias, dependendo da intensidade da tempestade.

As sub-tempestades magnéticas são associadas às correntes do campo alinhadas, fluindo dentro e fora da região auroral. Elas são menos intensas, porém mais frequentes e duram apenas algumas horas e são desencadeadas quando o balanço dinâmico de energia da magnetosfera torna-se instável. A frequência das tempestades e sub-tempestades está relacionada ao ciclo solar de 11 anos.

### **2.4.3 Ciclo Solar**

O Ciclo de Atividade Solar varia com um período de 11 anos e conseqüentemente, as estruturas do Meio Interplanetário e o Campo Magnético Interplanetário também variam com este mesmo período. O Ciclo Solar de 11 anos, é caracterizado por um aumento no numero de Manchas Solares atingindo um máximo, decrescendo logo em seguida, como mostra a Figura 5. Durante o Ciclo Solar são identificadas fases distintas, a fase de mínimo solar, fase ascendente e fase de máximo solar, fase descendente. Durante o máximo do ciclo ocorre o aumento de fenômenos energéticos nas regiões ativas associadas as manchas. Estes fenômenos são chamados de explosões solares ou “Flares”, podendo estar associadas a Ejeções Coronais de Massa e a Tempestades Geomagnéticas. Outros efeitos importantes da atividade 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 vida dos astronautas pela exposição a grande quantidade de radiação.

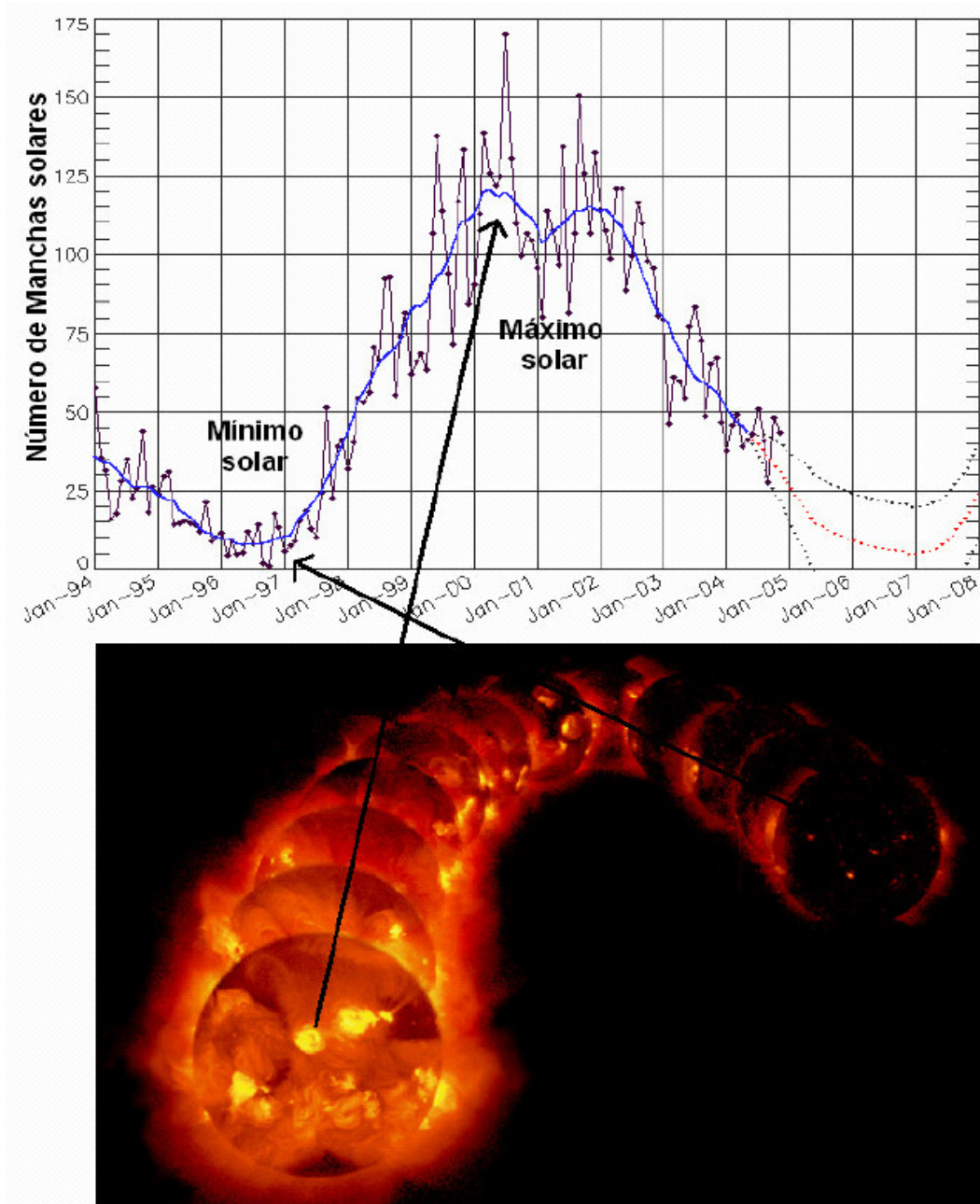


Figura 5- Gráfico da Atividade Solar dado em anos, mostra o Ciclo Solar de 11anos, em particular o Ciclo Solar 23 [Fonte: Modificado de <http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/> e <http://helios.gsfc.nasa.gov/ace/gallery.html>]. Podemos ver na Figura 6 logo acima um diagrama demonstrativo do Ciclo Solar de 11 anos desde 1750 até 2000.

## 2.5 Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS

Devido a assimetria do campo geomagnético, algumas anomalias na intensidade total são encontradas, dentre estas, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS ou Anomalia Brasileira, cuja configuração se aproxima da de um círculo cujo centro se situa nas coordenadas 25° S e 48°O e um raio aproximado de 900 km, estendendo-se sobre o território brasileiro, do estado de São Paulo ao sul do Rio Grande do Sul. (Figura 7).

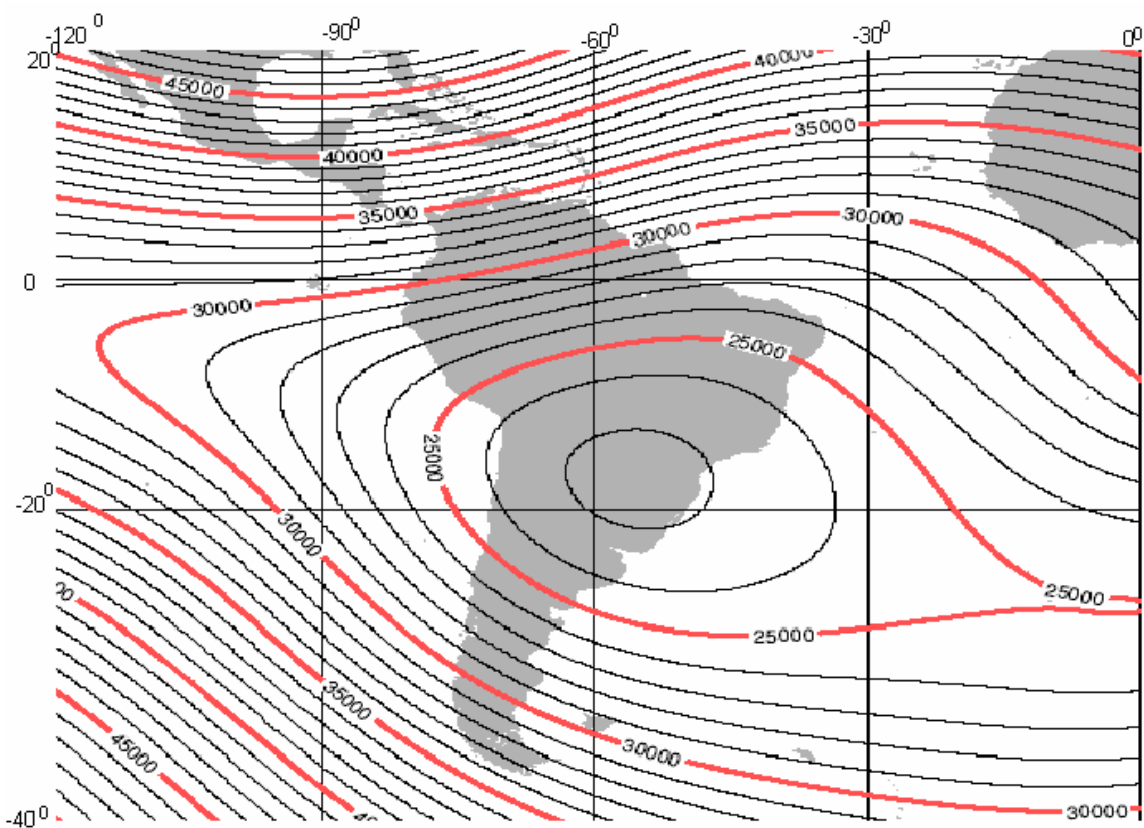


Figura 7 – Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS. Intensidade total magnética para 2005.0 do Modelo Magnético Mundial 2005. Intervalo de contorno é 2000 nT. Projeção de Mercator. Fonte: [www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/image.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/seg/WMM/image.shtml).

Caracterizada pela baixa intensidade do campo geomagnético a AMAS resulta numa grande depressão na magnetosfera terrestre. Como consequência desta, os cinturões de radiação que circundam o planeta Terra (cinturões de Van Hallen). Estão pressionados na superfície da Terra, causando grande precipitação de raios

cósmicos e de partículas do vento solar na alta atmosfera da região, ocasionando perturbações no campo geomagnético e na ionosférica, além da radiointerferência.

A depleção do campo magnético na região da AMAS e a conseqüente precipitação de partículas na alta atmosfera faz desta região um excelente laboratório para estudos de fenômenos atmosféricos em condições de campo magnético fraco. De acordo com pesquisas mais recentes sobre o magnetismo nas rochas, a intensidade do campo geomagnético do planeta tem decrescido durante os últimos mil anos e irá desaparecer dentro dos próximos mil anos se a presente taxa de decréscimo persistir. Observou-se também que a taxa de decréscimo do campo geomagnético é notavelmente grande próxima da América do Sul, desde que a intensidade do total do campo geomagnético nesta região já é muito fraca, o campo geomagnético da América do Sul poderá desaparecer dentro de 400 anos. Sabe-se que os pólos magnéticos da Terra freqüentemente sofreram reversões durante a história do planeta. Quando os pólos magnéticos da Terra reverterem, a intensidade do campo magnético torna-se muito fraca. Considera-se que os seres humanos terão que viver sobre um campo magnético extremamente fraco no futuro., isto implica que a intensidade de partículas de raios cósmicos precipitantes na atmosfera terrestre tende a aumentar, gerando conseqüências imprevisíveis sobre a atmosfera e também no nível da superfície. Esta precipitação de partículas energéticas pode agravar o problema na redução temporária na camada de ozônio observado na região sul do Brasil, como conseqüência de Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico.

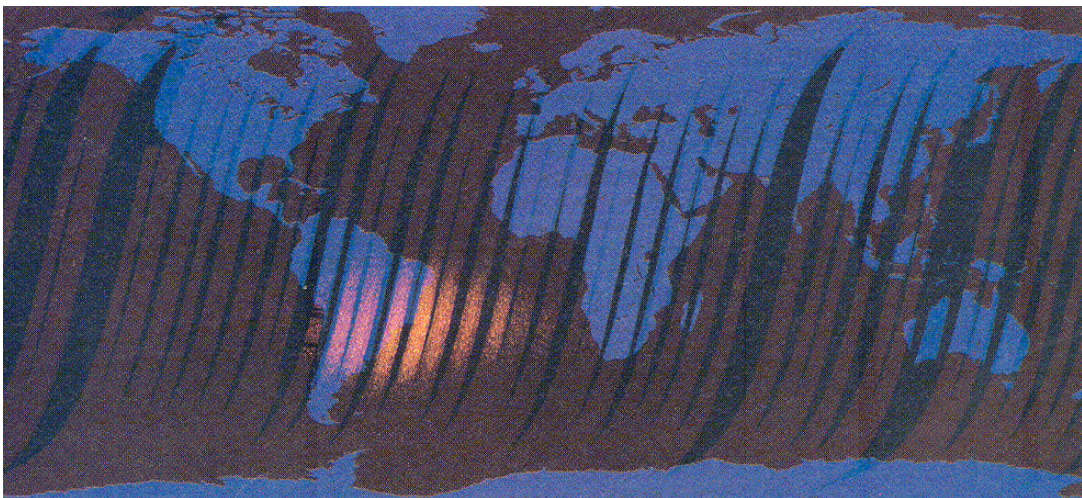


Figura 8 – Identificação da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS  
Fonte: Scientific American Brasil – Ano 2, nº 23

Outros efeitos têm sido identificados na AMAS como, por exemplo, o nível de radiação induzido nos satélites quando a atravessam sofre um grande aumento, a tal ponto que se passou a desligar muitos equipamentos durante a passagem – vários satélites apresentam problemas em seu sistema de comunicação nessa região como em nenhum outro lugar (ver Figura 9) – e, também, os raios cósmicos têm um acesso mais fácil à atmosfera dessa região.

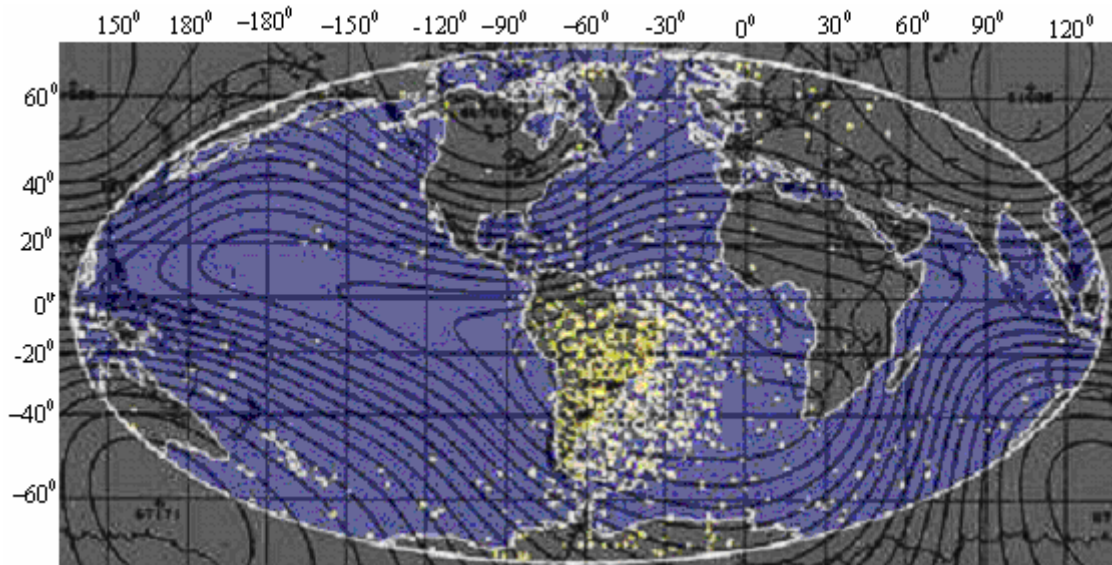


Figura 9 – Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul: a posição de satélites onde ocorreu defeito na memória do computador. Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>.

## 2.6 Pulsações geomagnéticas

As pulsações são variações magnéticas de períodos curtos presentes no campo geomagnético, resultantes de interações complexas entre as partículas carregadas eletricamente do vento solar e o plasma da magnetosfera e ionosfera terrestres. Períodos de intensa atividade geomagnética introduzem, naturalmente, grandes modificações no regime dinâmico das pulsações. Elas são classificadas como regulares (ou contínuas) e irregulares, com períodos entre 0,2 segundos e 17 minutos. Podem ser subdivididas morfológicamente em subgrupos, dependendo de seus períodos, segundo as seguintes faixas (Jacobs et al. 1964):



**Pulsações Contínuas (Pc):**

- Pc1, período 0,2 a 5 segundos;
- Pc2, período 5 a 10 s;
- Pc3, período 10 a 45 s;
- Pc4, período 45 a 150 s;
- Pc5, período 150 a 600 s;

**Pulsações Irregulares (Pi):**

- Pi1, período 1 a 40 segundos;
- Pi2, período 40 a 150 s;

Também se considera 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). Nas tabelas seguintes será adotada a classificação morfológica.

**2.6.1 Pulsações Contínuas**

<b>Pulsações</b>	<b>Características</b>
Pc1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Importantes fontes de informações de instabilidades de plasma que podem se desenvolver nas regiões dos cinturões de radiação</li><li>• Indicador do estado da magnetosfera</li><li>• Ocorrem na forma de “explosões” separadas</li><li>• Desenvolve-se gradualmente em uma série de pulsações que se estende de dez minutos a horas</li><li>• Podem também ocorrer na forma de grupos de pulsações com bruscas</li></ul>

	<p>variações de frequência</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• São mais freqüentemente excitadas em zonas aurorais e subaurorais</li></ul>
Pc2-3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amplitudes de sinais observadas das Pc2-3 são, usualmente, menores do que 1,0 nT e decrescem repentinamente com o decréscimo da atividade solar</li><li>• Períodos típicos são em torno de 20 a 30 segundos</li><li>• Tipicamente fenômenos diurnos, com período médio sofrendo variações diárias, maximizando-se ao meio-dia</li><li>• A frequência característica das Pc2-3 aumenta com o aumento do índice de atividade magnética <math>K</math></li><li>• Há incidência destas pulsações também durante a fase inicial das tempestades magnéticas</li><li>• A frequência de ocorrência das Pc3 não muda muito ao longo do ciclo solar</li></ul>
Pc4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amplitudes típicas das Pc4 são de 5 a 9 nT em altas latitudes e 1 nT em baixas latitudes</li><li>• Os sinais, usualmente, duram de 10 minutos a várias horas</li><li>• Nas médias e baixas latitudes o modelo de ocorrência diária tem um máximo ao meio-dia</li><li>• A frequência de ocorrência das Pc4 aumenta com a diminuição da atividade solar, embora suas amplitudes permaneçam quase constantes por todo o ciclo solar</li><li>• As Pc4 são muito mais dominantes que as Pc3 nos mínimos solares</li><li>• Em todas as latitudes a ocorrência das Pc4 pode ser conectada com o ciclo solar; mais ativamente nos anos de mínimas manchas solares</li></ul>
Pc5	<ul style="list-style-type: none"><li>• Podem ter amplitudes extremamente grandes, chegando a várias centenas de nanoteslas nas latitudes altas e várias dezenas de nanoteslas nas latitudes baixas</li><li>• Estende-se por um período de 10 minutos a várias horas</li><li>• Suas formas são inteiramente senoidais, muitas vezes amortecidas,</li></ul>

	<p>com algumas distorções que aparecem com o aumento da atividade magnética</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Larga distribuição latitudinal, com rápido decréscimo em amplitude com o aumento da distância à zona auroral e um claro aumento equatorial</li><li>• O aumento da amplitude na região equatorial pode ser explicado pelas correntes ionosféricas chamadas de eletrojetos equatoriais</li></ul>
--	--

### 2.6.2 Pulsações Irregulares

Esta classe de pulsações é caracterizada por sua forma irregular. Elas têm conexão com os distúrbios do campo magnético e possuem correlação com os distúrbios da magnetosfera superior. Esta classe é dividida em dois subgrupos:

<b>Pulsações</b>	<b>Características</b>
Pi1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Períodos freqüentemente menores do que 15 segundos</li><li>• Amplitudes têm valores máximos nas zonas aurorais e sua intensidade decresce rapidamente com a latitude</li><li>• Oscilações têm formas de microestruturas devido aos distúrbios lentos do campo magnético, observado durante a fase principal das tempestades magnéticas</li><li>• A atividade Pi1 mostra uma dependência distinta com o índice <i>K</i>, aumentando esse índice</li><li>• Algumas vezes, são registradas (e Pc1) simultaneamente com distúrbios lentos e, também, como distúrbios de campos independentes</li></ul>
Pi2	<ul style="list-style-type: none"><li>• As vezes, apresenta períodos acima de 250 segundos</li><li>• Amplitudes variam na faixa 1–5 nT</li><li>• Características principais: seu pequeno tempo de duração e a sua superposição nas Pi1, as quais podem ser seguidas, em certas</li></ul>

	<p>ocasiões, pelas Pc1</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• A probabilidade de ocorrência das Pi2 aumenta com o aumento do índice <math>K</math></li><li>• Para um mesmo intervalo de tempo, as atividades Pi1 aumentam com o máximo das manchas solares</li></ul>
--	---

### 3.0 Aquisição e análise dos dados

O campo Geomagnético não pode ser medido diretamente, sendo necessária a interação dele com outros processos físicos para produção de efeitos mensuráveis. Além disso, devido a grande extensão espacial desse campo em relação à dimensão dos sensores, apenas medidas pontuais são obtidas.

Todas as medidas do campo magnético terrestre envolvem a determinação da magnitude e direção do campo vetorial indução magnética  $\mathbf{B}$ . Três planos de referência são necessários para esta medição: o plano vertical que contém a direção Leste-Oeste; o plano meridional Norte geográfico (que contém a direção Norte-Sul) e o plano horizontal.

A seguir descrevem-se alguns instrumentos utilizados para a observação do comportamento do campo geomagnético, enfatizando o magnetômetro do tipo *fluxgate* utilizado para a obtenção de dados para este trabalho, e discute-se também a aquisição e armazenamento dos dados e sua análise, incluindo a filtragem digital.

#### 3.1 Magnetômetro *fluxgate* (núcleo saturado)

No magnetômetro *fluxgate*, um núcleo de material magnético de alta permeabilidade, de fácil saturação, é utilizado para obter o sinal do campo magnético,  $H_0$ , existente no ambiente. A propriedade de histerese do núcleo saturável é utilizada pela imposição de um campo oscilante intenso produzido por

uma bobina, chamada primária. A intensidade do campo geomagnético é obtida pela medição dos harmônicos de distorção no sinal de saída, mediante o uso de um sensor (bobina secundária) ao redor do núcleo. A quantidade de interesse é o segundo harmônico da frequência de excitação, gerado na região de saturação do sensor.

O campo Geomagnético que se quer medir,  $H_0$ , atua sobreposto ao campo de excitação senoidal  $A$ , onde  $A \gg H_0$ , e o sinal  $A$  é ajustado para ser grande o suficiente de forma a produzir a saturação do núcleo de alta permeabilidade, pela bobina primária. O sinal residual (*offset*) causado pela ação do campo ambiente,  $H_0$ , resulta numa distorção na forma de variação da densidade de fluxo magnético,  $\mathbf{B}$ , que aparece numa segunda bobina sensora enrolada ao redor do núcleo. Esta distorção da variação de  $\mathbf{B}$  em relação ao tempo contém vários harmônicos pares, ao se considerar o sinal é decomposto em suas componentes de Fourier.

A amplitude do segundo harmônico é consideravelmente maior do que do primeiro e terceiro harmônicos. Com um filtro de banda estreita, este segundo harmônico é selecionado para tornar-se uma medida do campo ambiente,  $H_0$ , depois de ser comparado a um segundo harmônico “artificial” a partir de uma duplicação do sinal de excitação original. Usando um sinal de excitação com frequência por volta de 700 Hz, uma variação de 1 nT produz uma saída de aproximadamente 25  $\mu\text{V}$ . Para medidas de sinais fracos, podem ser utilizados dois núcleos em direções opostas no circuito de excitação e uma bobina secundária cercado ambos. As duas contribuições primárias nas bobinas com núcleo saturado postas em direções opostas são, então, canceladas (Figura 10). Três sensores *fluxgate* orientados segundo três direções ortogonais, produzem as três componentes necessárias para a medição do campo geomagnético.

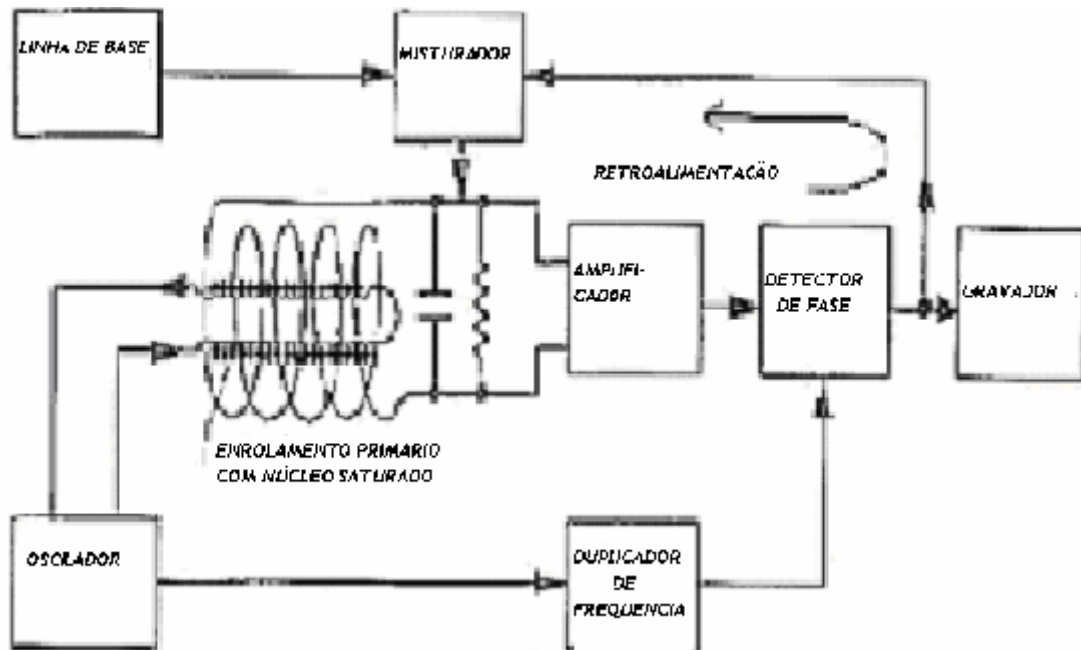


Figura 10: Magnetômetro fluxgate para medida direcional do campo geomagnético.  
 Fonte: Adaptada de Campbell, 1997.

### 3.2 Magnetômetro de precessão de Prótons

Se um material fluído rico em prótons – tal como querosene, óleos, água etc. – é colocado em um campo magnético, os prótons procurarão se alinhar ao longo do campo aplicado, devido ao torque no seu *spin* intrínseco. Campos fracos originam fraco alinhamento. Um campo magnético de polarização é aplicado, forte o suficiente (da ordem de  $10^7$  nT) para que uma grande fração dos prótons se alinhem com ele. Então, este campo é repentinamente removido (desligado). Prótons, que se comportam como giroscópios elementares, iniciarão a precessão ao redor do campo magnético residual, o campo magnético terrestre. Como uma fração razoável de prótons fica com os eixos de *spin* alinhados, a precessão conjunta é suficiente para produzir um sinal detectável (Figura 11). A frequência de precessão é diretamente proporcional ao campo magnético da Terra, no ponto onde está o magnetômetro. O sensor mede esta frequência, divide por uma constante apropriada para obter o valor do campo geomagnético em nanoteslas (ou gamas) e mostra a leitura, com sua magnitude calculada através da relação:

$$B = \frac{2\pi}{\gamma_p} f_p \quad \therefore \quad B \text{ (nT)} = 23,4874 f_p \text{ (Hz)}$$

onde  $\gamma_p = 2,67513 \times 10^8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$  é a razão giromagnética. Com isto, um campo de 23.487 nT corresponde a uma frequência de precessão de 1 kHz. Apesar da medida básica do magnetômetro de precessão de prótons ser a intensidade do campo geomagnético (grandeza escalar), ele pode ser adaptado e medir também as três componentes do campo **B**.

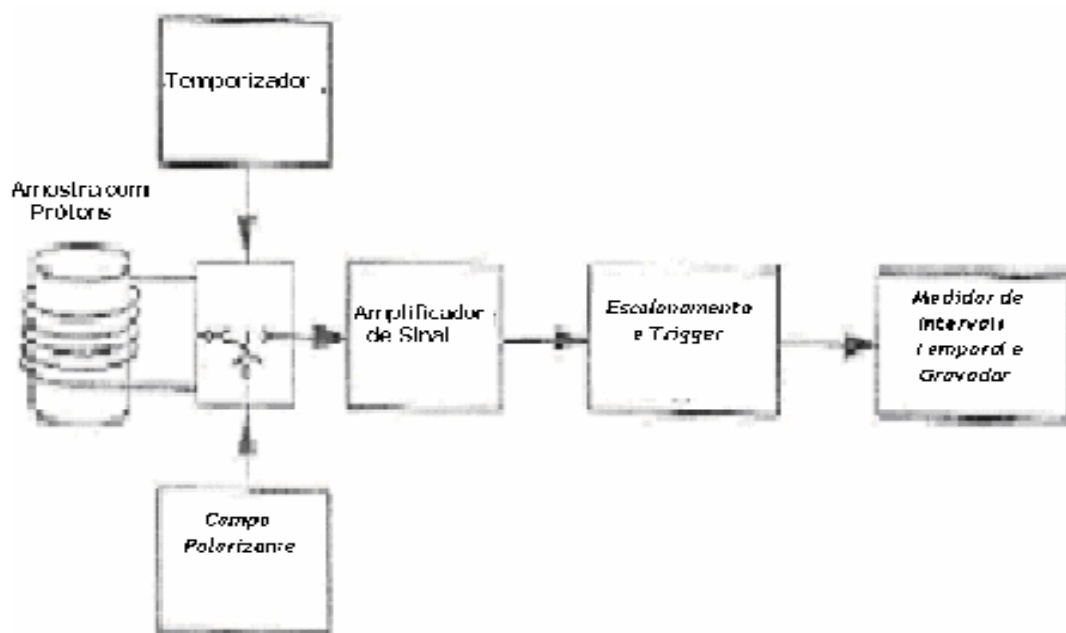


Figura 11 – Magnetômetro de precessão de prótons para medida do campo geomagnético total. A bobina ao redor da amostra é utilizada para alinhar os prótons e detectar o período de precessão dos mesmos. Fonte: Adaptada de Campbell, 1997.

### 3.3 Aquisição dos dados

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

A Figura 11b mostra o vetor total do Campo Geomagnético ( $F$ ) e suas três componentes  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ .

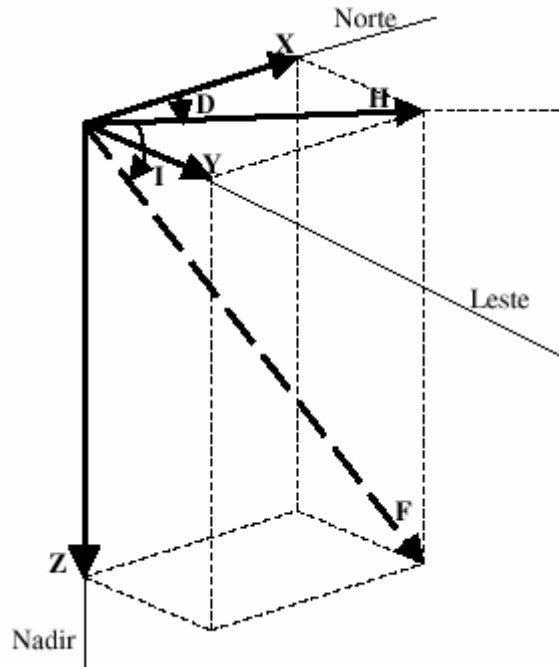


Figura 11b – Elementos do vetor magnético

**Elementos lineares:**

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

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

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

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

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

**Elementos angulares:**

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

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



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

O sistema sensor de três coordenadas foi alinhado e orientado nas direções norte, leste e vertical, tendo por base uma bússola e a informação do sensor leste-oeste que indica campo nulo.

Um sistema de aquisição de dados geomagnéticos consiste inicialmente de duas partes: sistema de medição (magnetômetro - *fluxgate*) e o sistema de pré-processamento e armazenamento dos dados coletados. Foram desenvolvidas unidades de aquisição com interface capaz de selecionar as saídas analógicas dos sensores e digitalizá-las por um conversor analógico-digital.). Os dados digitalizados são formatados e transferidos para cartões de memória. Três outras partes completam em geral o sistema de aquisição, que são as unidades de conversão, de qualificação-validação e de processamento e análise dos dados, feitas posteriormente em computadores digitais.

Para este estudo fez-se uso principalmente de dados geomagnéticos coletados na Estação Geomagnética instalada no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE, do OES/CRESPE/INPE-MCT – INPE, em São Martinho da Serra, denominação abreviada por: SMS (29,43°S; 52,82°O), RS. Foram utilizados os dados da Estação Geomagnética do Observatório Nacional, em Vassouras – VSS (22,40°S; 43,65°O), RJ, e Eusébio – EUS (3,89°S; 38,44°O), MA.

Com os dados coletados do magnetômetro instalado no Observatório Espacial do Sul, de São Martinho da Serra, foram feitas filtragens através de software para facilitar a análise e catalogação dos dados na forma de gráficos das variações das componentes  $H$ ,  $D$  e  $Z$

### **3.4 Análise dos dados - Filtragem digital**

O propósito da filtragem digital é alterar a informação espectral contida no sinal, produzindo assim um realce nas características espectrais. Um grande número

de estruturas diferentes pode ser usado para implementar filtros digitais. As mais comuns são: filtragem direta, em cascata e em paralelo. A maioria dos filtros digitais podem ser implementados usando uma das estruturas mencionadas. A conversão da estrutura de filtragem direta para a estrutura em cascata envolve a fatoração dos polinômios de maneira que o produto das funções de transferência individuais é igual a uma função de transferência. Similarmente, a conversão para a estrutura em paralelo requer a expansão em funções parciais, de tal forma que a filtragem direta seja representada pela soma das funções de transferência individuais.

Quatro tipos básicos de filtros podem ser definidos em termos de suas características de resposta no domínio frequência: o filtro passa-baixa é caracterizado pela eliminação das componentes de alta frequência e permite a transferência de dos componentes de baixa frequência; o filtro passa-alta permite a transferência dos componentes de alta frequência e elimina os de baixa; o filtro passa-banda ou passa-faixa rejeita ambos regimes de frequência, mas permite a passagem de componentes intermediárias e o filtro rejeita-banda ou rejeita-faixa rejeita frequências intermediárias.

Para realizar as filtrações dos dados deste trabalho usou-se um filtro digital do tipo 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.

#### **4.0 Tratamento de Dados e Resultados**

Nesta Seção se abordará as atividades consolidadas pelo bolsista substituído Elias Fernando Berra no período de agosto de 2005 a fevereiro de 2006 no tratamento dos dados geomagnéticos, dando enfoque as pulsações medidas da Estação Geomagnética, SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE-MCT (Estação de baixa latitude), proposta para esta pesquisa, e confecção de artigos de iniciação científicas com o fim de apresentá-los em congressos de interesse. Dentro do Projeto intitulado “*Varição com Ciclo Solar das*

***Pulsações Geomagnéticas de Períodos Longos (1.0–10 milihertz) na Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul***”, seguiu-se uma linha de estudos com o objetivo específico de verificar as características das pulsações geomagnéticas de períodos longos e seu relacionamento com a precipitação de partículas carregadas de altas energias na região AMAS.

Assim estabeleceu-se a seguinte metodologia para melhor aproveitamento das atividades:

- Realizar medidas geomagnéticas continuamente, operando um magnetômetro tipo “*fluxgate*” na Estação Geomagnética SMS do OES/CRESPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, situada muito próximo ao centro da AMAS;
- Processar os dados obtidos pela Estação Geomagnética SMS do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, identificando os eventos de pulsações de períodos longos Pc5–6/Pi3, conhecidos na literatura, e estudar as características destas pulsações, como potência espectral e polarização das ondas eletromagnéticas; e
- Finalmente, interpretar os resultados em termos de processos físicos envolvendo a geração das pulsações e subsequente precipitação das partículas carregadas na AMAS.

Os dados do *fluxgate*, cujo sistema de aquisição funciona ininterruptamente durante as 24 horas do dia, são coletados mensalmente na Estação Geomagnética SMS do OES/CRESPE/INPE-MCT, através da troca de um cartão magnético (memória *flash*), por um dos integrantes do Laboratório de Magnetosferas – Interações Terra-Sol do CRESPE/INPE-MCT, localizado nas propriedades da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, em Camobi, Santa Maria, RS cujos dados são compartilhados com Pesquisadores do DGE/INPE-MCT – São José dos Campos, SP.

#### **4.1 Os dados e a Variação Diária**

---

Os dados geomagnéticos adquiridos foram armazenados e gravados em um arquivo de dados na forma binária e posteriormente convertidos em arquivos tipo ASCII (planilha tipo texto). Os arquivos de dados no formato ASCII é constituído por 43200 linhas de dados, correspondendo a uma aquisição a cada dois segundos para um dia (taxa de amostragem é de dois segundos 0,5 Hz). Os arquivos de dados contêm os valores das três componentes ortogonais do campo geomagnético ( $H$ ,  $D$  e  $Z$ ). A partir dos dados digitalizados e dispostos em arquivos, tomando-se médias por minuto, nos arquivos com 43200 aquisições, obtemos arquivos de 1440 valores por dia (sendo correspondente a cada minuto). As médias são feitas através do programa Conv Narod 1440.m em linguagem MATLAB.

## **4.2 Eventos Geomagnéticos**

A fim de observar o comportamento das componentes geomagnéticas das observações efetuadas na Estação Geomagnética SMS do OES, CRESPE/INPE-MCT localizada praticamente no centro da AMAS, escolheu-se dois eventos geomagnéticos onde ocorreram tempestades magnéticas com picos de pulsações geomagnéticas característicos das pulsações classificadas como Pc5 – Pc6. Um dos eventos analisados ocorreu entre os dias 21 a 28 de julho de 2004. Outro evento analisado ocorreu nos dias 18 e 19 de agosto de 2004, porém neste projeto comparou-se estes dois dias magneticamente perturbados com dois dias magneticamente calmos para esse mesmo mês, dias 30 e 31 de agosto de 2004. A análise dos dados da Estação Geomagnética de SMS comparados com outras Estações Geomagnéticas fora da AMAS, de EUS e de VSS, indicam uma diferença na intensidade das pulsações geomagnéticas e uma conseqüente diferença na potência do sinal filtrado.

### **4.3.1 Análise da Tempestade Magnética Ocorrida Entre 21 a 29 de Julho de 2004**

A variação diária do campo geomagnético registrada nas Estações Magnéticas do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, representada pela sigla SMS e da Estação Magnética do Observatório Espacial de Eusébio, no Ceará representada pela sigla EUS, para os dias 21 e 29 de julho de 2004 são mostradas nas Figuras 12–15. Esses dois dias são geomagneticamente calmos, com valores para o índice  $\Sigma Kp$  de 6- e 12, respectivamente.

As amplitudes das três componentes do campo mostram-se apenas levemente perturbadas ao longo do dia, atingindo os valores máximos entre 15:00 e 17:00 UT (12:00–14:00 LT) e decrescendo até o valor-de-base inicial e final do dia por volta das 22:00 UT (19:00 LT). Nesses dias não há variações abruptas. A variação do campo geomagnético durante as horas de iluminação pelo Sol, entre 06:00 e 18:00 LT deve-se a intensificação das correntes Sq. As pequenas flutuações, que estão superpostas à variação diária, são as pulsações geomagnéticas.

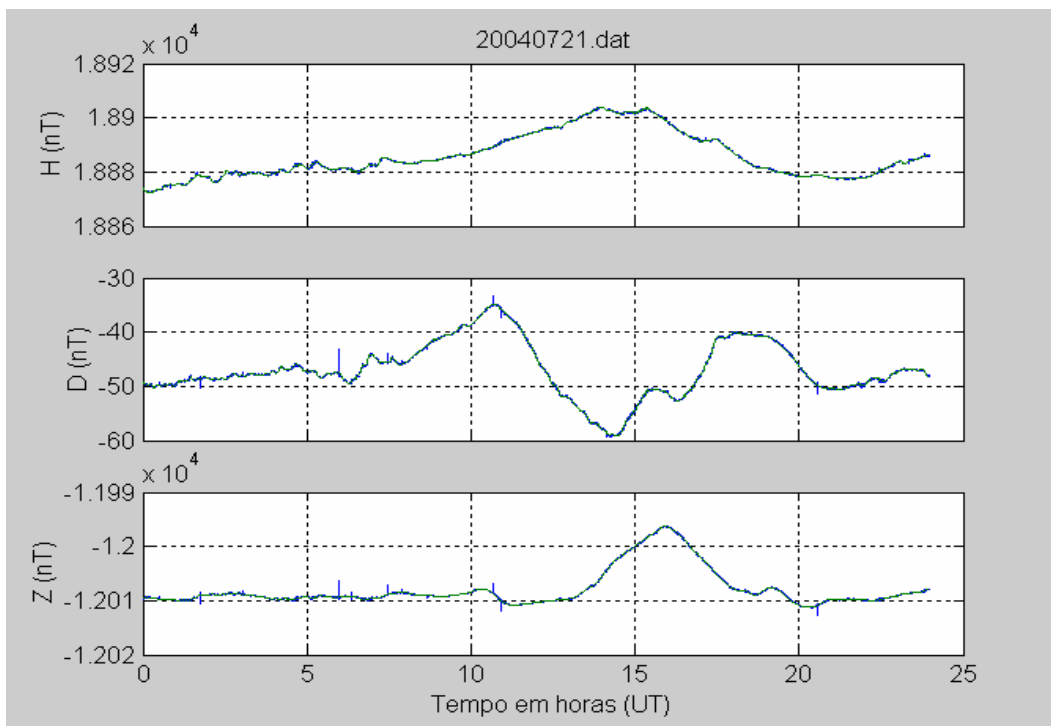


Figura 12 – Componentes H, D e Z para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do dia 21 de julho de 2004, magneticamente calmo (antes da tempestade), com um índice  $\Sigma Kp = 6-$  .

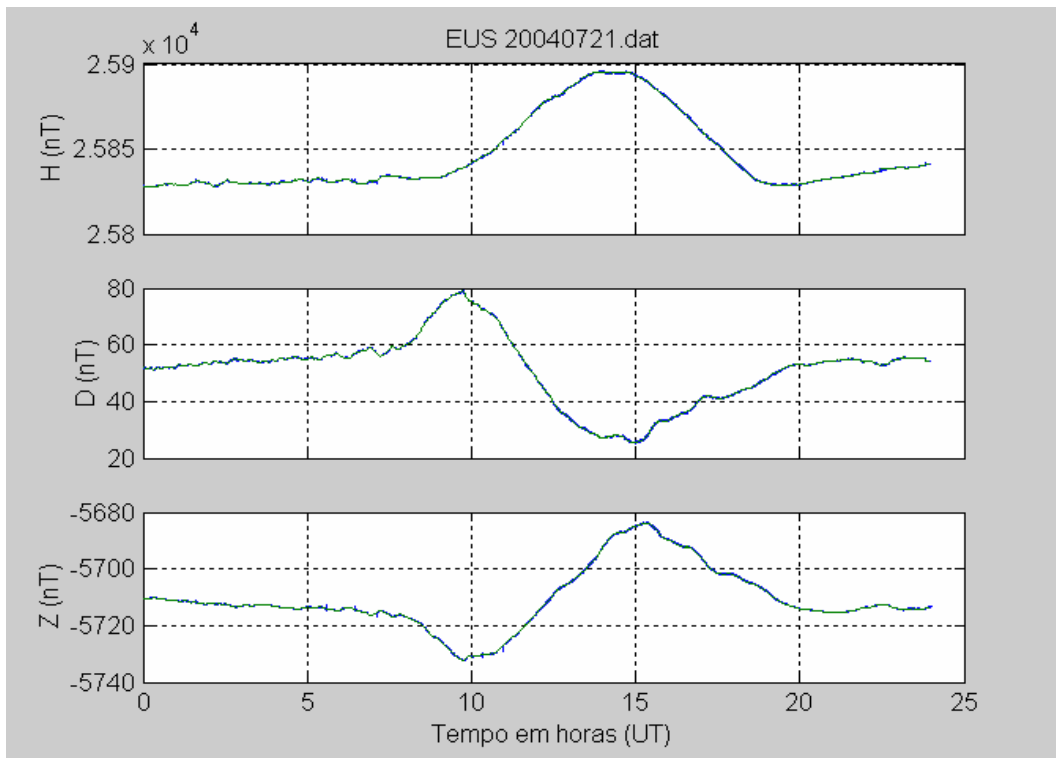


Figura 13 – Componentes H, D e Z para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, do dia 21 de julho de 2004 magneticamente calmo (antes da tempestade), com um índice  $\Sigma Kp = 6-$ .

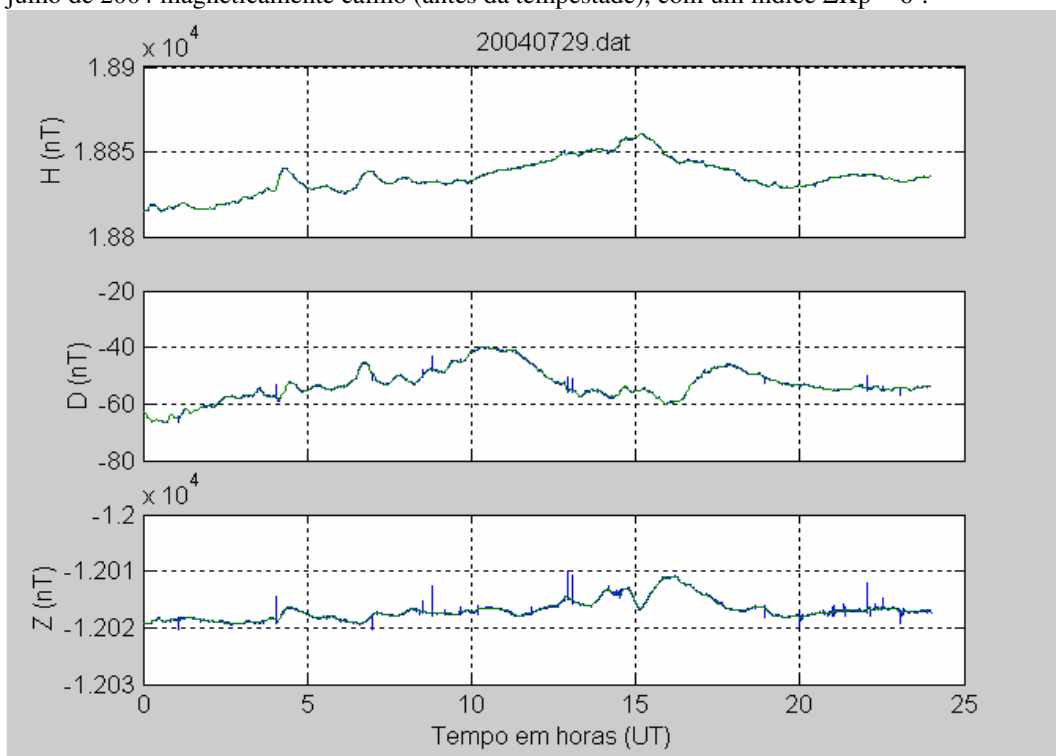


Figura 14 – Componentes H, D e Z para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE – MCT, do dia 29 de julho de 2004 magneticamente calmo, (depois da tempestade), com um índice  $\Sigma Kp = 12o$ .

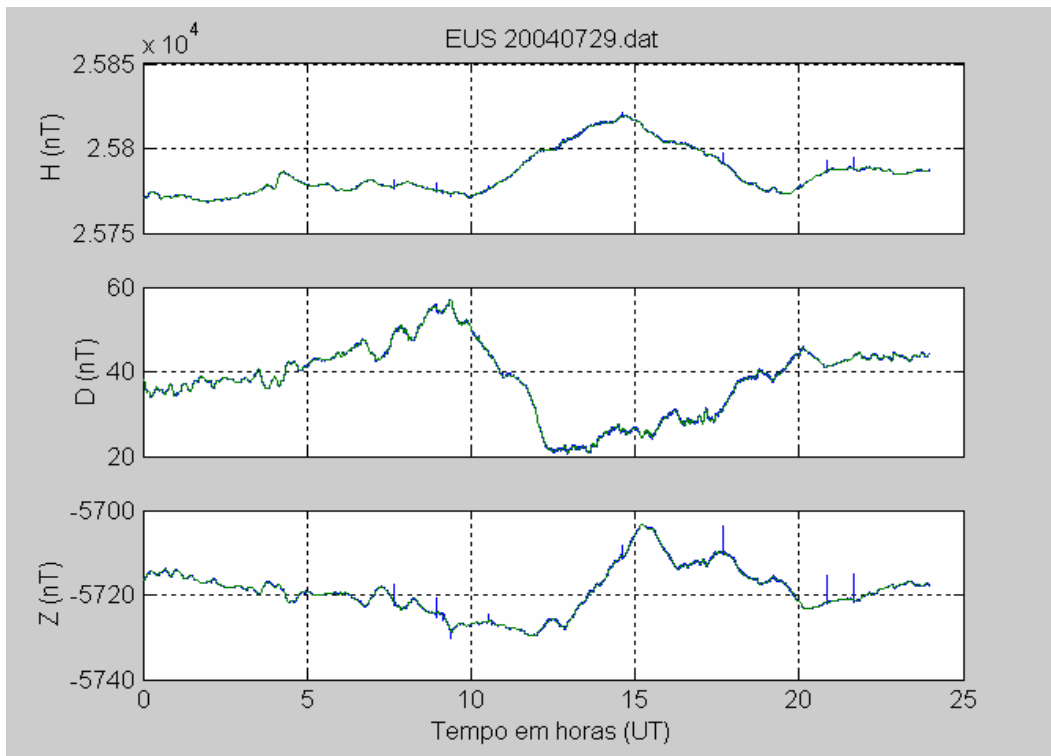


Figura 15 – Componentes H, D e Z para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, do dia 29 de julho de 2004 , magneticamente calmo, com um índice  $\Sigma Kp = 12o$ .

Nas Figuras 16 a 29 são mostrados os gráficos das três componentes magnéticas  $H$ ,  $D$  e  $Z$  para os dias de tempestade magnética. Observamos que as amplitudes das três componentes do campo mostram-se variações abruptas ao longo do dia com picos máximos situados em horários diferentes do meio-dia local. Para os dias de tempestade (22 a 28 de julho de 2004) temos um índice  $\Sigma Kp = 23-$ ,  $38o$ ,  $33+$ ,  $58+$ ,  $29o$ ,  $60-$  e  $24o$  respectivamente.

O início súbito associado à tempestade por volta das 11:00 UT, do primeiro dia, 22 de julho de 2004 é mostrado nas Figuras 16 e 17 para SMS e EUS. O tempo permanece geomagneticamente perturbado até o dia 28 de julho de 2004, como mostrado nas Figuras 18-29, para as estações SMS e EUS. Sendo que a tempestade atinge o auge no dia 27 de julho de 2004, onde o índice Dst para esse dia, fornecido pela Universidade de Kioto, por volta das 14:00 UT acusa  $-197$  nT.

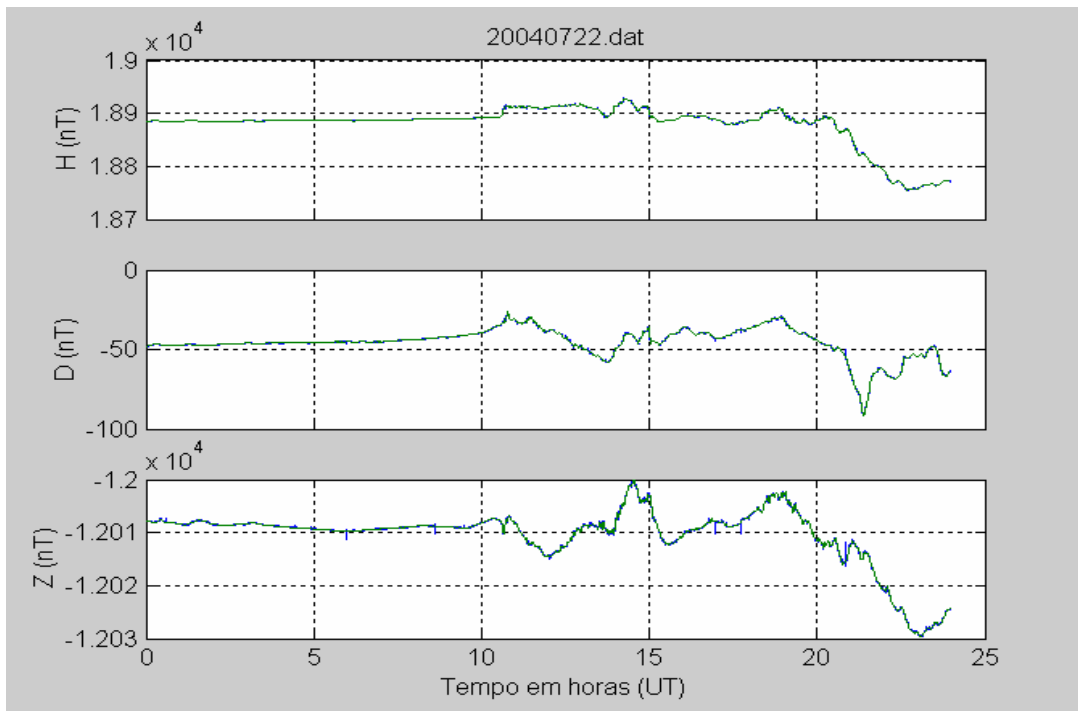


Figura 16 – Aumento abrupto durante a tempestade iniciada em 22 de julho de 2004 ( $\Sigma K_p = 23-$ ), para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

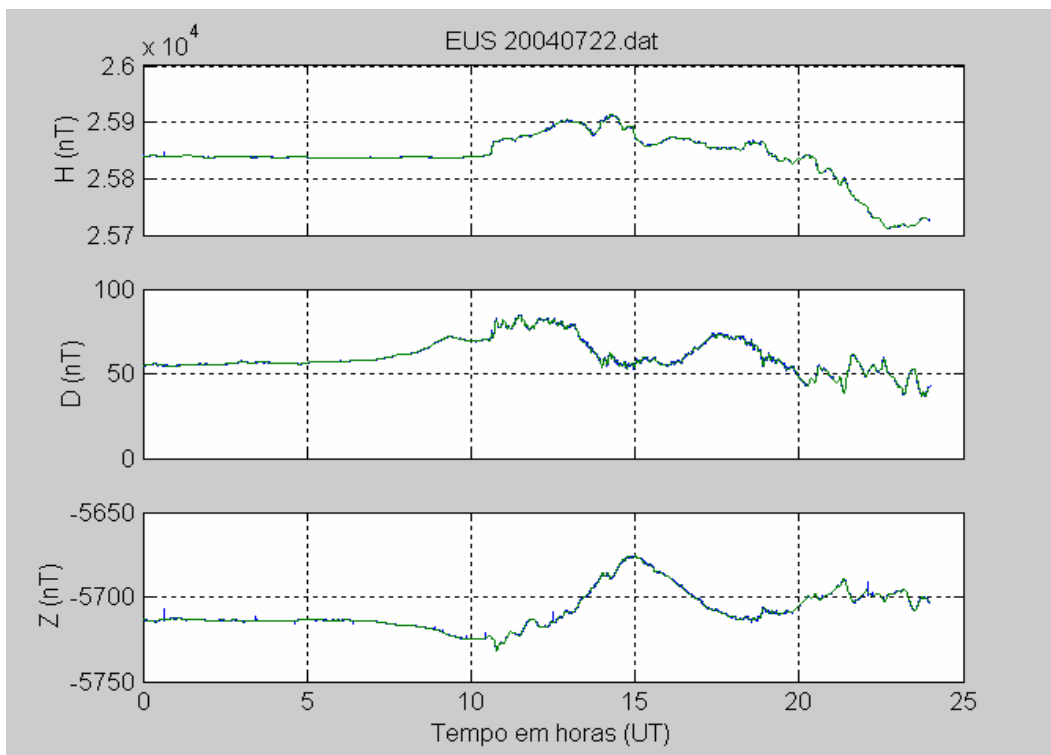


Figura 17 – Aumento abrupto da componente H durante a tempestade iniciada em 22 de julho de 2004 ( $\Sigma K_p = 23-$ ), para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS.



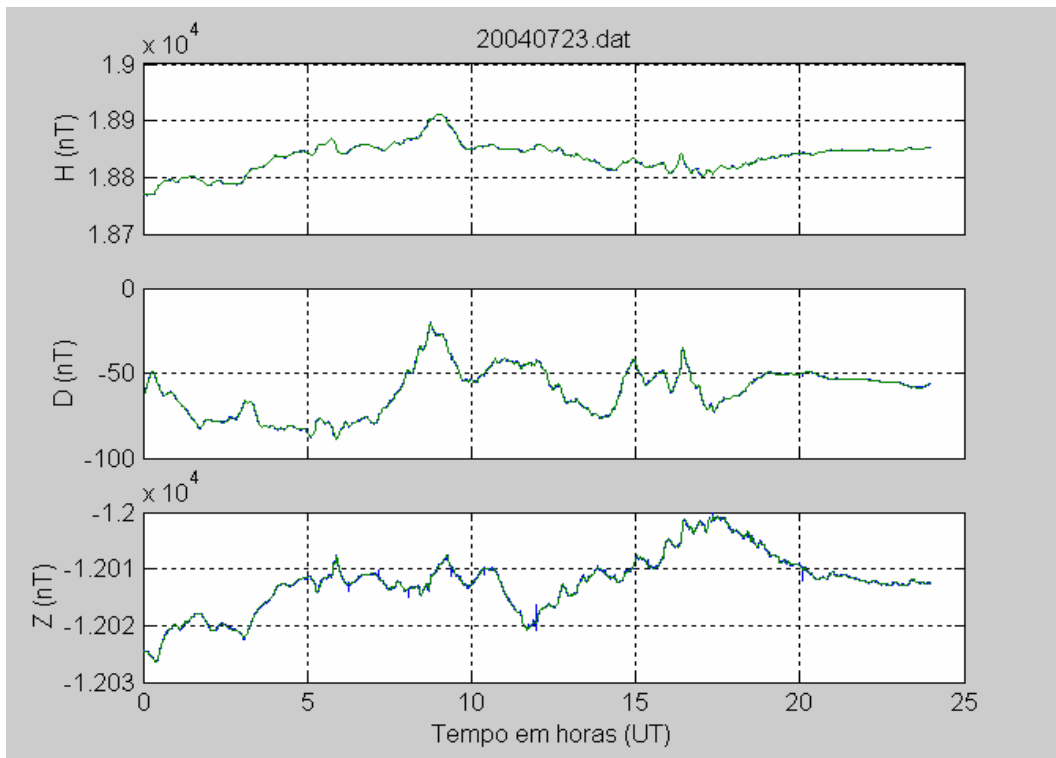


Figura 18 – comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 23 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do, com um índice  $\Sigma Kp = 38o$  .

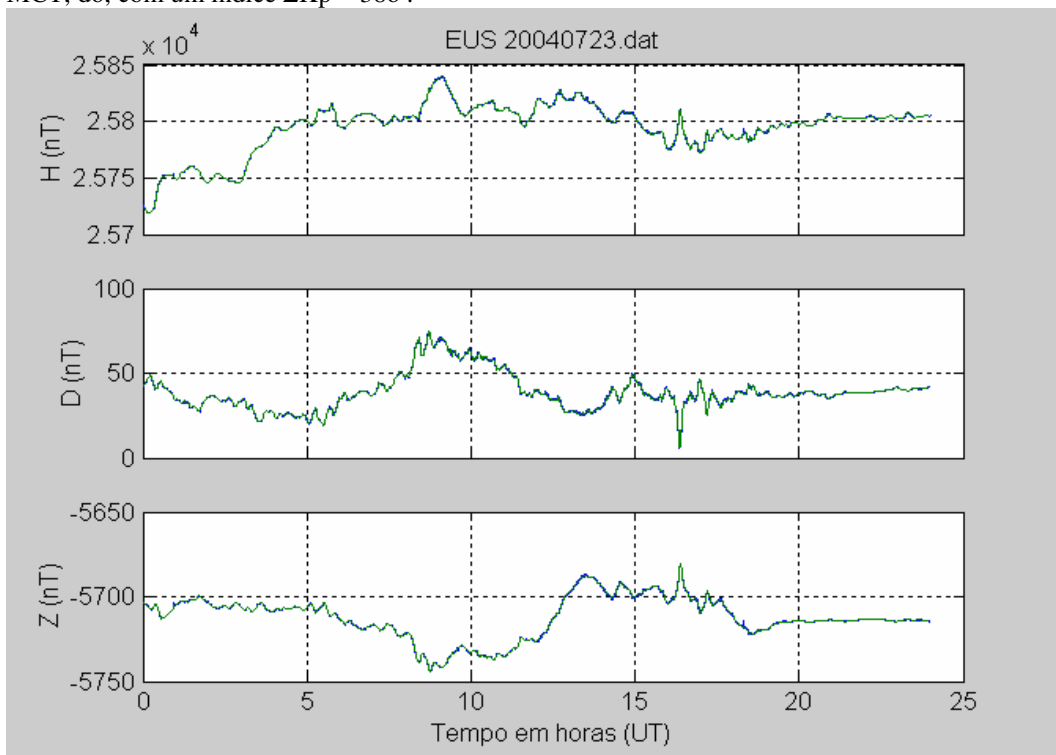


Figura 19 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 23 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 38o$ .

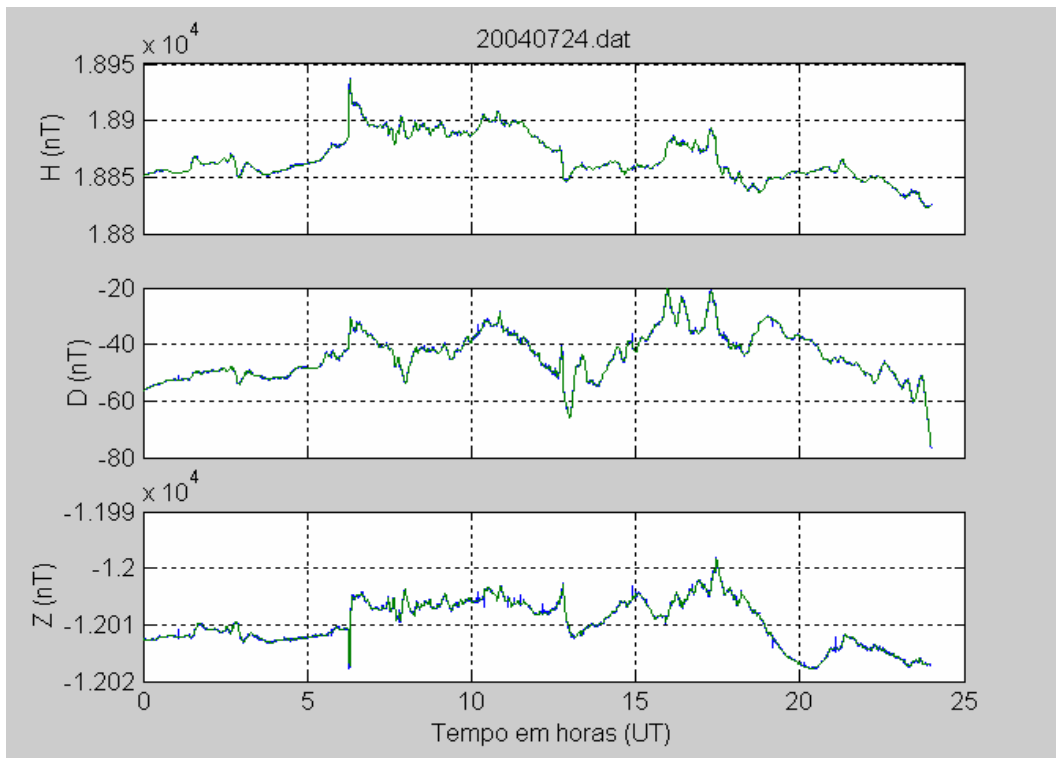


Figura 20 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 24 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, do, com um índice  $\Sigma Kp = 33+$  .

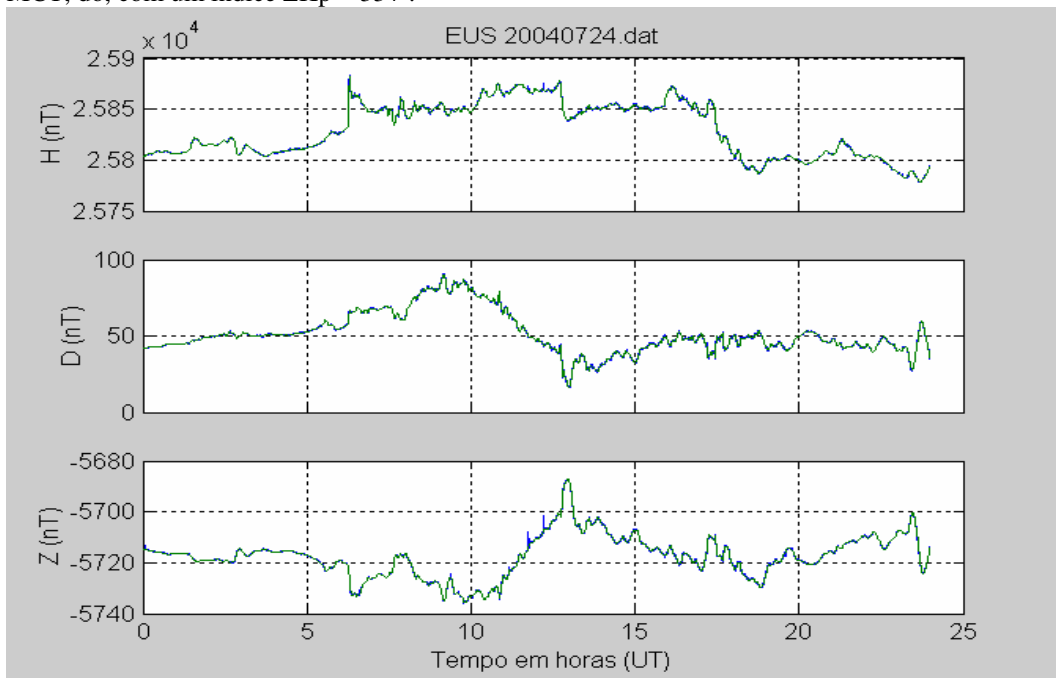


Figura 21 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 24 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 33+$ .

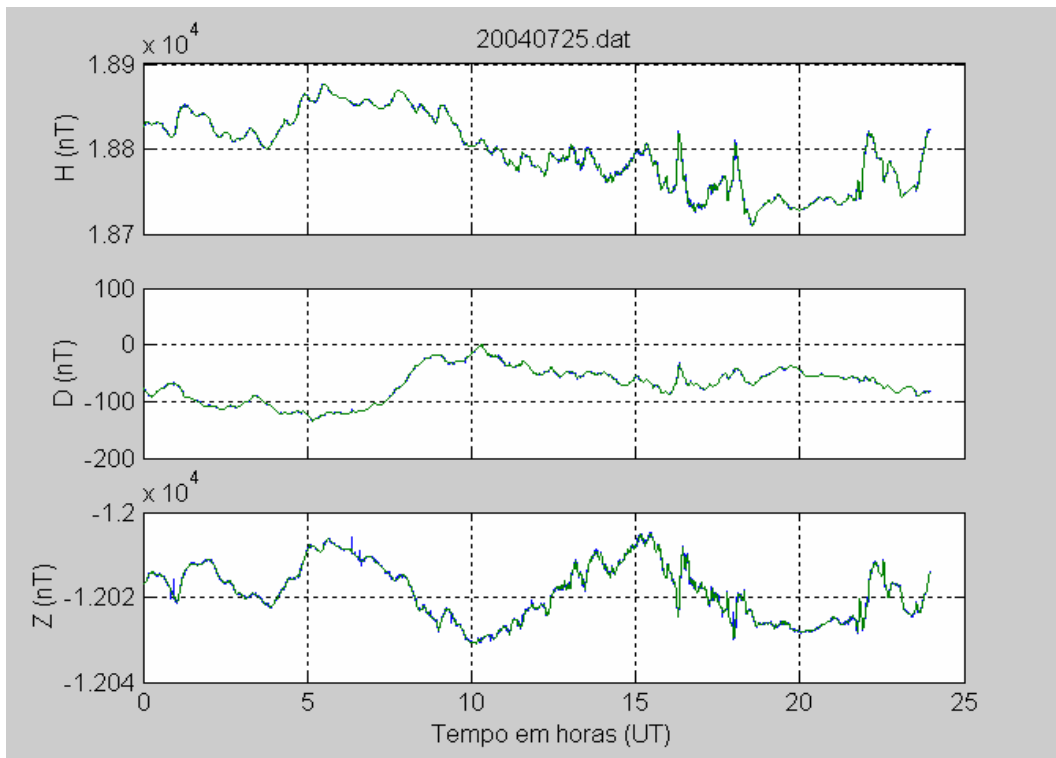


Figura 22 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 25 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 58+$  .

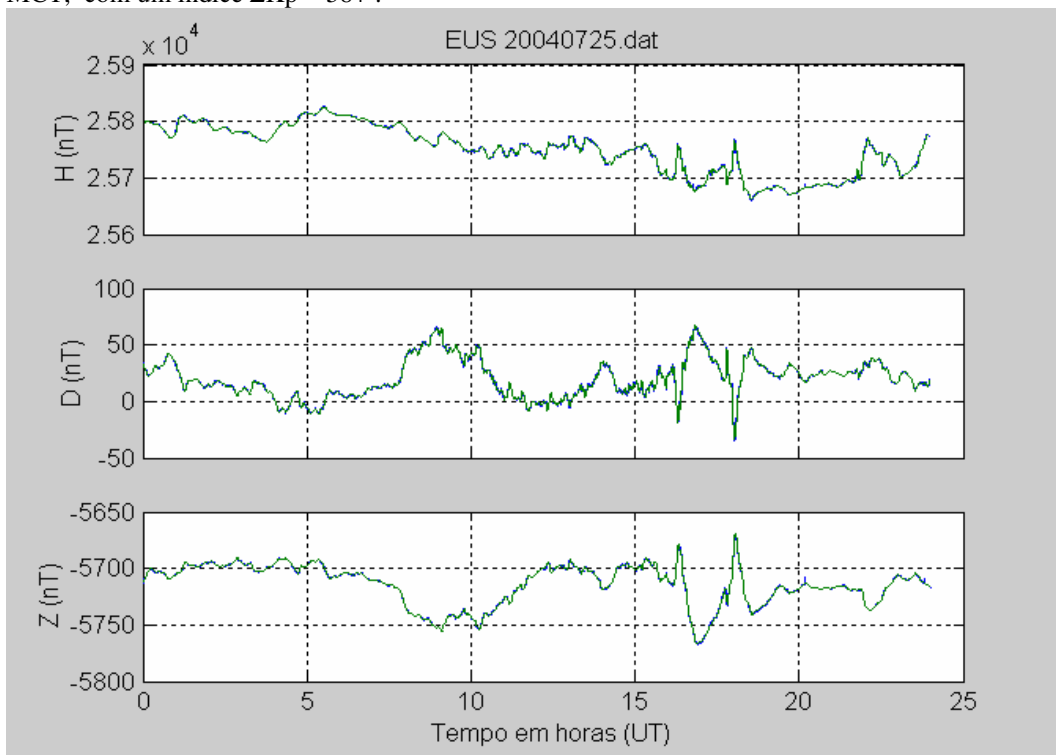


Figura 23 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 25 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 58+$ .

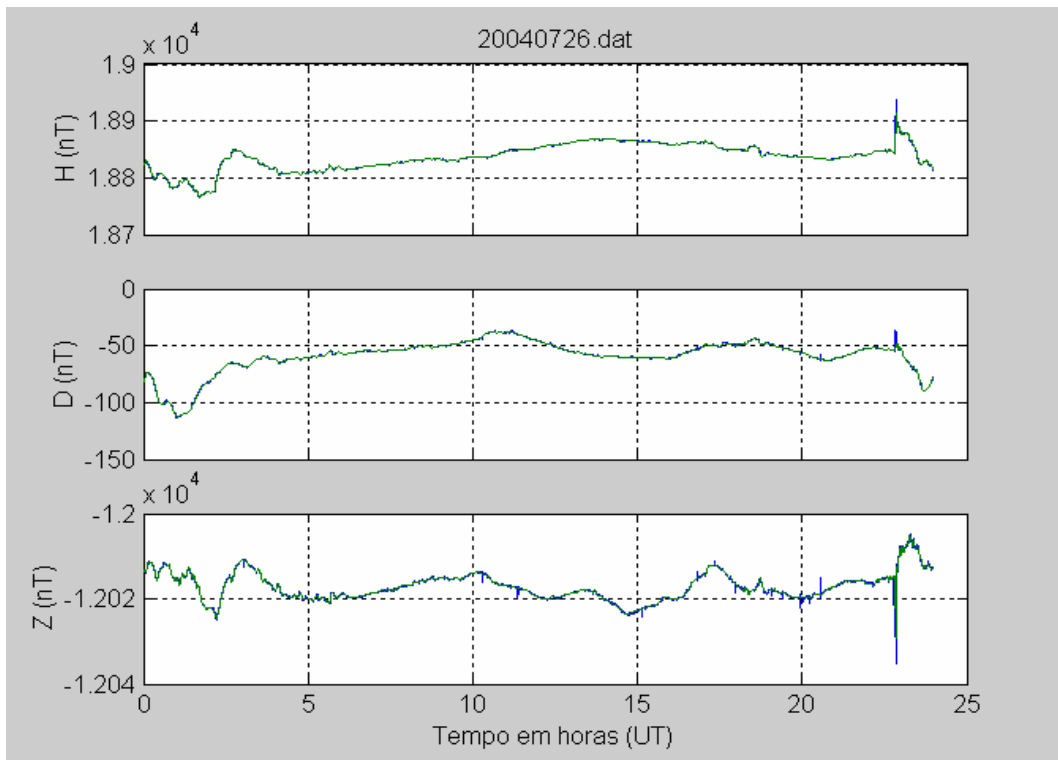


Figura 24 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 26 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 29o$  .

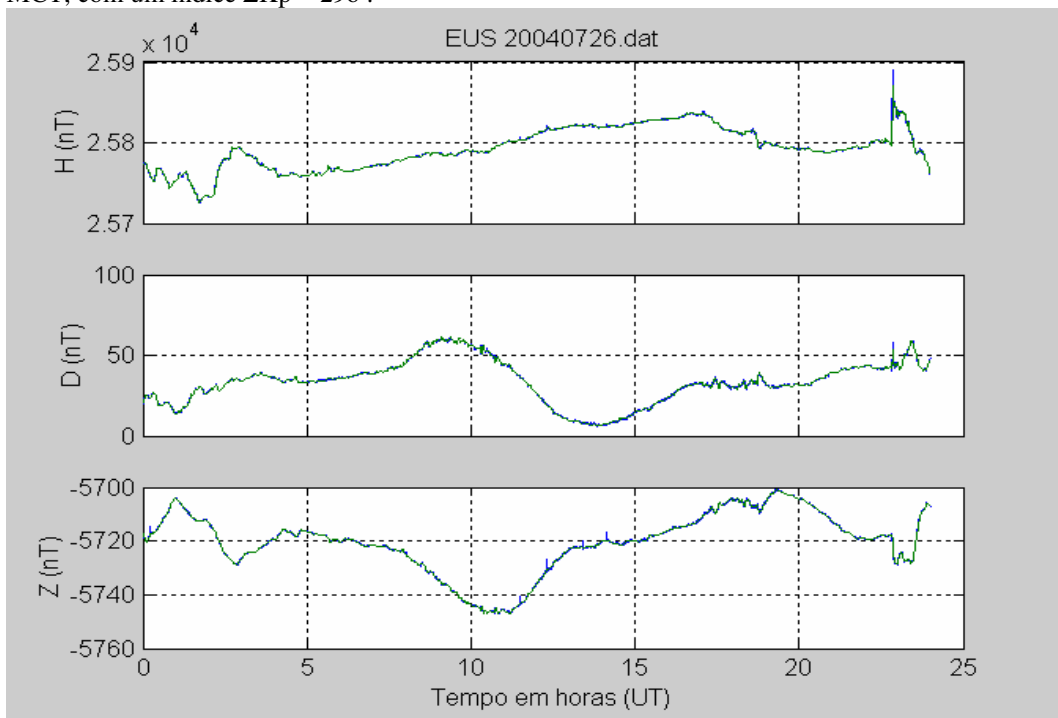


Figura 25 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 26 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 29o$  .

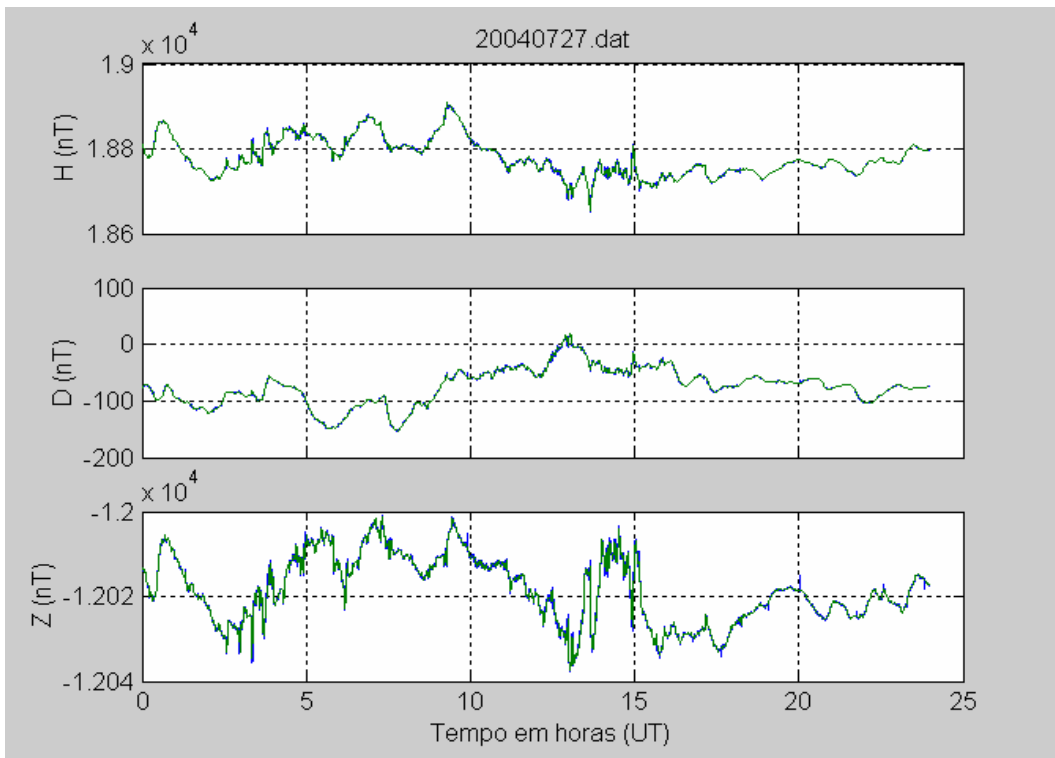


Figura 26 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 27 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 60-$ .

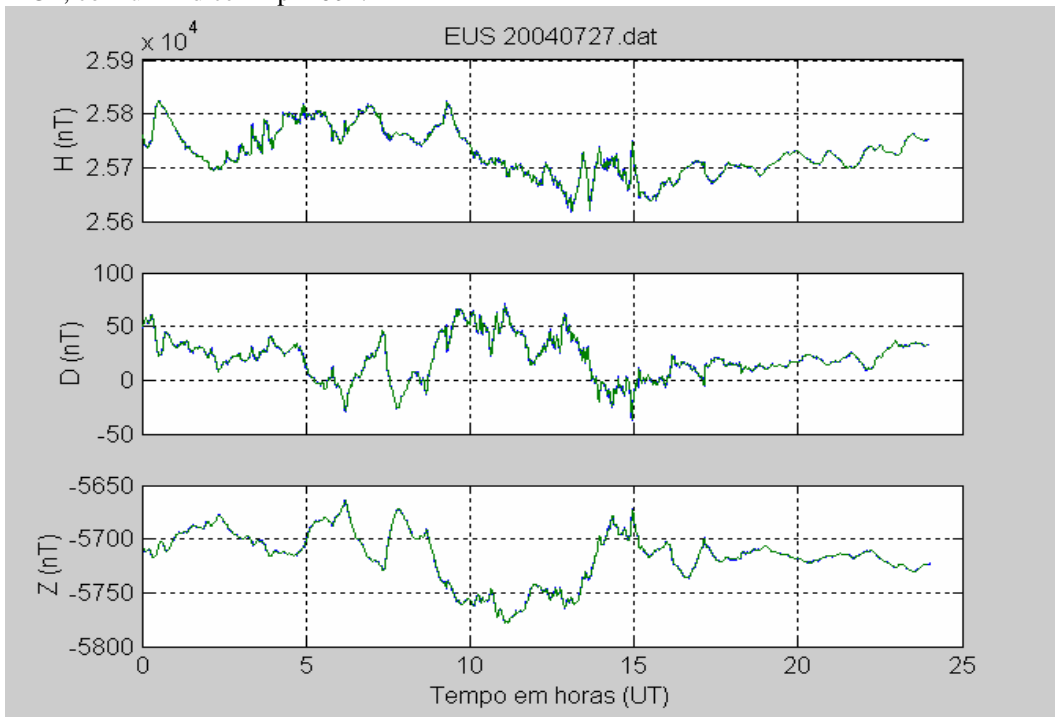


Figura 27 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 27 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 60-$ .

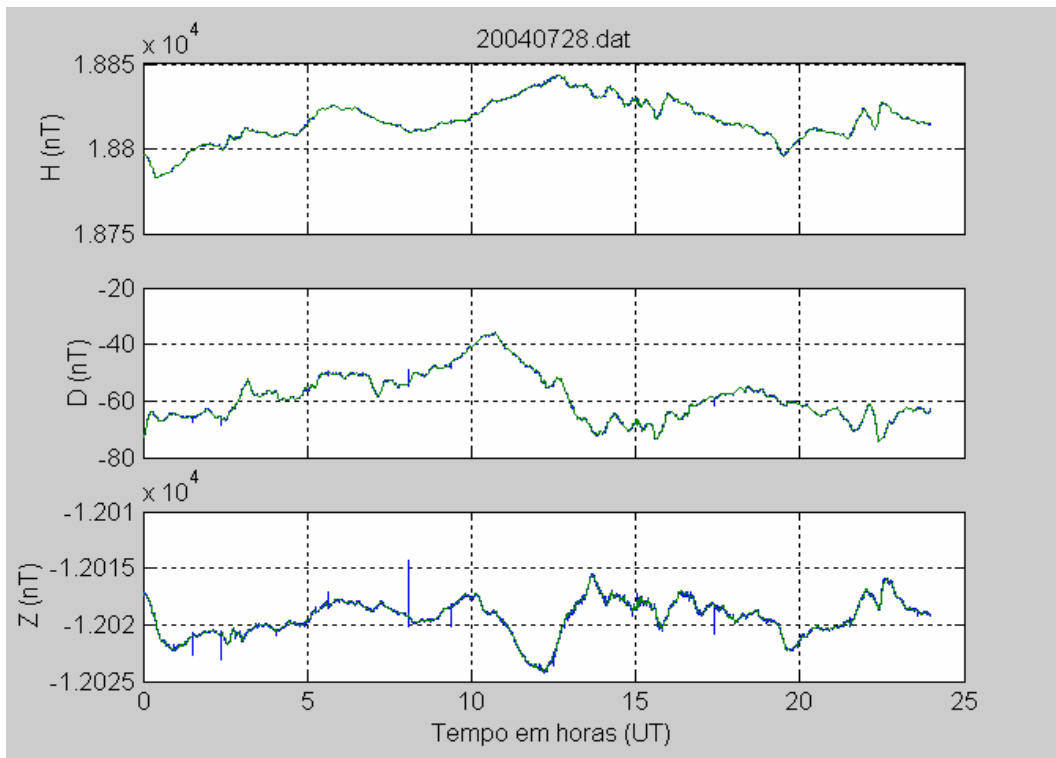


Figura 28 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 28 de julho de 2004, para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, com um índice  $\Sigma Kp = 24o$  .

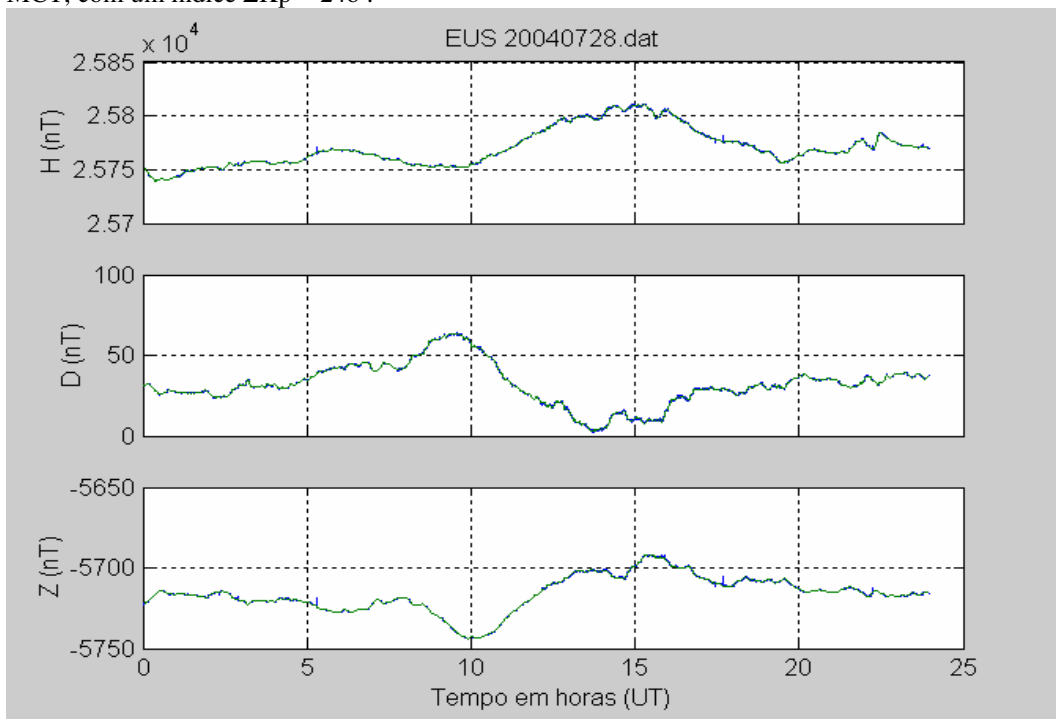


Figura 29 – Comportamento das três componentes geomagnéticas H, D e Z para o dia 28 de julho de 2004, para o Observatório Magnético de Eusébio, EUS, com um índice  $\Sigma Kp = 24o$  .

#### **4.3.2 Filtragem dos Dados**

As curvas da variação diária (como nas Figuras 12–15) mostram que o campo geomagnético apresenta mudanças numa faixa muito grande de períodos, que vai desde segundos até horas. As pequenas flutuações desde 100 até 1000 segundos é o objeto de estudo deste trabalho. Para isto, torna-se necessário filtrar a variação diária de modo que a saída contenha os sinais com períodos (ou frequências) dentro da faixa de interesse. Previamente os dados são ponderados a cada 60 segundos, resultando em uma taxa de 1 amostra por minuto (1.440 pontos por dia) e numa frequência de Nyquist de 1/120 Hz (com período associado de 120 segundos).

Para realizar as filtrações dos dados foi utilizado um filtro digital passa-banda (no domínio do tempo), com saída na faixa de frequência de 1/900 a 1/180 hertz (períodos na faixa de 180 a 900 segundos). A aplicação desse filtro na variação diária original das componentes *H* (Norte-Sul) e *D* (Leste-Oeste) do campo geomagnético permite obter sinais de pulsações na faixa de frequência que se deseja estudar.

Nas filtrações digitais se excluiu a componente *Z*, por ela ter grande contribuição da componente induzida da Terra e não variações de fontes externas ao planeta. Os dados das Estações Geomagnéticas SMS e de EUS são analisados durante todas as horas dos dias da tempestade.

#### **4.3.3 Filtragem dos Dados Para os Dias Magneticamente Calmos**

As pulsações geomagnéticas para os períodos geomagneticamente calmos são representados nas Figuras 30-33. Observa-se que o comportamento das pulsações geomagnéticas das componentes *H* e *D*, nas figuras 30 e 31, são de um dia magneticamente calmo onde a componente *H* apresenta uma amplitude em torno de 1,4 nT e a componente *D* apresenta uma amplitude em torno de 0,9 nT.

A normalização das componentes durante o dia 29 de julho de 2004, após o período de 8 dias de tempestade são apresentados nas figuras 32 e 33. Pode-se observar que o comportamento das componentes *H* e *D* são típicos de um dia magneticamente calmo, ou seja, com picos em torno do meio dia local. Os gráficos

de potência espectral (PPD) e de polarização (DEG), para as duas estações, são pouco sensibilizados.

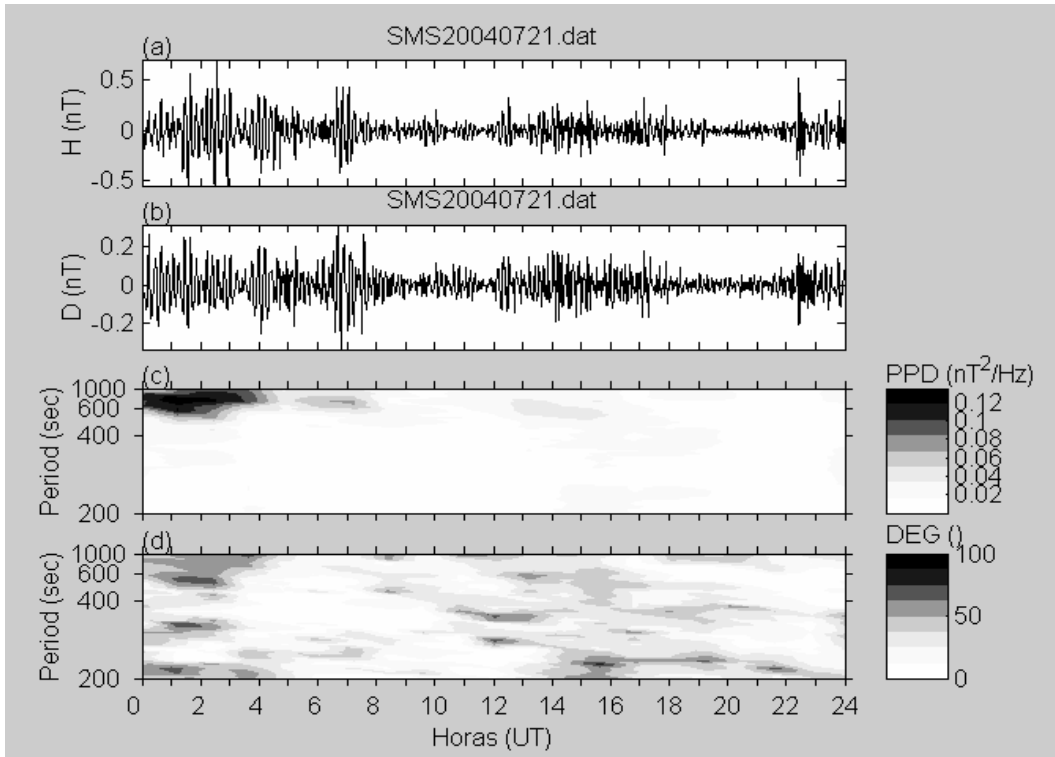


Figura 30 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 21 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

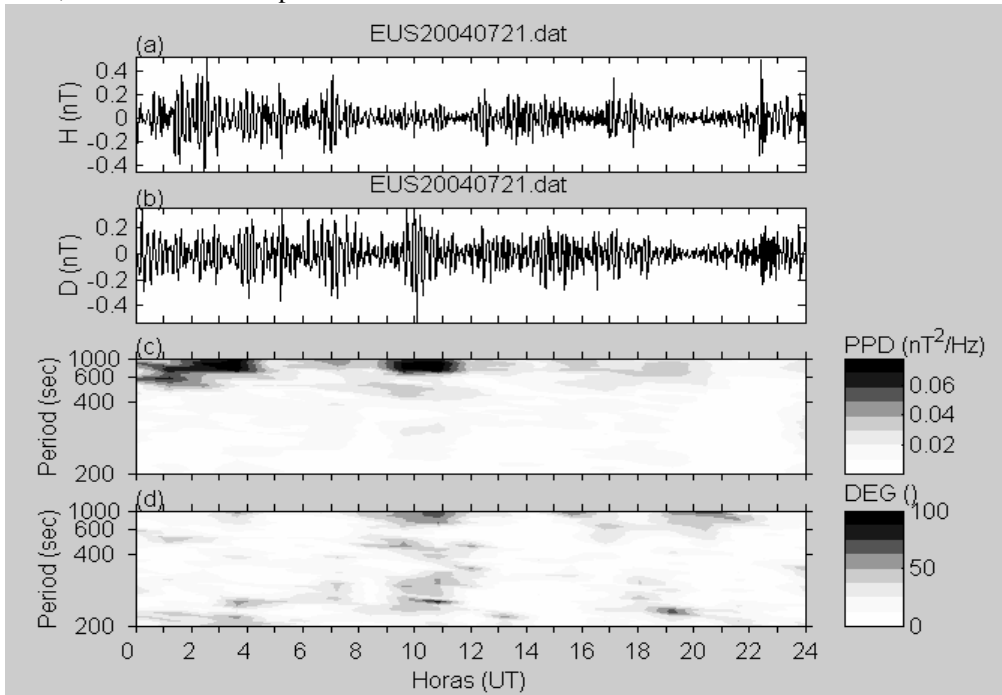


Figura 31 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 21 de julho de 2004, na Estação EUS.



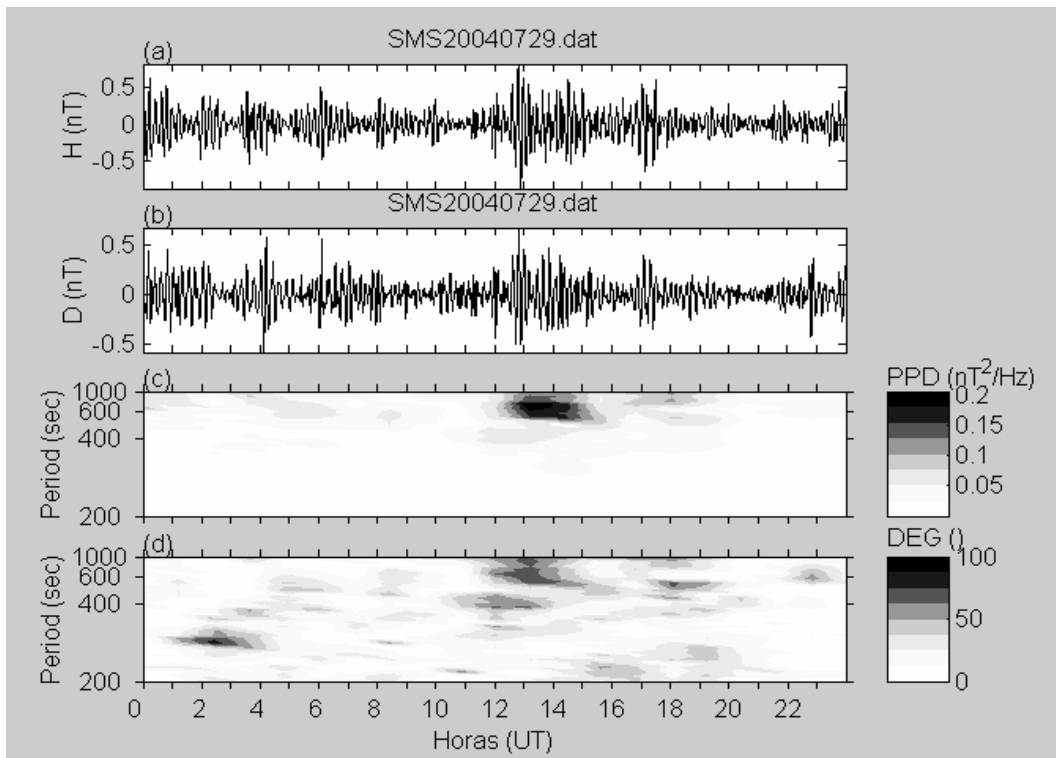


Figura 32 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 29 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

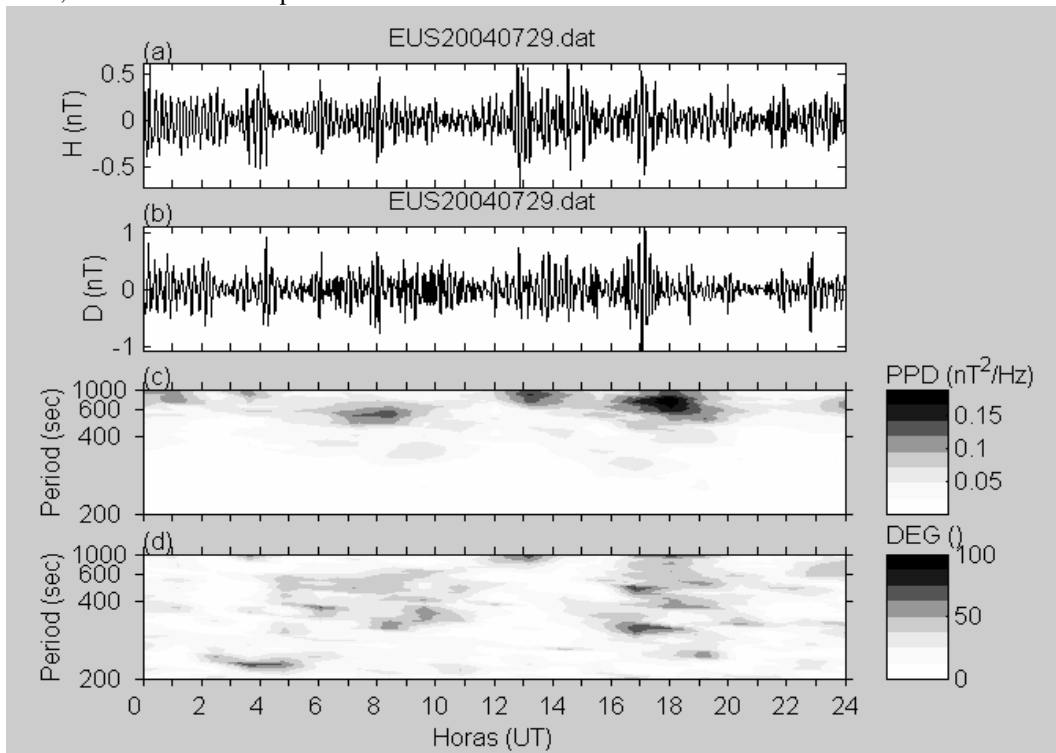


Figura 33 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 29 de julho de 2004, na Estação EUS.

#### 4.3.4 Filtragem dos Dados Para os Dias Magneticamente Perturbados

Foi observado nos dados apresentados nas Figuras 34-47 atividades intensas em alguns periodos, cuja análise segue abaixo. Nós sujeitamos os dados de  $H$  e de  $D$  a uma análise espectral e computamos parâmetros da polarização das pulsações. Uma tentativa é feita de explicar os resultados devido às diferenças grandes de valores da declinação nas duas estações e também à presença da AMAS.

O algoritmo utilizado para confeccionar os gráficos detectou as variações de períodos longos na faixa de 180 a 900 segundos. De cima para baixo, os dois primeiros gráficos –  $H(nT)$  e  $D(nT)$  – medem as Pc5-Pc6, o terceiro gráfico – PPD – mede a densidade de potência polarizada e o ultimo gráfico mede o grau de polarização – DEG – ou *degree of polarization*.

Analisando o espectro das 24 horas do dia 22 de julho de 2004 em SMS, Figura 34, percebemos que os primeiros sinais de Pc5-Pc6 são detectados perto das 10:30 UT, representando o começo da tempestade. O pico mais intenso para este dia é atingido em torno das 15:00 UT. O gráfico PPD é sensibilizado num período de aproximadamente 600-1000 s, entre as 15:00-17:00 UT, enquanto que o gráfico DEG mostra um grau de polarização em torno de 70%, na banda de período entre 300-1000s, em torno das 09:30 UT. Analisando o espectro deste mesmo dia para a Estação Geomagnética de EUS, Figura 35, percebe-se que os picos das componentes  $H$  e  $D$  são similares as observadas na Estação Geomagnética de SMS, no entanto os dados do gráfico da DEG são fracamente sensibilizado em torno das 09:30 UT e os dados do gráfico da PPD é sensibilizado num período de aproximadamente 600-1000 s, entre as 19:00-24:00 UT.

Voltamos a ter perturbações abruptas no dia 23 de julho de 2004, quando o sinal da componente  $H$  registra pulsações típicas das Pc5 – Pc6 em torno das 08:30 UT, ver Figuras 36-37. Importante observar que o sinal da componente  $H$  para a Estação Geomagnética de SMS apresenta variações maiores. Observamos que somente o gráfico da PPD da Estação Geomagnética SMS é levemente sensibilizado em torno das 08:30 UT numa faixa de período de 600-900 s. O gráfico da PPD é sensibilizado entre 16:00-18:30 UT, nas duas Estações, num período de

aproximadamente 600-1000 s, onde há uma potência maior para os dados da Estação Geomagnética de EUS. O gráfico da DEG é fracamente sensibilizado.

No dia 24 de julho de 2004, a tempestade se estabiliza até em torno das 06:00 UT, começando aí uma nova fase de variações durando até as 18:00 UT, como pode ser verificado nas figuras 38-39. O primeiro pico registrado em torno das 06:00 UT é típico de Pc-6. O gráfico da PPD acusa uma densidade de potência polarizada forte entre as 04:30-07:00 UT numa faixa de período desde 400-1000 s. Notamos que a potência é maior para os dados da Estação Geomagnética SMS. Nesse mesmo intervalo de tempo o gráfico da DEG apresenta dados com um grau de polarização de onda próximo a 100% num período em torno de 500s.

A partir das 19:00 UT do dia 24 de julho até em torno das 10:00 UT do dia 25 de julho de 2004 a tempestade se estabiliza, ver Figura 40-41. Depois das 10:00 UT começa uma nova fase de variações onde a ápice do dia, para a Estação Geomagnética SMS, é atingido em torno das 16:15 UT, e para a Estação Geomagnética de EUS, é atingido em torno das 18:00 UT, onde a amplitude do sinal é típica das Pc5 – Pc6. Os dados dos gráficos da PPD são sensibilizados, em SMS e EUS, entre as 16:00-20:00 UT num período de 500-1000s, enquanto que o gráfico DEG mostra um grau de polarização de onda em torno de 50 %, para EUS, na banda de período de 300-100-s, e em SMS é fracamente sensibilizado.

No dia 26 de julho de 2004 a tempestade vai perdendo intensidade durante a madrugada até se estabilizar em torno das 06:00 UT. As variações seguem estáveis até em torno das 23:00 UT onde começa a fase mais forte da tempestade, com picos característicos das Pc5-Pc6, conforme Figuras 42-43. Esta nova fase dura até em torno das 18:00 UT do dia 27 de julho de 2004, ver Figuras 44-45. O gráfico da PPD é sensibilizado, no dia 26 de julho, em torno das 24:00 UT numa banda de período desde 300-1000 s, em SMS e EUS. O gráfico DEG, para SMS, é sensibilizado levemente durante todo o dia e é mais fortemente sensibilizado, agora também em EUS, entre 23:00-24 UT numa banda de período de 200-1000 s, com um grau de polarização de onda próximo a 80 %.

O dia 27 de julho de 2004 segue com variações abruptas típicas das Pc5-Pc6 até em torno das 18:00 UT. Percebemos, mais uma vez, que as variações da componente *H* para SMS são maiores. Em SMS o gráfico PPD é levemente

sensibilizado em torno das 03:00 UT e registra a maior potência da tempestade em torno das 15:00 UT numa banda de período entre 600-1000 s. Em EUS o gráfico PPD também é levemente sensibilizado em torno das 03:00 UT e mais fortemente sensibilizado em torno das 15:00 UT numa banda de período entre 600-1000 s, porém a potência é menor em relação a SMS. O gráfico DEG é sensibilizado entre 01:00-06:00 UT em toda a banda de período com um grau de polarização de onda maior em SMS.

No dia 28 de julho de 2004 a tempestade começa a perder intensidade até se estabilizar no dia 29 de julho de 2004 indicando o fim da tempestade, conforme Figuras 46-47. O gráfico da PPD registra em SMS uma densidade de potência polarizada entre 15:00-18:00 UT numa banda de período de 600-1000 s. O gráfico da PPD em EUS também é sensibilizado nesta banda de período e é sensibilizado entre as 01:00-04:00 UT numa banda de período de 700-1000 s.

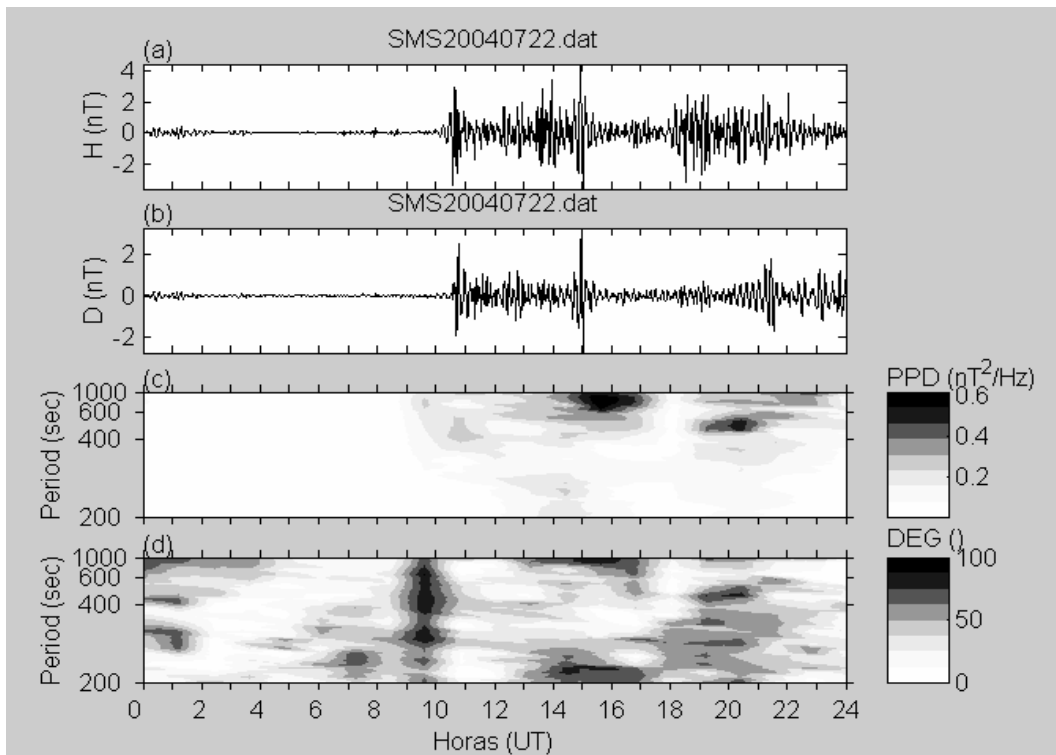


Figura 34 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 22 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

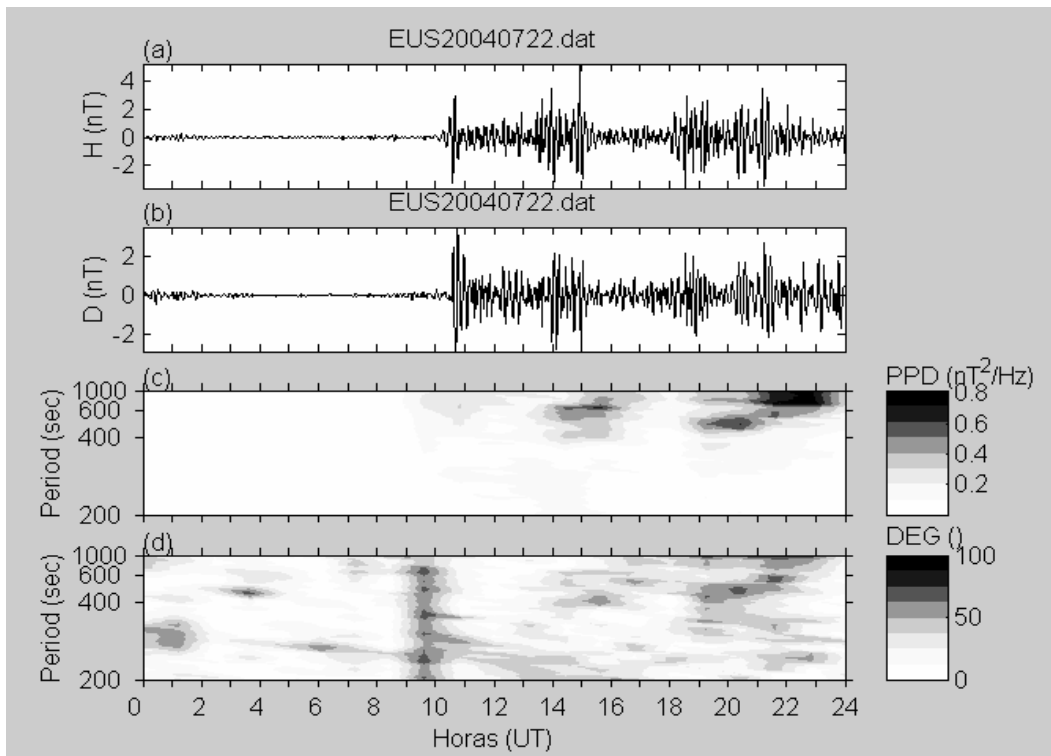


Figura 35 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 22 de julho de 2004, na Estação EUS.

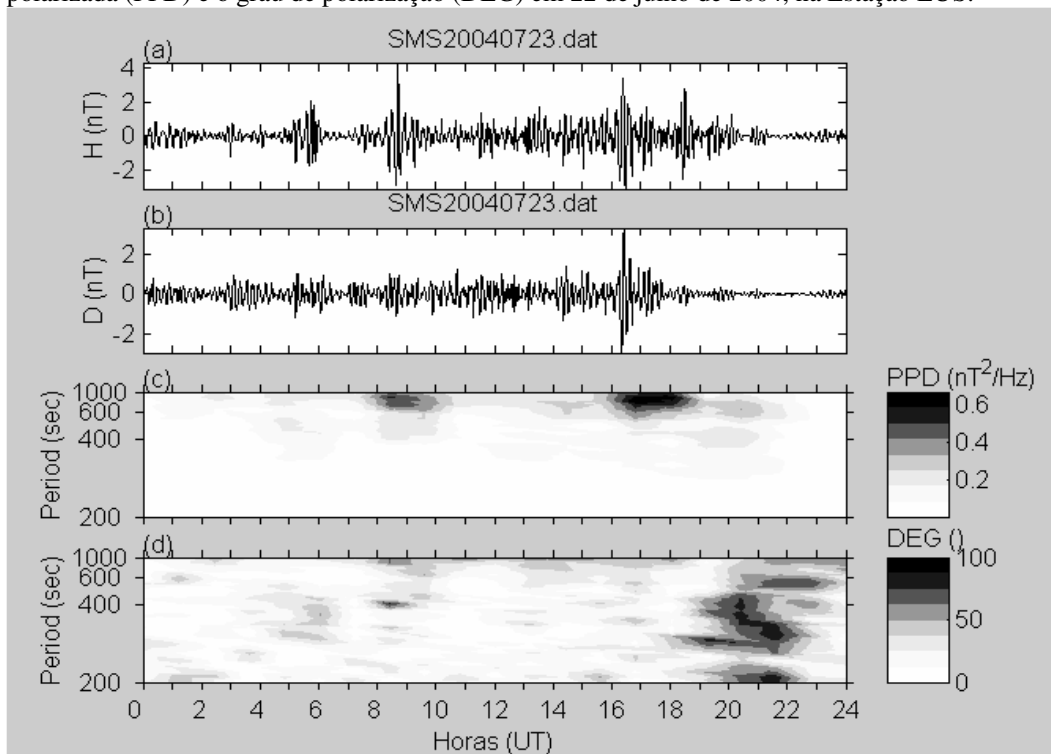


Figura 36 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 23 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

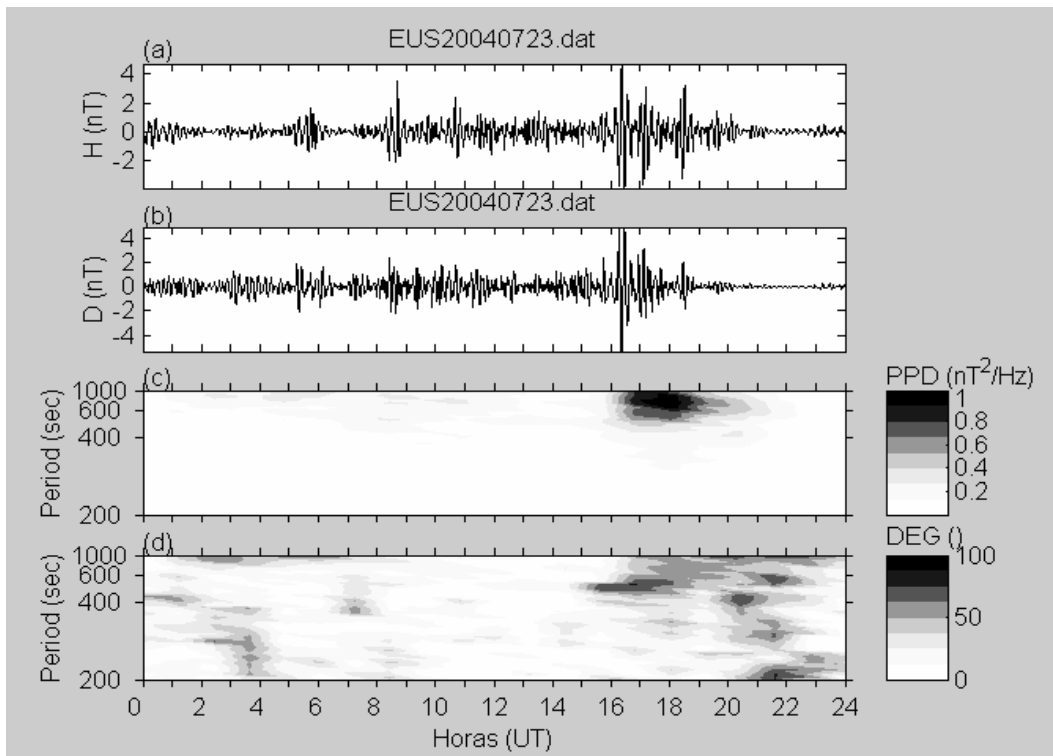


Figura 37 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 23 de julho de 2004, na Estação EUS.

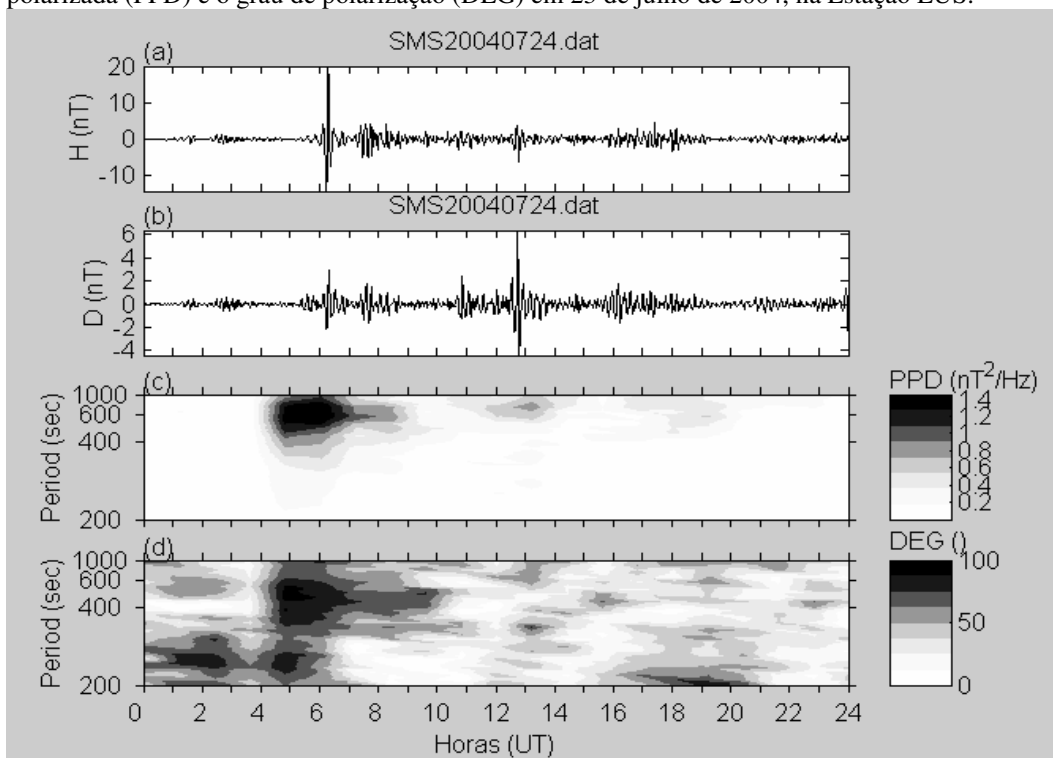


Figura 38 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 24 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

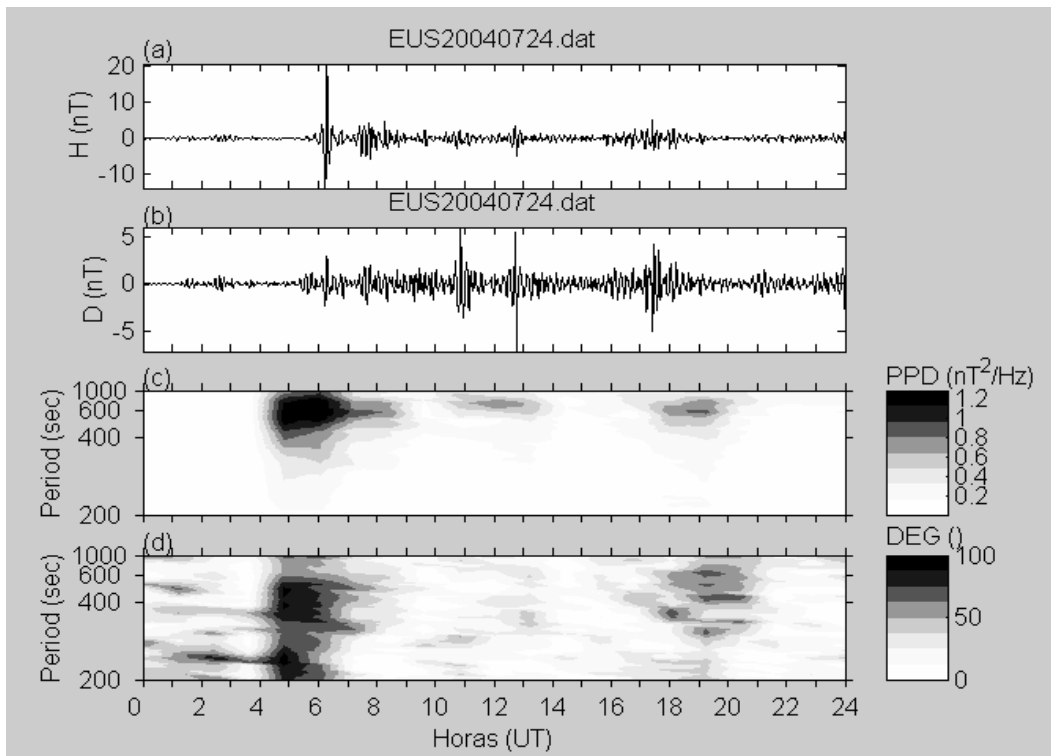


Figura 39 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 24 de julho de 2004, na Estação EUS.

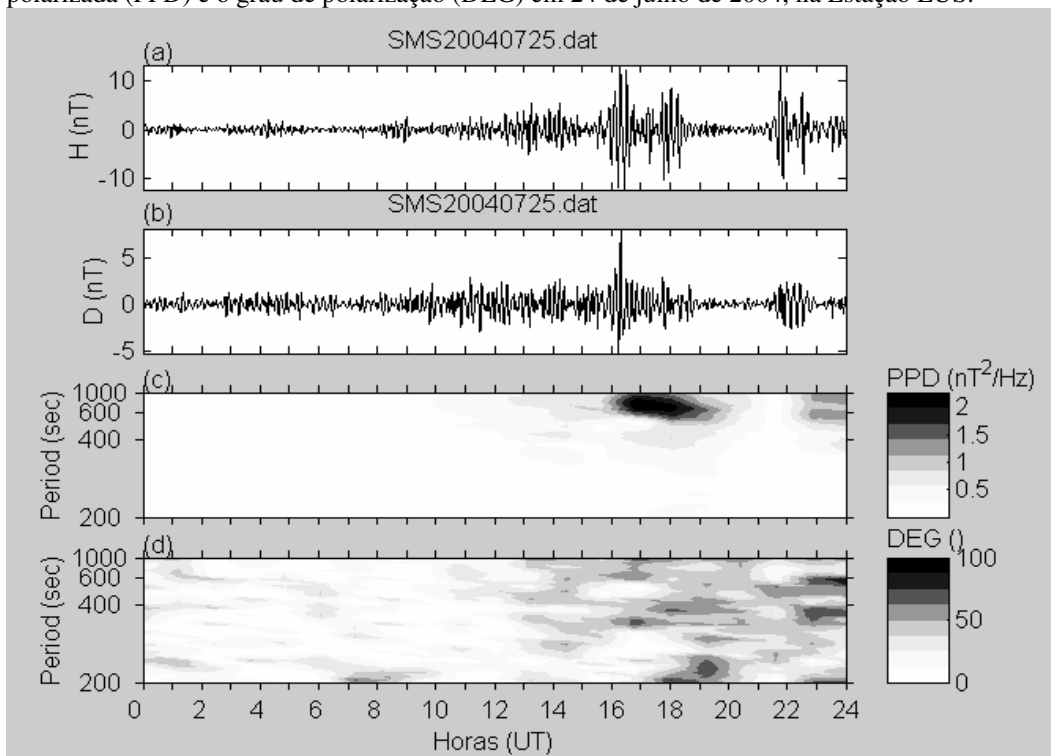


Figura 40 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 25 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

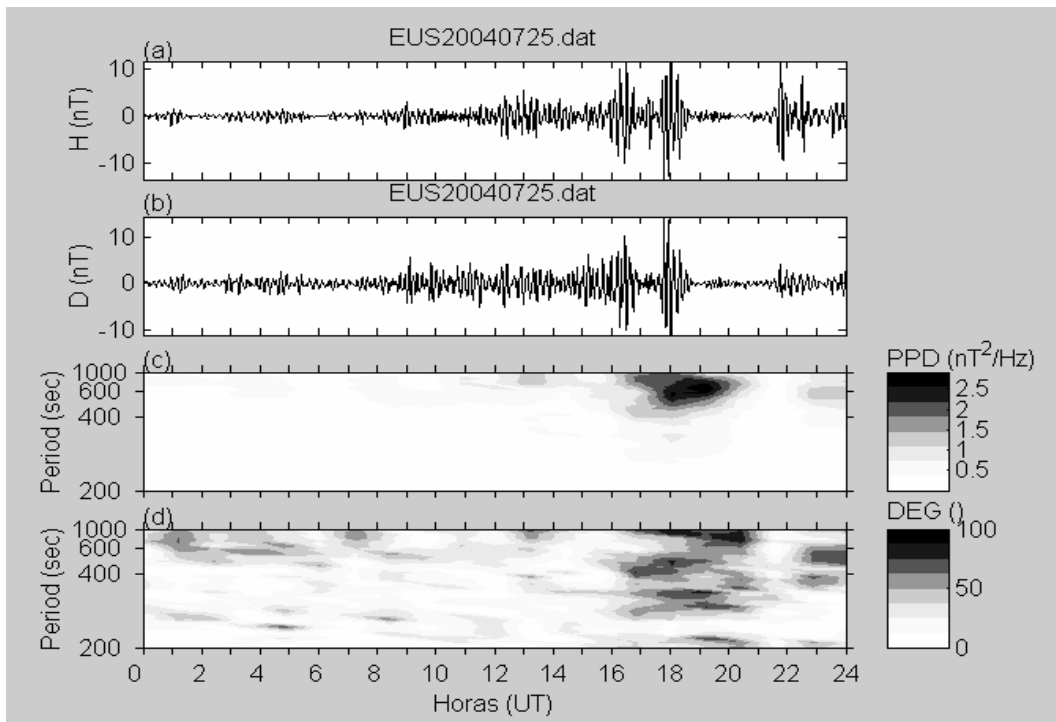


Figura 41 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 25 de julho de 2004, na Estação EUS.

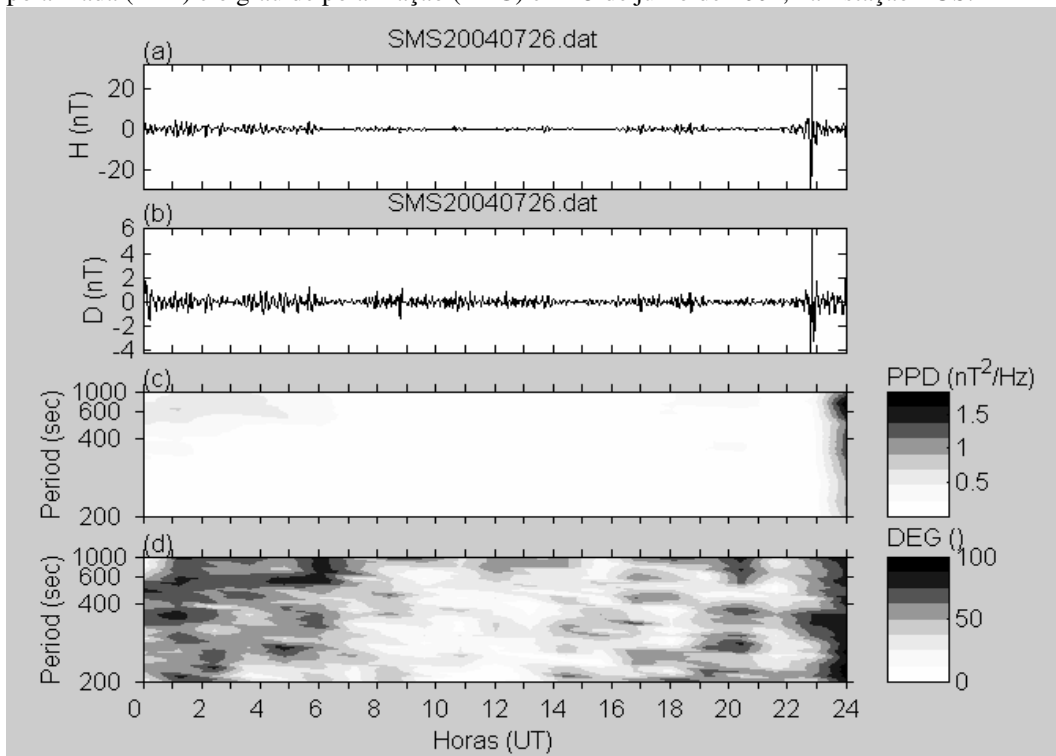


Figura 42 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 26 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE – MCT.



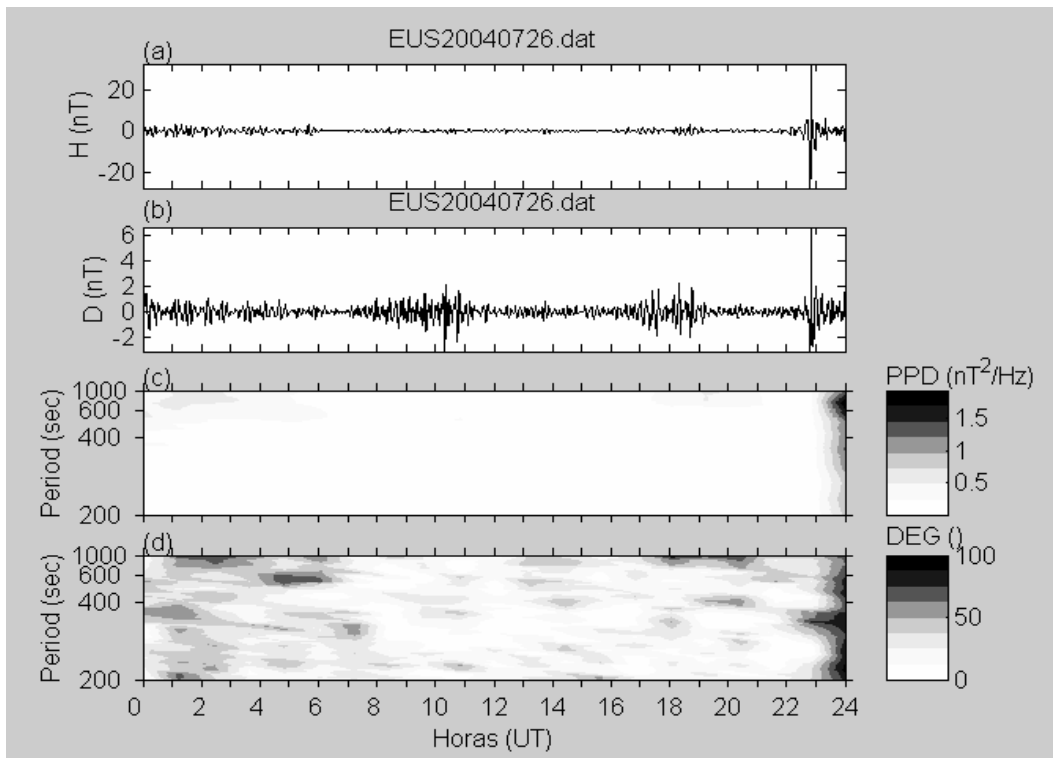


Figura 43 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 26 de julho de 2004, na Estação EUS.

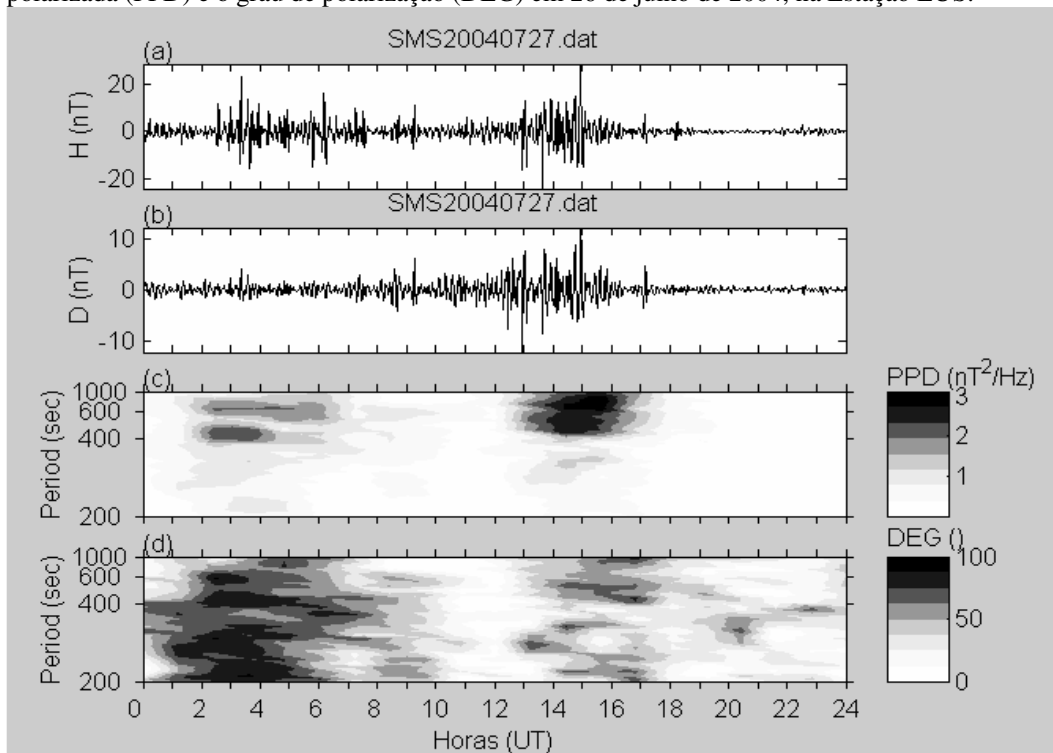


Figura 44 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 27 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

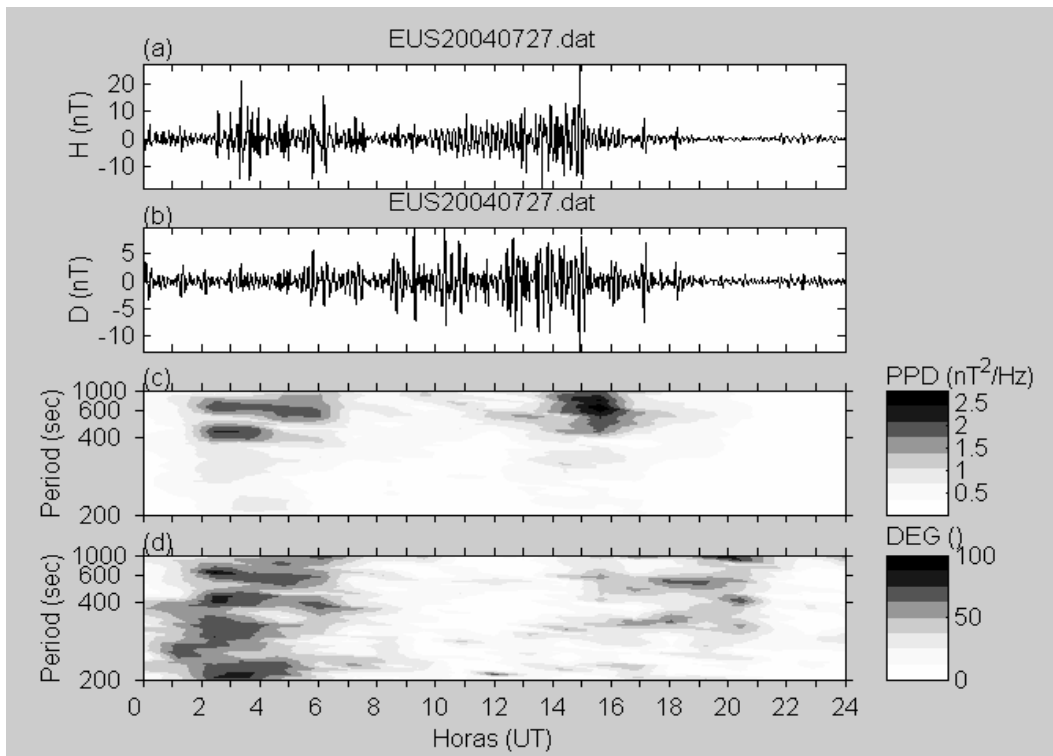


Figura 45 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 27 de julho de 2004, na Estação EUS.

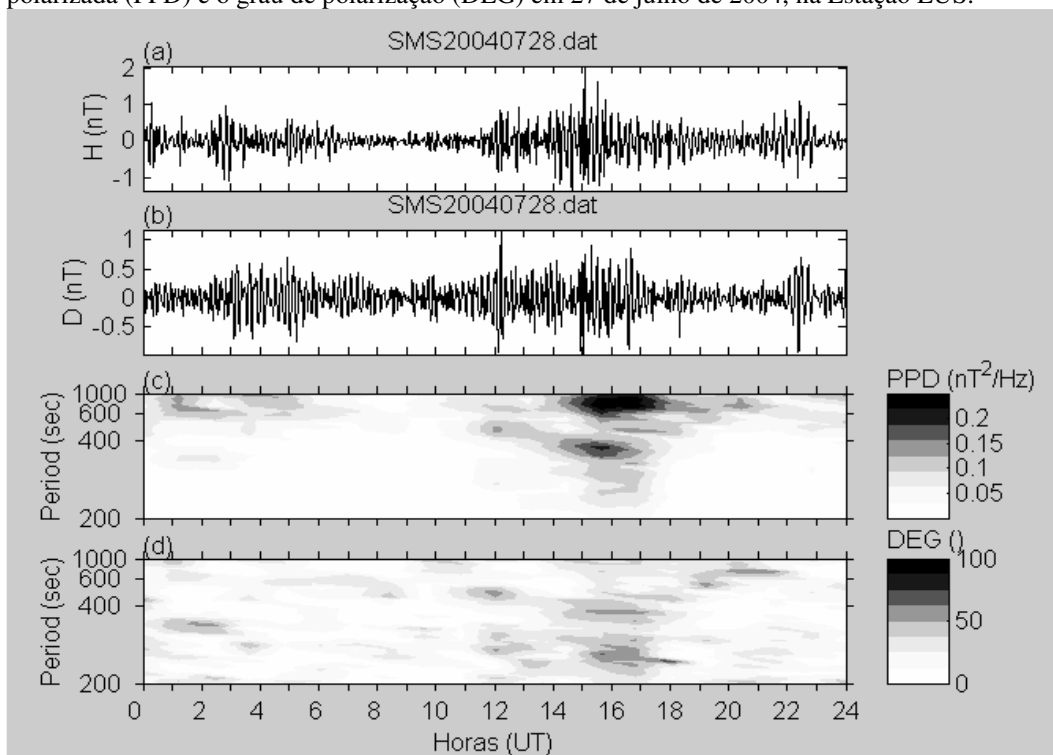


Figura 46 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 28 de julho de 2004, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

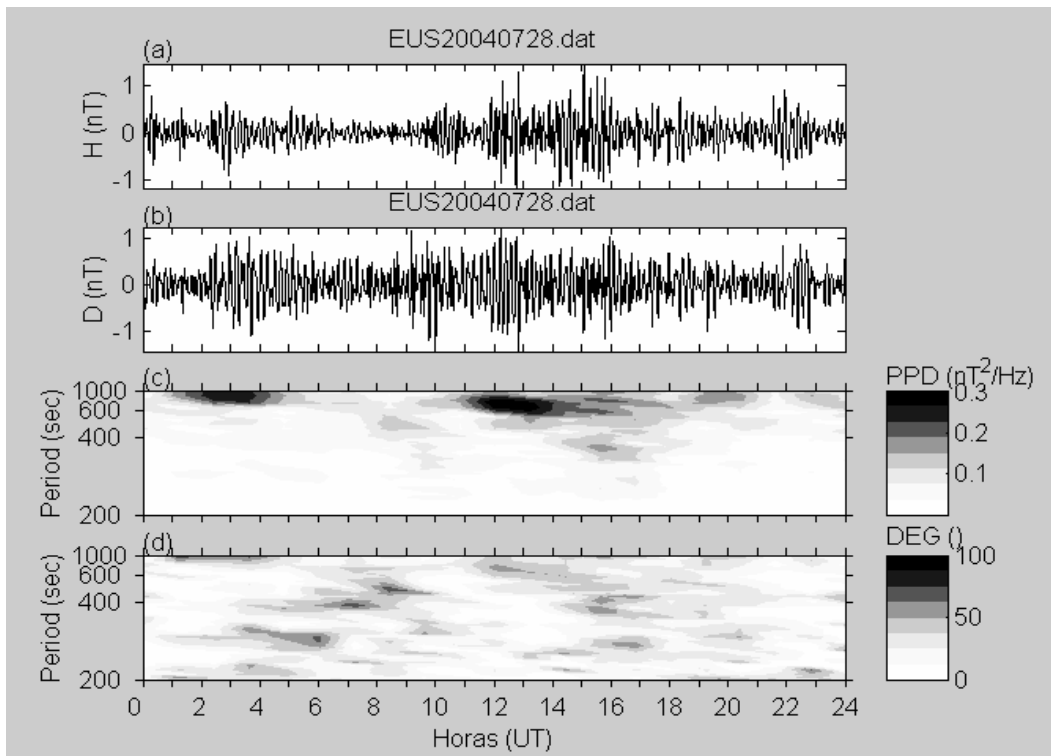


Figura 47 – Análise espectral das componentes H e D e o comportamento da densidade de potência polarizada (PPD) e o grau de polarização (DEG) em 28 de julho de 2004, na Estação EUS.

#### 4.3.5 Aplicação do Espectro de Potência no Estudo da Intensidade da Variação do Campo Geomagnético

O objetivo deste projeto é aplicar o espectro de potência no estudo da intensidade da variação do campo geomagnético e através da PPD (Densidade de Potência Polarizada) estudar as diferenças entre as variações geomagnéticas observadas em dias magneticamente calmos e dias magneticamente perturbados. Após, comparar os resultados obtidos em dias magneticamente calmos e perturbados para a Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, RS (29.43°S, 53.80°W), SMS, e do Observatório Geomagnético Vassouras, VSS (22.40°S, 43.65°W), RJ, do Observatório Nacional – ON/MCT, e sua relação com a intensidade do Campo Magnético Terrestre.

Inicialmente observou-se e escolheu-se um mês em que houve tempestade magnética para podermos selecionar dias magneticamente perturbados e dias magneticamente calmos num mesmo mês. No mês de agosto de 2003 foram selecionados dois dias magneticamente calmos e dois dias mais magneticamente perturbados com base inicialmente a uma consulta ao gráfico do índice de tempestade *Dst* (Disturbance Storm Time, baseado em medidas de observatórios magnéticos próximos ao equador) fornecido pela universidade de Kyoto (ver Figura 48). Conforme esse gráfico, e os gráficos confeccionados com os dados das estações geomagnéticas SMS e VSS, há ocorrência de uma tempestade magnética nos dias 18 e 19 de agosto de 2003. Sendo os dados dessas duas datas usados para os dias

magneticamente perturbados e os dados dos dias 30 e 31 de agosto de 2003 usados para os dias magneticamente calmos.

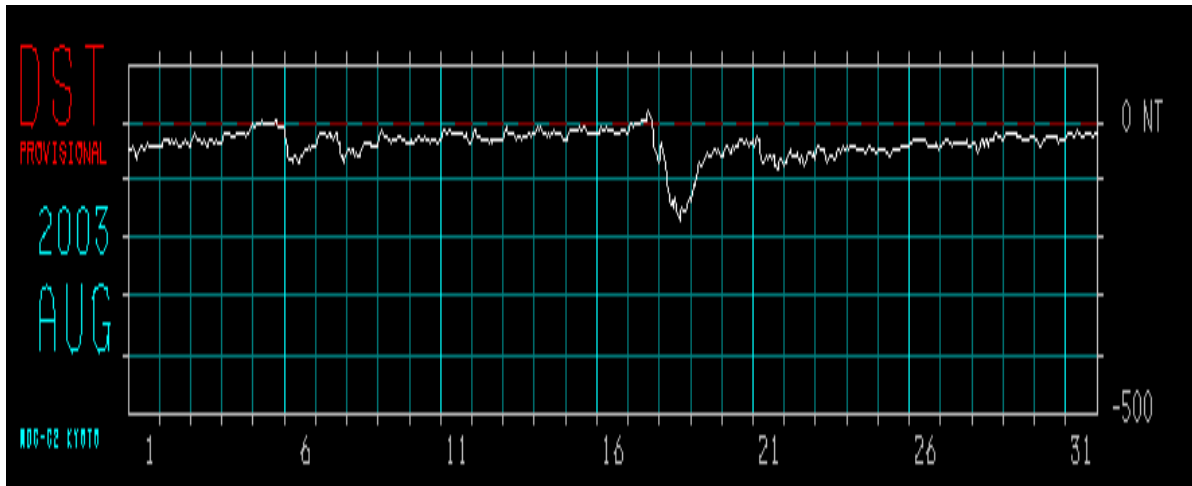


Figura 48: Índice Dst para o mês de agosto de 2003. [ WDC FOR GEOMAGNETISM, KYOTO UNIVERSITY. HOURLY EQUATORIAL DST VALUES(PROVISIONAL). AUGUST 2003. Unit=nT, Time=number of the hour in UT day.] Fonte: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/p/dstprov200308.html>.

Os arquivos dos dados utilizados contêm os valores da componente ortogonal do campo geomagnético  $H$ , registradas em nanoteslas (nT), com um intervalo de amostragem a cada dois segundos (taxa de amostragem é de 0,5 Hz). Primeiramente são elaborados os gráficos da variação diária do campo geomagnético (Figuras 49-56), em seguida é feita a filtragem digital na faixa de 180-900s (Figuras 57-64) e por último a análise espectral (Figuras 65-72).

#### 4.3.6 Análise da Variação Diária

A variação diária do campo geomagnético registrada nas Estações Magnéticas SMS e VSS, para os dias 30 e 31 de agosto de 2003 são mostrados nas Figuras 49-52. Esses dois dias são geomagneticamente calmos, com valores para o índice  $\Sigma Kp$  de 21+ e 13+, respectivamente. O valor máximo do índice  $Dst$  para esses dois dias são -43 nT e -27 nT, respectivamente.

Ao longo do dia, a amplitude da componente  $H$ , mostra-se apenas levemente perturbada, atingindo os valores máximos entre as 15:00 e 17:00 UT (12:00 – 14:00 LT) e decrescendo até o valor-de-base inicial e final do dia por volta das 21:00 UT (18:00 LT).

A variação diária na componente horizontal  $H$  (Norte-Sul) durante a tempestade magnética dos dias 18 e 19 de agosto de 2003 são mostradas nas Figuras 53-56 para as Estações Magnéticas SMS e VSS. Para os dias da tempestade temos  $\Sigma Kp = 52+$  e  $24+$ . O valor máximo do índice  $Dst$  para esses dois dias são -151 nT e -121 nT, respectivamente.

No dia 18 de agosto de 2003 percebemos que há variações abruptas ao longo do dia, sendo que os valores máximos atingidos durante o dia são por volta das 08:00 UT (05:00 LT), para as Estações Geomagnéticas de SMS e VSS. No dia 19 de agosto de 2003 os picos máximos ocorrem por volta das 18:00 UT (15:00 LT).

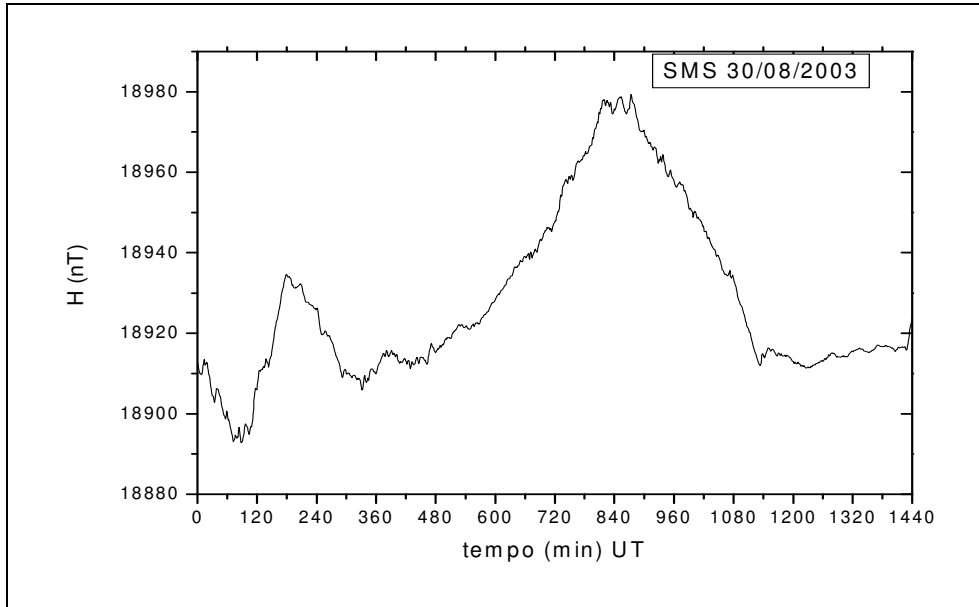


Figura 49; Componente magnética H para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 43 nT e  $\Sigma K_p$ : 21+.

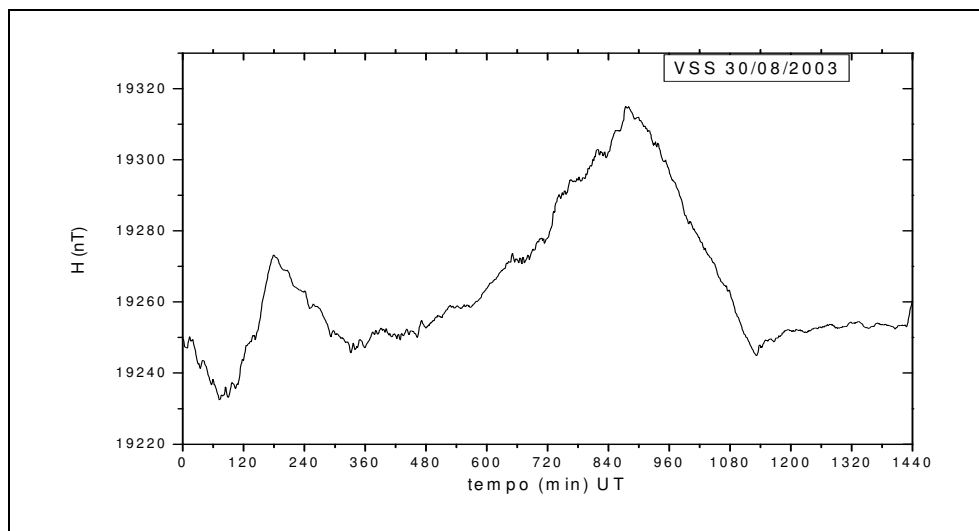


Figura 50; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 43 nT e  $\Sigma K_p$ : 21+.

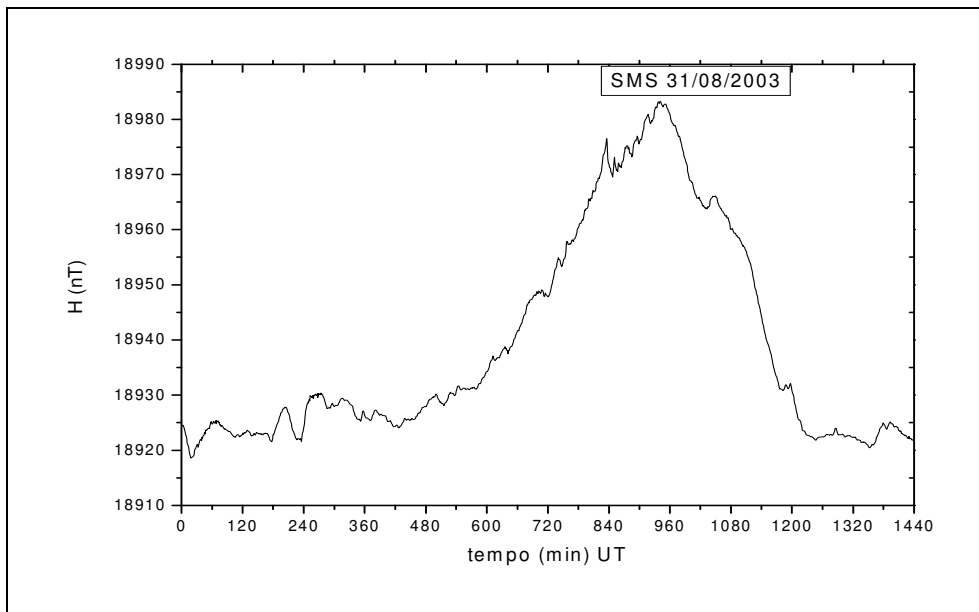


Figura 51; Componente magnética H para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 27 nT e  $\Sigma K_p$ : 13+.

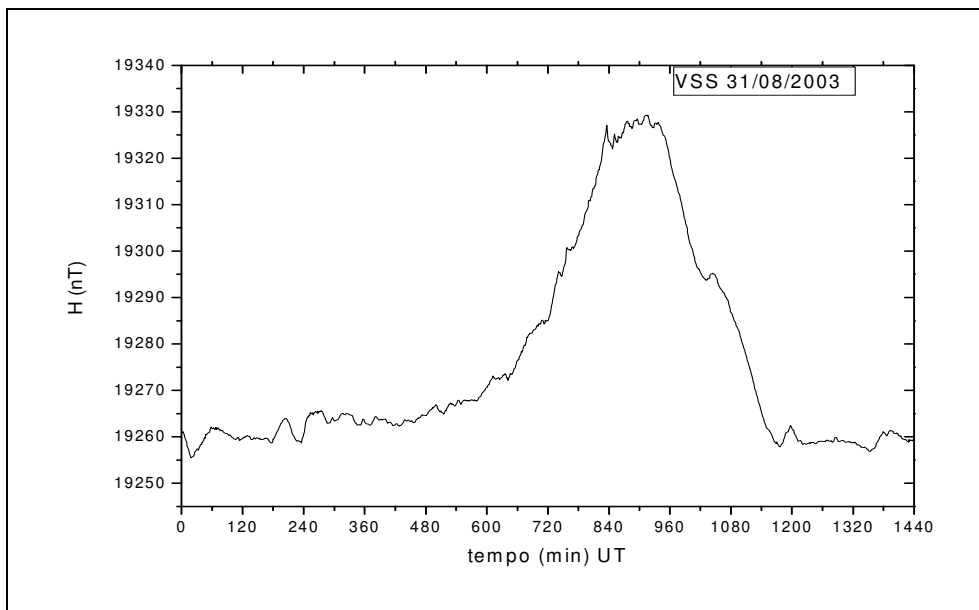


Figura 52; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, índice Dst máximo no dia: - 27 nT e  $\Sigma K_p$ : 13+.

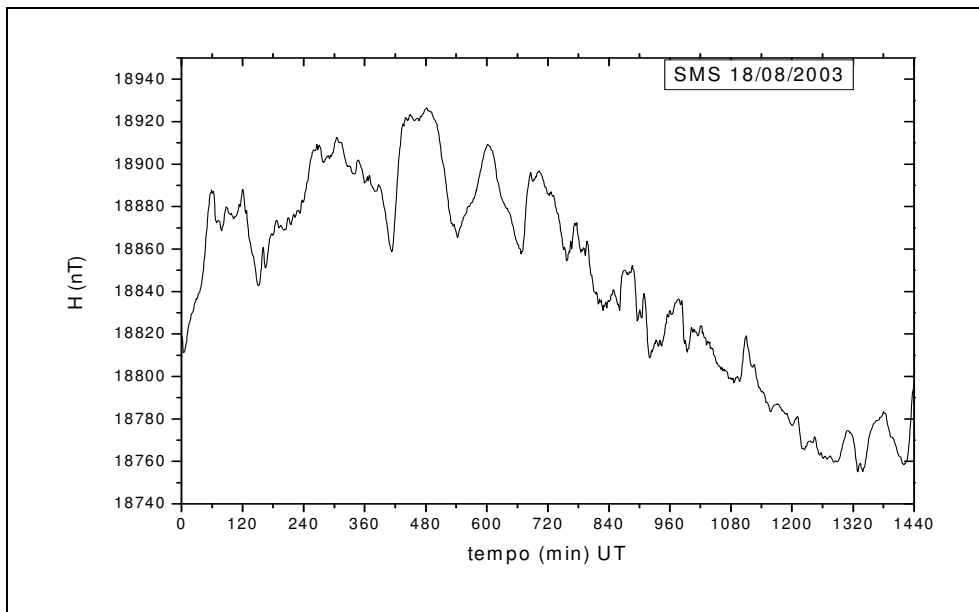


Figura 53; Componente magnética H para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRESPE/INPE – MCT, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 151 nT e  $\Sigma Kp$ : 52+.

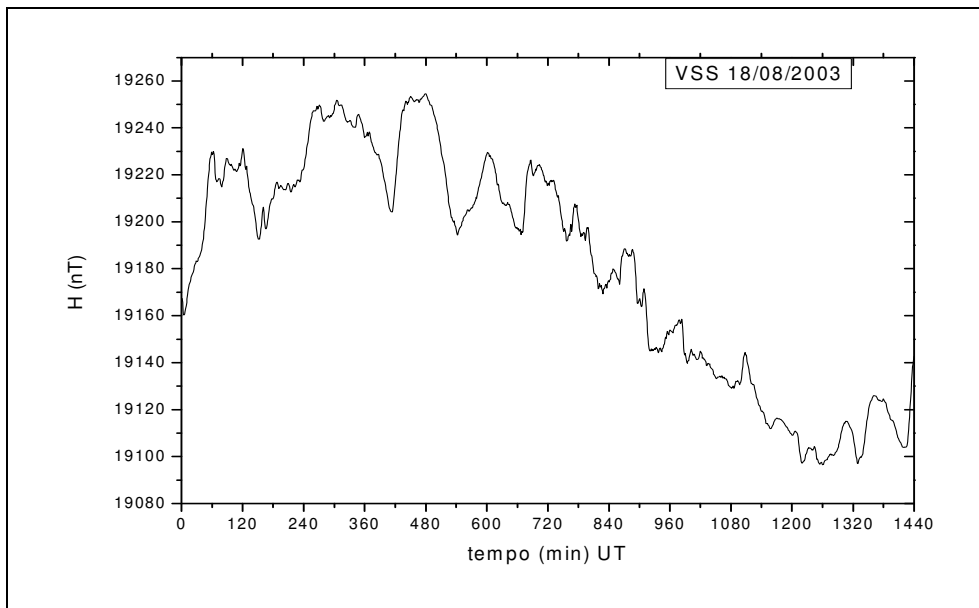


Figura 54; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 151 nT e  $\Sigma Kp$ : 52+.

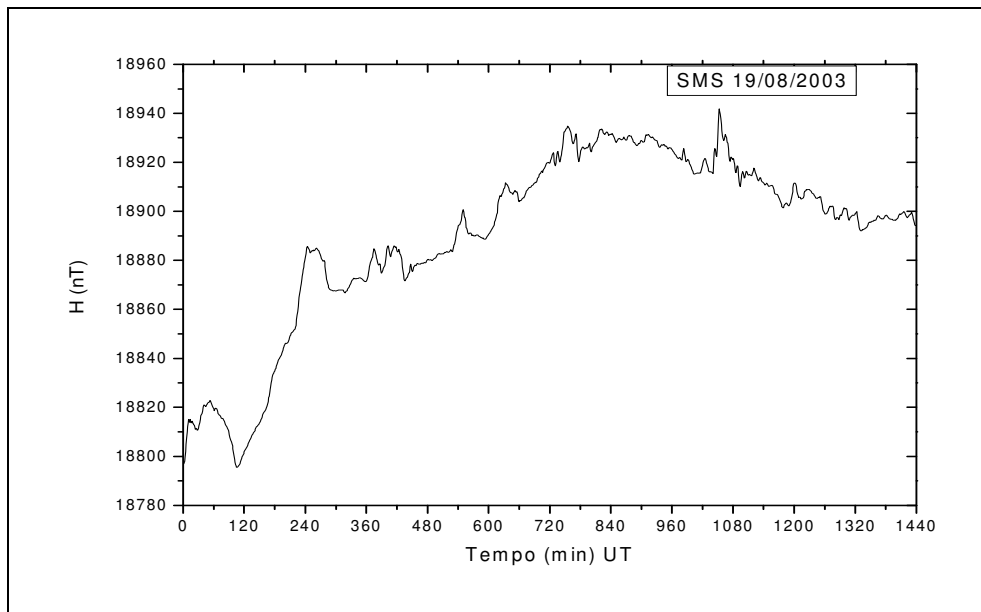


Figura 55; Componente magnética H para a Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 126 nT e  $\Sigma Kp$ : 24+.

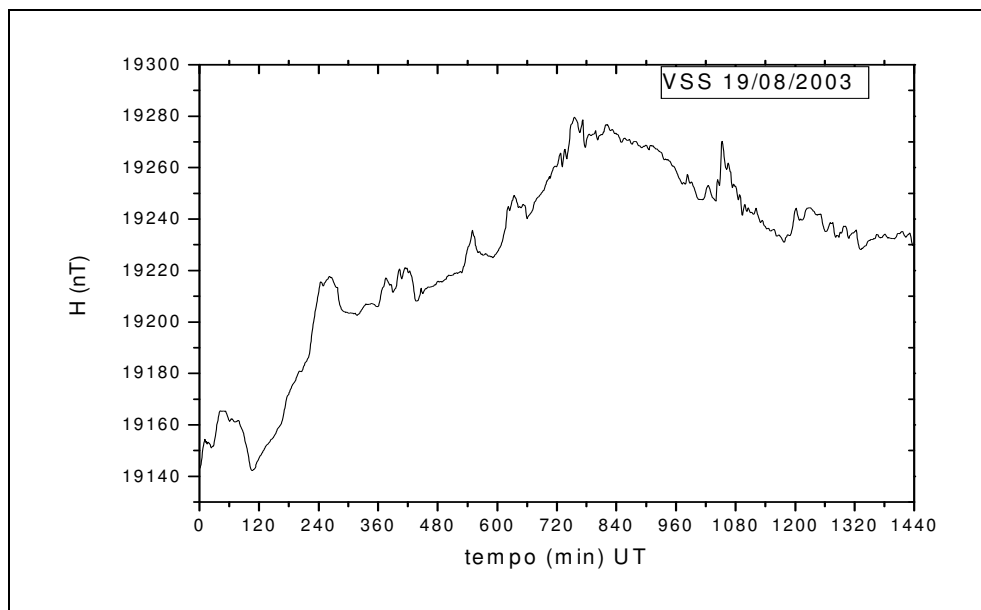


Figura 56; Componente magnética H para o Observatório Magnético de Vassouras, VSS, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, índice Dst máximo no dia: - 121 nT e  $\Sigma Kp$ : 24+.



#### **4.3.7 Filtragem Digital da Componente H**

Como as curvas da variação diária mostram que o campo geomagnético apresenta mudanças numa faixa muito grande de períodos até horas, torna-se necessário filtrar a variação diária de modo que a saída contenha os sinais com períodos (ou frequências) dentro da faixa de interesse, que são as pequenas flutuações que vão de 100 até 1000 segundos.

Para realçar as micropulsões geomagnéticas na faixa de período de 180-900 s foi utilizado um filtro digital passa-banda com saída na faixa de frequência de 1/900 a 1/180 hertz. Mesmo filtro utilizado na análise da tempestade ocorrida entre 21-29 de julho de 2004.

As micropulsões geomagnéticas para os dois dias magneticamente calmos são representadas nas Figuras 57-60. Pode-se observar que o comportamento da componente *H*, para os dias 30 e 31 de agosto de 2003, têm um comportamento típico de um dia magneticamente calmo, onde os picos das micropulsões variam entre  $-2\text{nT}$  a  $+2\text{nT}$  para as Estações Geomagnéticas de SMS e VSS.

Analizando as micropulsões das 24 horas do dia 18 de agosto de 2003 observados pela Estação Geomagnética de SMS, Figura 61, temos picos de micropulsões variando entre  $-6\text{nT}$  a  $+6\text{nT}$ , característicos de dias magneticamente perturbados. Esses picos indicam tempestades magnéticas classificadas como Pc5-Pc6. As maiores variações são detectadas no intervalo que compreende desde 01:00 UT– 03:00 UT e desde 12:00 UT – 17:00 UT. O gráfico dos dados observados pela Estação Geomagnética de VSS, Figura 62, apresenta as maiores variações das micropulsões no mesmo intervalo de tempo que a Estação Geomagnética de SMS, porém os picos são menores, variando desde  $-4\text{nT}$  a  $+4\text{nT}$ .

Analizando as micropulsões do dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, para a Estação Geomagnética de SMS, Figura 63, há picos de micropulsões variando entre  $-6\text{nT}$  a  $+6\text{nT}$ . Ocorrem vários picos durante o dia, sendo que o maior é detectado em torno das 18:00 UT, caracterizando as Pc5-Pc6. O gráfico da Estação Geomagnética de VSS, Figura 64, apresenta os mesmos picos para os mesmos intervalos de tempo, porém, as micropulsões variam entre  $-4\text{nT}$  a  $+4\text{nT}$ .

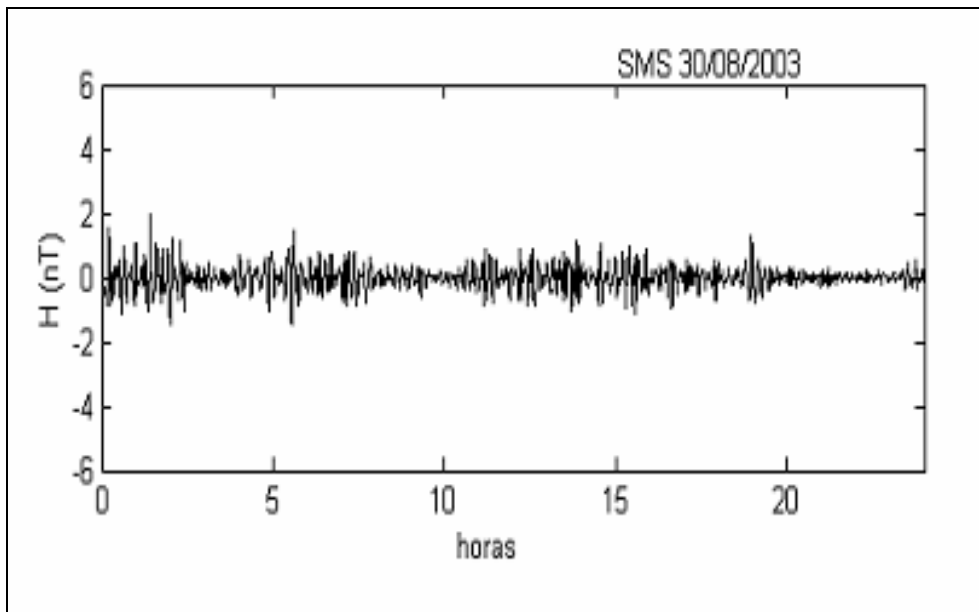


Figura 57; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

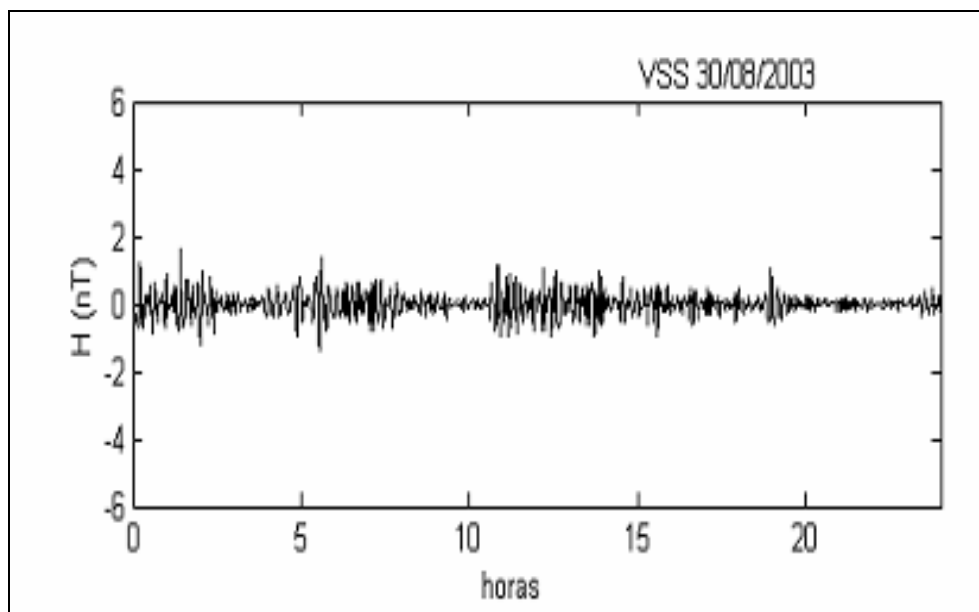


Figura 58; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

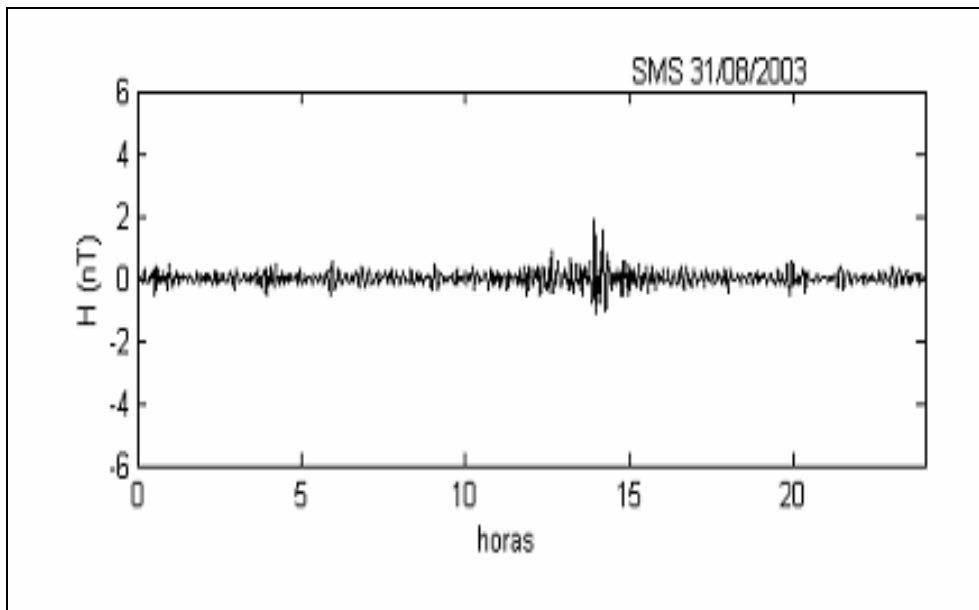


Figura 59; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

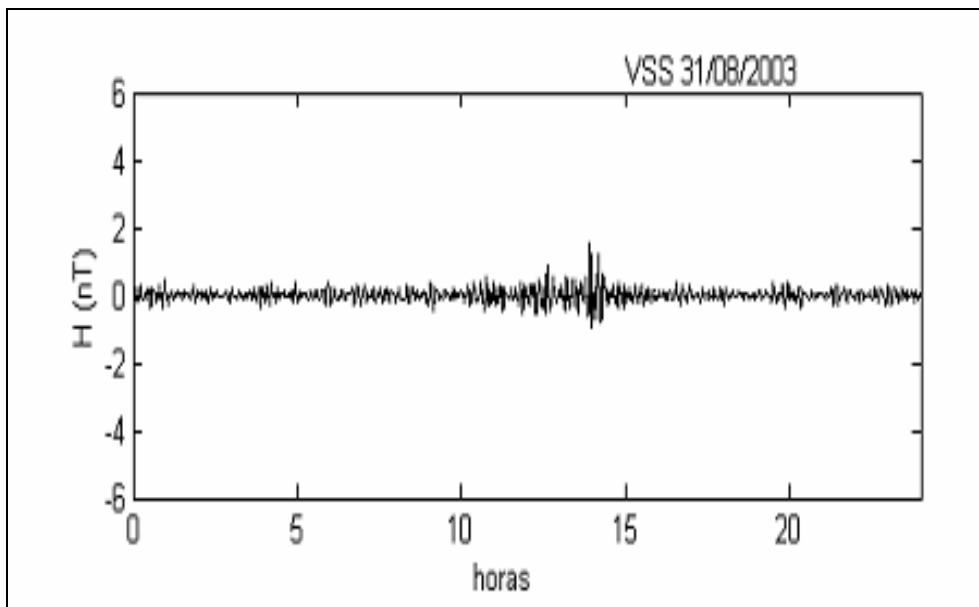


Figura 60; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

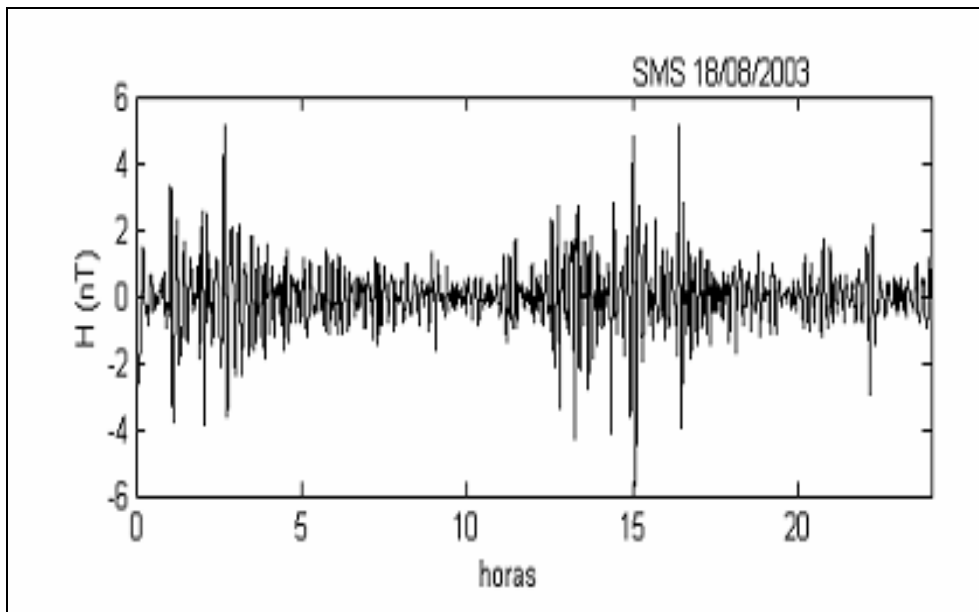


Figura 61; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

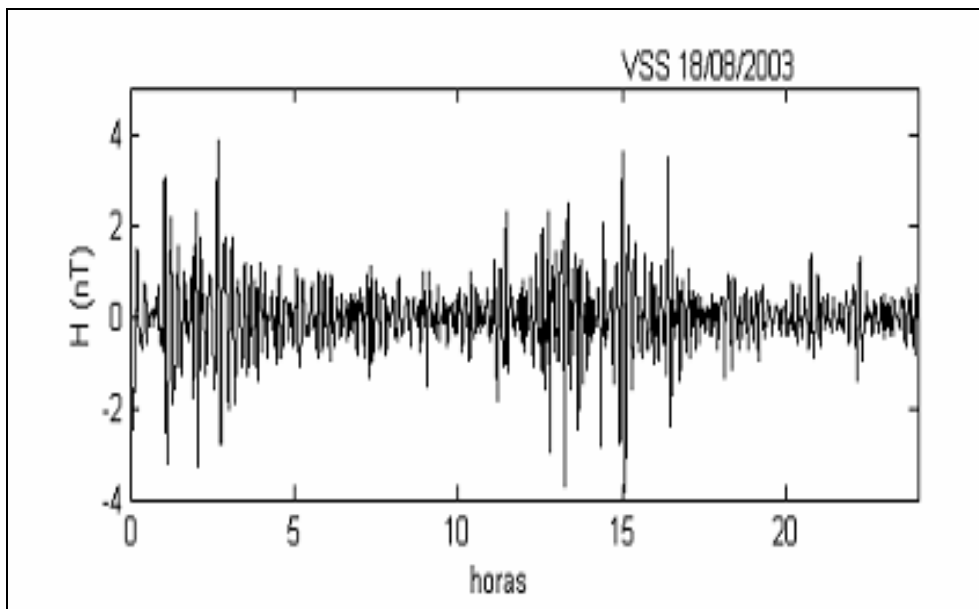


Figura 62; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

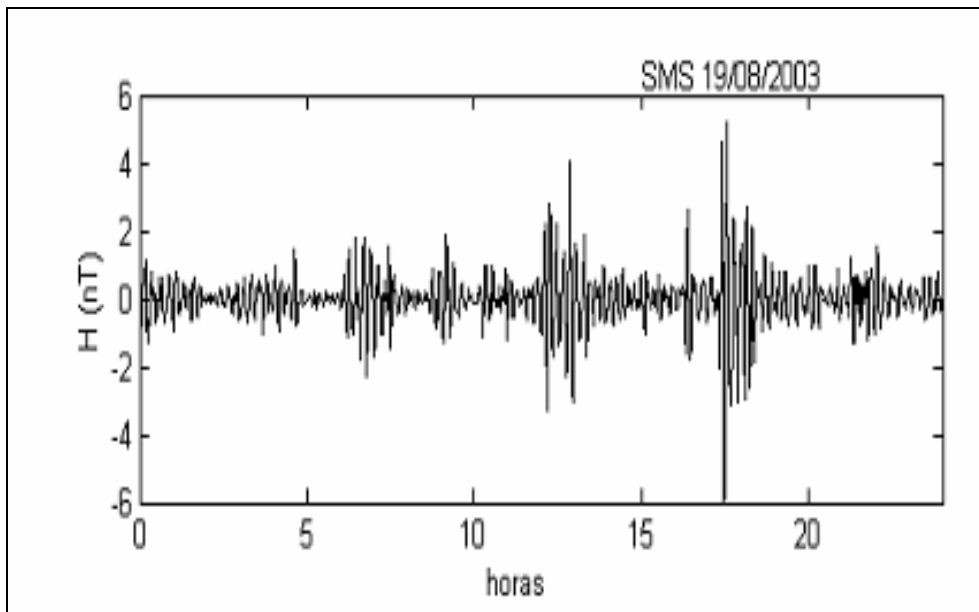


Figura 63; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

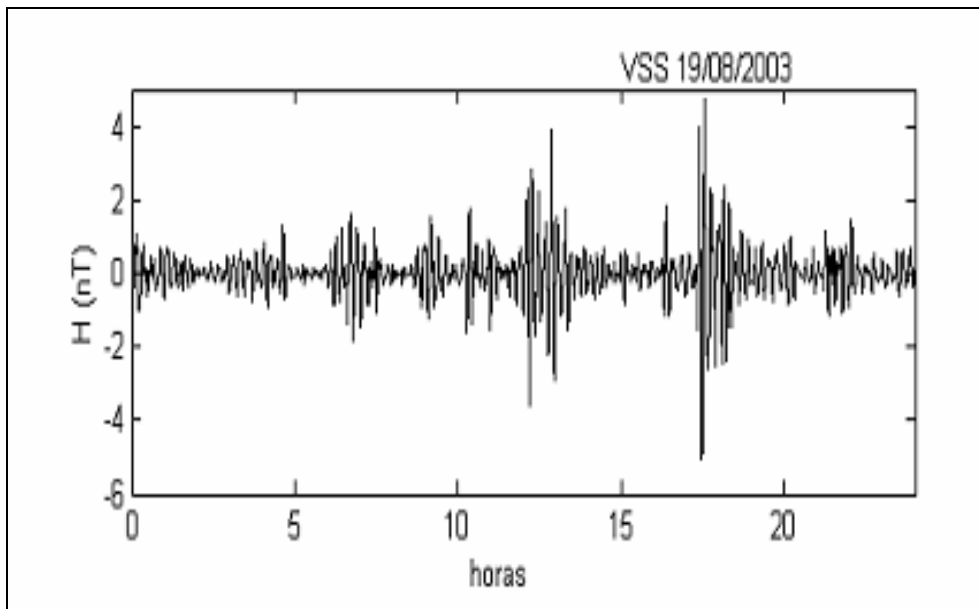


Figura 64; Filtragem digital, da componente H em função do tempo (UT), onde se realçam as micropulsações geomagnéticas na faixa de 180-900s, para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, no Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

#### 4.3.8 Análise por Espectro de Potência

A partir dos sinais filtrados na faixa de 180-900s partiu-se para o estudo destes sinais por espectro de potência. O algoritmo utilizado calcula o espectro de potência do sinal filtrado pelo método FFT (Se há uma função que representa um sinal obtido no tempo, então se pode fazer uma análise espectral deste sinal usando a transformada de Fourier).

As 24 horas dos sinais filtrados na faixa de 180 – 900s, para os dias 18, 19, 30 e 31 de agosto de 2003, e os respectivos espectros de potência São vistos nas Figuras 65-72.

Dia magneticamente calmo para a Estação Geomagnética SMS, observa-se que a energia concentra-se em períodos entre 400 s a 900 s, sem picos abruptos de energia para o sinal, sendo que a potência máxima para o dia é alcançada em torno do pico correspondente ao período de 650s com o valor de  $0.06 \text{ nT}^2/\text{Hz}$ , Figura 65.

Dia magneticamente calmo para a Estação Geomagnética VSS, observa-se que, similarmente a SMS, a energia concentra-se no período entre 400-900 s, sem picos abruptos de energia, com máximo em aproximadamente 600 s correspondendo a uma potência de aproximadamente  $0.055 \text{ nT}^2/\text{Hz}$ , Figura 66.

Dia magneticamente calmo para a Estação Geomagnética SMS, nota-se que os sinais das pulsações são ainda menos intensos que os sinais do dia anterior, onde a energia concentra-se no período entre 400-900 s, sem picos abruptos de energia, com um valor máximo de energia em torno de  $0.045 \text{ nT}^2/\text{Hz}$  num período de aproximadamente 500 s, Figura 67.

Dia magneticamente calmo para a Estação Geomagnética VSS, assim como SMS, os sinais das pulsações são ainda menos intensos que os do dia 30 de agosto de 2003, com a energia se concentrando no período de 400-900 s, com um máximo de energia em torno de  $0.04 \text{ nT}^2/\text{Hz}$  no período de aproximadamente 500 s, Figura 68.

Dia magneticamente perturbado para a Estação Geomagnética SMS, notamos de imediato que os níveis de energia são maiores, para qualquer período observado, quando comparado aos dias magneticamente calmos, significando que os sinais das pulsações são mais intensos nos dias magneticamente perturbados. A análise deste gráfico mostra que a energia espalha-se também para períodos maiores, abrangendo todo o espectro estudado, englobando os sinais característicos das Pc5–Pc6. Notamos vários picos individuais de energia para diferentes períodos, onde o pico máximo de energia atinge os  $0.2 \text{ nT}^2/\text{Hz}$  num período de aproximadamente 700 s, Figura 69.

Dia magneticamente perturbado para a Estação Geomagnética VSS, similarmente ao gráfico de SMS para o dia 18 de agosto de 2003, a energia espalha-se para períodos maiores, sendo significativa desde 180-900 s. O pico maior de energia ocorre próximo aos 700 s, caracterizando as pulsações Pc5–Pc6, atingindo uma potência máxima de  $0.16 \text{ nT}^2/\text{Hz}$ . Notamos que a PPD para VSS é menor comparada a SMS para este mesmo dia, Figura 70.

Dia magneticamente perturbado para as Estações Geomagnéticas SMS e VSS, a energia se concentra num período de 350-900 s para ambas as estações, nas Figuras 71-72. Os sinais das pulsações foram mais intensos nesse dia atingindo uma potência de aproximadamente  $0.24 \text{ nT}^2/\text{Hz}$  no período de aproximadamente 700 s para a estação SMS e atingindo uma potência de  $0.22 \text{ nT}^2/\text{Hz}$  para a estação VSS num período de aproximadamente 700 s.

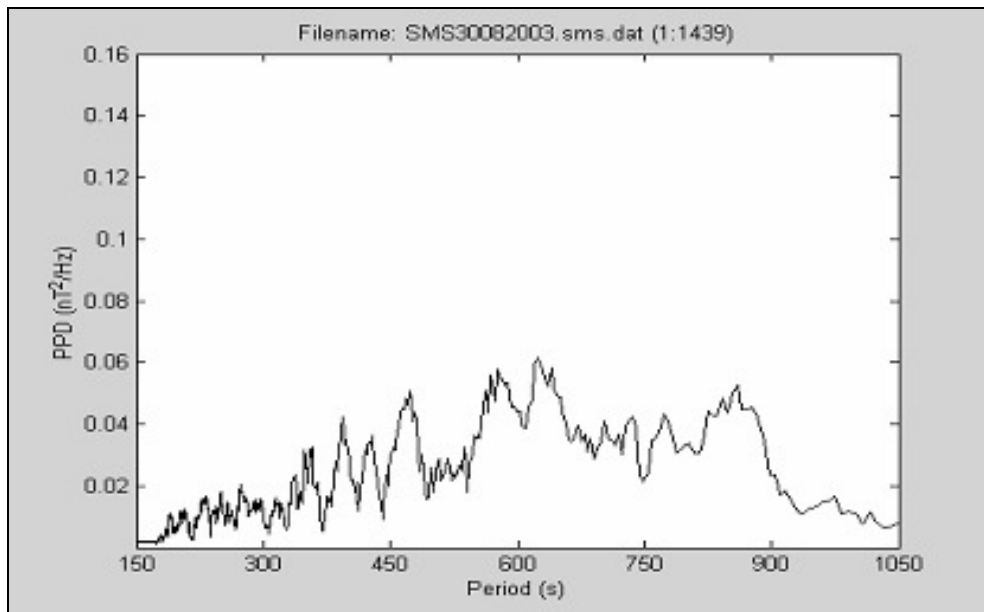


Figura 65; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

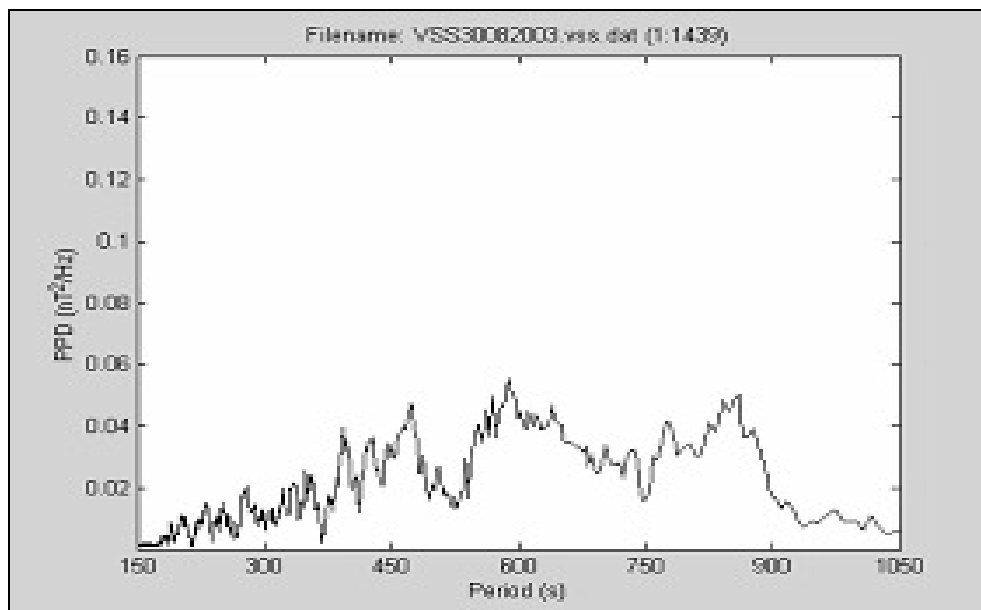


Figura 66; Espectro de potência da do sinal filtrado para o dia 30 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

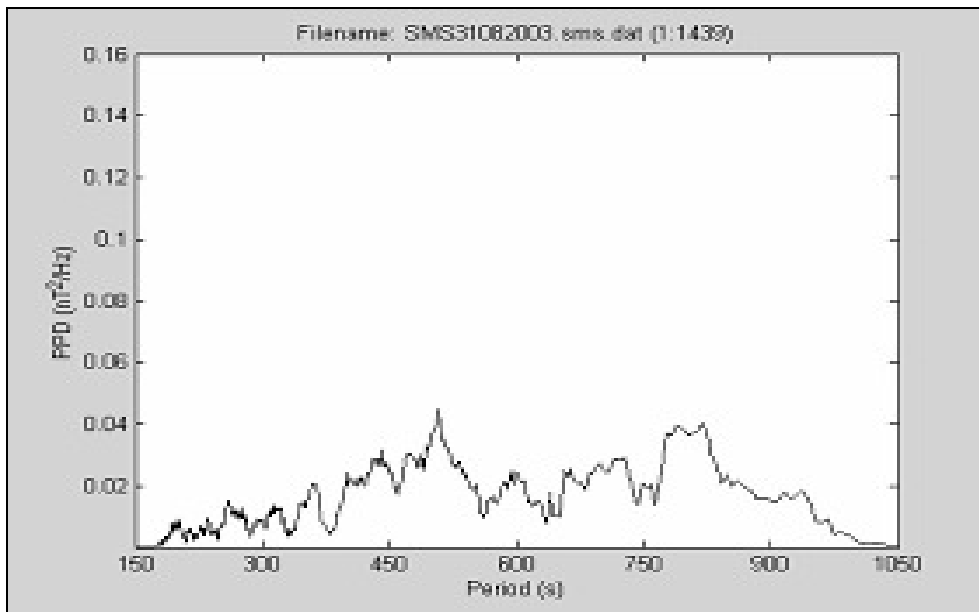


Figura 67; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

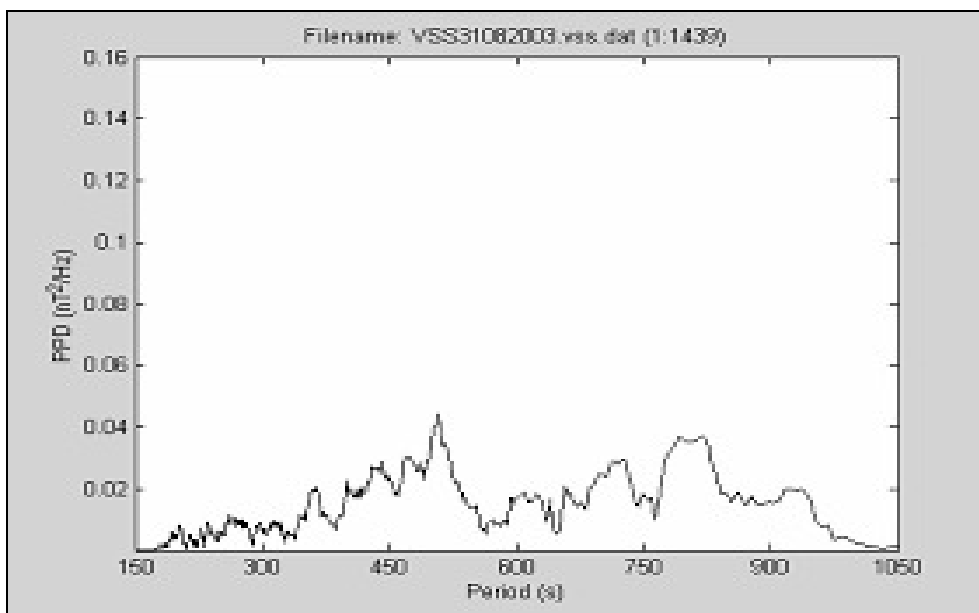


Figura 68; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 31 de agosto de 2003, dia magneticamente calmo, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS.



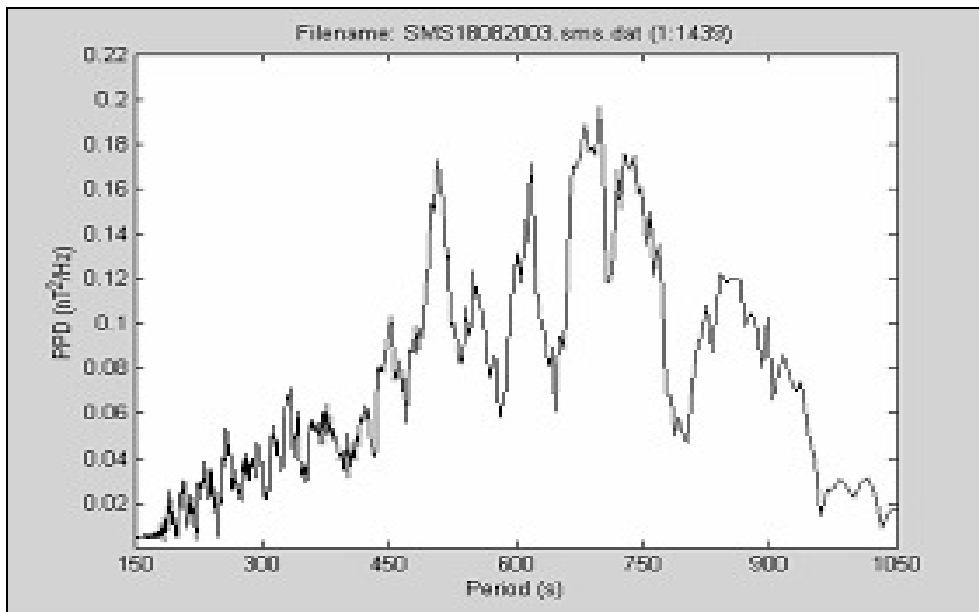


Figura 69; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

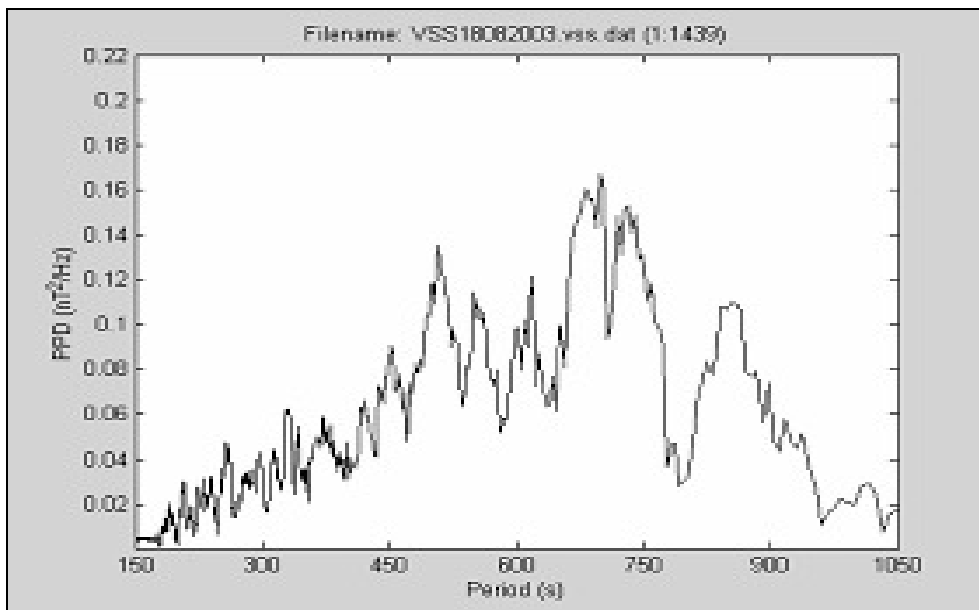


Figura 70; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 18 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, do Observatório Magnético de Vassouras, VSS.

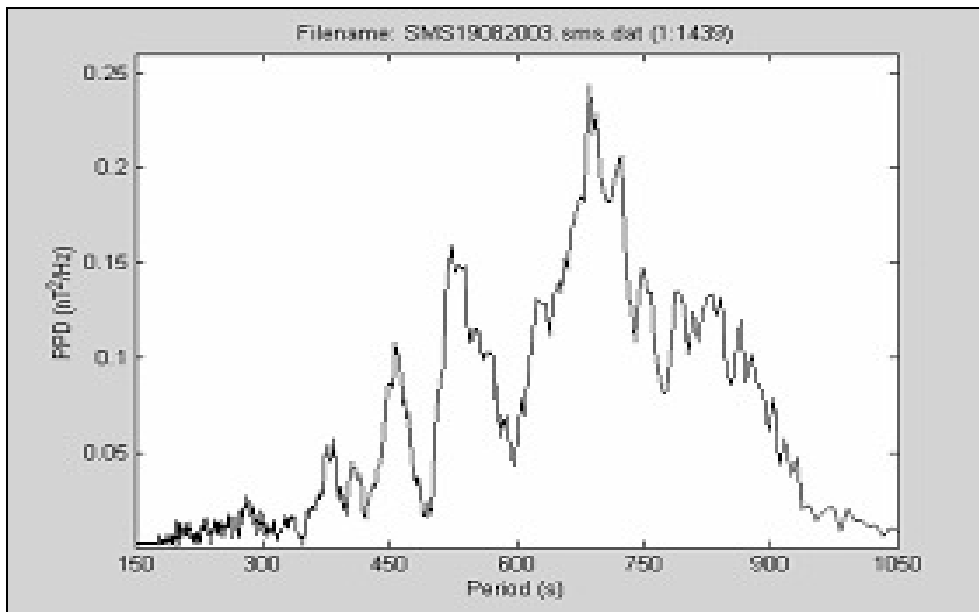


Figura 71; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, na Estação Geomagnética SMS, do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

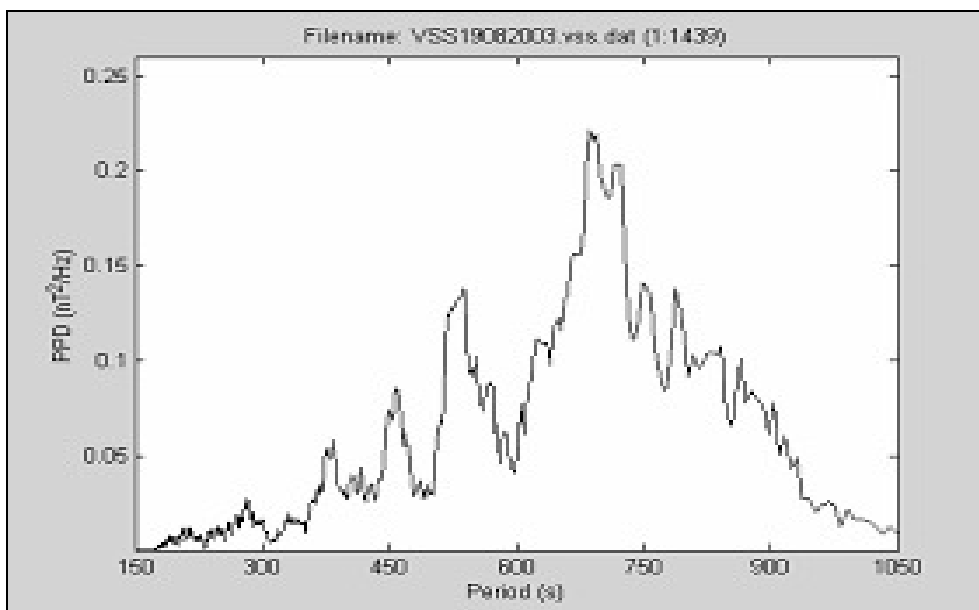


Figura 72; Espectro de potência do sinal filtrado para o dia 19 de agosto de 2003, dia magneticamente perturbado, do Observatório Geomagnético de Vassouras, VSS.

## 5.0 CONCLUSÕES

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 variação em escala temporal de dias, horas, minutos e segundos. As variações de curta escala foram detectadas pelo magnetômetro *fluxgate* instalado na Estação Geomagnética do Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.

As tempestades magnéticas, causadas por explosões solares, causam variações repentinas nas três componentes magnéticas ( $H$ ,  $D$  e  $Z$ ), principalmente na componente  $H$ . Devido ao fato de que a Estação Geomagnética OES/SMS está localizada próximo do centro da AMAS, observa-se que as medidas apresentam maior variação quando comparadas com outras estações fora dessa região.

A partir do evento magnético analisado neste relatório, uma tempestade geomagnética ocorrida no período de 22 a 28 de julho de 2004, pode-se detectar pulsações de períodos longos conhecidos na literatura como Pc5–6/Pi3. As Pc5 compreendem as pulsações entre 150 a 600 segundos e as Pc6 acima de 600 segundos até 1.000 segundos. Utilizando-se uma filtragem digital – um filtro tipo passa-banda com a função de analisar somente as pulsações numa faixa de 180 a 900 segundos – foi possível detectar picos de variação em nível Pc5 e Pc6 e a potência espectral associada;

Com a análise espectral dos períodos observados no período de 22 a 28 de julho de 2004 para as Estações Geomagnéticas de EUS e SMS, verificou-se que a tempestade magnética apresentou variações mais intensas na componente  $H$  na estação SMS, com Pc5 e Pc6 atingindo picos maiores na escala de nanoteslas (nT). A densidade de potência polarizada e o grau de polarização atingiram valores altos durante a tempestade para a filtragem espectral feita, com os graus de polarização de onda próximos a 100% e potências bastante intensas na banda de período de 600-1000s (Figuras 44-45). E, ainda, os espectros e a polarização apresentaram sensibilizações maiores para a Estação Geomagnética SMS.

A filtragem digital, referente aos quatro dias analisados do mês de agosto de 2003, mostra uma maior ocorrência de pulsações geomagnéticas na faixa de 180 – 900 s em dias magneticamente perturbados. Ao se sujeitar os dados filtrados digitalmente a uma análise através do espectro de potência conclui-se que há uma maior densidade de potência polarizada (PPD) na Estação Geomagnética de SMS, quando comparado os dados da estação geomagnética de VSS, para dias magneticamente perturbados, indicando uma maior ocorrência de pulsações geomagnéticas na faixa de 180 – 900 s, e conclui-se que o nível de energia nos dias magneticamente perturbados é maior, quando comparado aos dias magneticamente calmos, significando, como o esperado, que o sinal das pulsações é mais intenso nos dias perturbados.

Verifica-se que em regiões onde o campo geomagnético é menos intenso, como é o caso da AMAS, detecta-se pulsações mais intensas. Este fenômeno pode estar relacionado com a precipitação de partículas eletricamente carregadas nessa região.

A amplitude das pulsações contínuas ou irregulares encontradas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul depende da condutividade ionosférica. Quando os elétrons provenientes dos cinturões de Van Allen se precipitam na ionosfera da Anomalia, ocorre uma maior presença de pulsações contínuas e impulsivas, aumenta a condutividade ionosférica e conseqüentemente aumenta as amplitudes das pulsações. Assim os eventos das pulsações acompanhados de precipitação de elétrons têm amplitudes maiores no centro da Anomalia comparada com as variações geomagnéticas observadas fora dessa região. Por isso as pulsações têm amplitudes maiores na região de São Martinho da Serra (SMS), RS, quando comparadas com os dados de Eusébio (EUS), MA, e de Vassouras (VSS), RJ.

## 6.0 Bibliografia

- 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.
- Campbell, W.H. Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge University Press, 1997.
- Dutra, S.L.G. Noções Básicas de Geomagnetismo. INPE, São José dos Campos, dezembro de 2004 (texto preliminar).
- Jacobs, J.A.; Kato, Y.; Matsushita, S.; Troitskaya, V.A. Classification of Geomagnetic Micropulsations. Journal of Geophysical Research, **69**(1):180–181, Jan. 1964.
- National Geophysical Data Center – NGDC, Boulder, CO,  
[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/INDICES/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/)
- Pinto, O., Jr., Gonzalez, W.D. Anomalia magnética Brasileira. INPE, São José dos Campos, 1989.
- 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.
- Thomson, D. J. Spectrum Estimation and Harmonic Analysis. IEEE Proc., **70**(9):1055–1096, 1982.
- Zanandrea, A. Estudo das Micropulsações Geomagnéticas em Latitudes Muito Baixas, no Brasil. INPE, São José dos Campos, 1999.
- Zanandrea, A. Micropulsações Geomagnéticas em Santa Maria – RS. INPE, São José dos Campos, maio de 1994.