



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

INPE-12990-PRE/8267

**INTERAÇÃO DO PLASMA SOLAR COM O CAMPO  
MAGNÉTICO TERRESTRE OBSERVADO NA REGIÃO DA  
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL NO  
OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

Everton Frigo\*

\*Bolsista UFSM

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelo  
Dr. Nalin Babulal Trivedi



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

**INTERAÇÃO DO PLASMA SOLAR COM O CAMPO MAGNÉTICO  
TERRESTRE OBSERVADO NA REGIÃO DA  
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL  
NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

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

**PROCESSO Nº 104441/2004-6**

Everton Frigo (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)  
E-mail: [everton@lacesm.ufsm.br](mailto:everton@lacesm.ufsm.br)

Dr. Nalin Babulal Trivedi (DGE/CEA/INPE – MCT, Orientador)  
E-mail: [trivedi@dge.inpe.br](mailto:trivedi@dge.inpe.br)

Santa Maria, Maio de 2005



**INTERAÇÃO DO PLASMA SOLAR COM O CAMPO MAGNÉTICO  
TERRESTRE OBSERVADO NA REGIÃO DA  
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL  
NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

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

**PROCESSO Nº 104441/2004-6**

Everton Frigo (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)  
E-mail: [everton@lacesm.ufsm.br](mailto:everton@lacesm.ufsm.br)

Dr. Nalin Babulal Trivedi (DGE/CEA/INPE – MCT, Orientador)  
E-mail: [trivedi@dge.inpe.br](mailto:trivedi@dge.inpe.br)

Santa Maria, Maio de 2005



## **Dados de Identificação**

### **Bolsista:**

Everton Frigo  
Acadêmico do Curso de Física Licenciatura Plena  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

### **Orientador:**

Dr. Nalin Babulal Trivedi  
Divisão de Geofísica Espacial  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

### **Título do Projeto:**

Interação do Plasma Solar com o Campo Magnético Terrestre observado na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul no Observatório Espacial do Sul.

### **Local de execução do projeto:**

- Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM, em Santa Maria, RS.
- Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas - CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS.
- Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS.

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

- Dr. Nelson Jorge Schuch – CRSPE/INPE-MCT
- Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra – DGE/INPE-MCT
- Acadêmico Eduardo Andrighetto – Curso de Engenharia Elétrica - UFSM
- Acadêmico Elias Fernando Berra – Curso de Física - UFSM
- Acadêmico Cássio Espindola Antunes – Curso de Engenharia Elétrica - 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

Gostaria de agradecer ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Coordenador da Ação de Implantação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, pelo apoio, orientação e por ter proporcionado todas as condições necessárias para o desenvolvimento desse projeto. Ao meu orientador, Dr. Nalin Babulal Trivedi, pela paciente orientação e dedicação demonstradas em todos os momentos desse projeto. A minha família, pelo contínuo incentivo as minhas atividades. Aos colegas do Laboratório de Física Solar, do Meio Interplanetário e Magnetosferas, Eduardo Andrighetto, Elias Fernando Berra e Cassio Espindola Antunes, e demais acadêmicos do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM, pela amizade e apoio. Aos Drs. Severino Luiz Guimarães Dutra, Kazuo Makita e Kiyohumi Yumoto, pela cooperação. Ao Programa de Iniciação Científica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - PIBIC/INPE – CNPq/MCT, por ter permitido o desenvolvimento desse importante projeto de pesquisa e todo o aprendizado através dele adquirido. Gostaria de agradecer também a todas as demais pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento desse projeto.



## RESUMO

Esse projeto visa realizar estudos comparativos entre os parâmetros de plasma solar medidos pelo satélite ACE no Ponto Lagrangiano no espaço e as variações geomagnéticas registradas nas estações magnéticas do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS (29.43°S, 53.80°W) e no Observatório Geomagnético de Vassouras, em Vassouras, RJ (22.40°S, 43.65°W), ambas estações localizadas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Os parâmetros do plasma solar no meio interplanetário a serem utilizados são a velocidade do vento solar, a pressão dinâmica, o campo elétrico interplanetário e a componente Z do campo magnético interplanetário. Os dados geomagnéticos coletados em formato binário serão convertidos para o formato ASCII e posteriormente serão realizadas as análises espectrais e de polarização das ondas eletromagnéticas correspondentes às pulsações geomagnéticas detectadas durante os eventos estudados. Com a conclusão dos objetivos propostos pretende-se realizar estudos sobre as variações geomagnéticas observadas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.



## ABSTRACT

That project seeks to accomplish comparative studies among the parameters of solar plasma measured by the ACE satellite in the Lagrangian Point in the space and the geomagnetic variations recorded in the magnetic stations of the Southern Space Observatory – OES/CRSPE/INPE-MCT, at São Martinho da Serra, RS (29.43°S, 53.80°W) and Vassouras Geomagnetic Observatory, at Vassouras, RJ (22.40°S, 43.65°W), both stations located in the region of South Atlantic Magnetic Anomaly. The parameters of the solar plasma in the interplanetary medium be used are the speed of the solar wind, the dynamic pressure, the interplanetary electric field and the Z component of the interplanetary magnetic field. The geomagnetic data collected in the binary format they will be converted for the ASCII format and later they will be accomplished the spectral and polarization analyzis of the eletromagnetic waves corresponding the geomagnetic pulsations detected during the studied events. With the conclusion of the proposed objectives we intends to take studies among the geomagnetic variations observed in the region of South Atlantic Magnetic Anomaly.



## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	8
1.1 – OBJETIVOS DO PROJETO .....	8
1.2 – PLANO DE TRABALHO .....	8
1.3 – LOCAIS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	8
1.3.1 – O CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRSPE/INPE-MCT. ....	9
1.3.2 – O OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRSPE/INPE-MCT .....	9
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 – CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	11
2.2 – FENÔMENOS SOLARES E SEUS EFEITOS GEOFÍSICOS .....	14
2.2.1 – EMISSÃO DE PARTÍCULAS PELO SOL .....	15
2.2.2 – MANCHAS SOLARES.....	15
2.2.3 – ERUPÇÕES OU “FLARES” .....	16
2.3 – MAGNETOSFERA TERRESTRE .....	16
2.4 – CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN .....	18
2.5 – VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS.....	19
2.5 – ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL.....	21
2.6 – ELETROJATO EQUATORIAL .....	23
CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....	24
3.1 – MAGNETÔMETRO FLUXGATE DE NÚCLEO SATURADO .....	24
3.2 – SATÉLITE ACE .....	26
CAPÍTULO 4 - SELEÇÃO DOS DADOS E METODOLOGIA EMPREGADA.....	28
4.1 – SELEÇÃO DOS DADOS .....	28
4.2 – METODOLOGIA EMPREGADA.....	28
4.2.1 - FILTRO PASSA BANDA .....	29
4.2.2 – ANÁLISE DE FOURIER.....	29
4.2.3 – TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER .....	30
4.2.4 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	31
4.2.5 – ESPECTRO DE POTÊNCIA .....	31
4.2.6 – SUAVIZAÇÃO DO ESPECTRO.....	33
4.2.7 – POLARIZAÇÃO DE ONDAS .....	34



CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO.....	35
5.1 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 28 E 31 DE MAIO DE 2003.....	36
5.2 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 17 E 20 DE AGOSTO DE 2003.....	44
5.3 - ANÁLISE DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS OCORRIDAS ENTRE 27 E 31 DE OUTUBRO DE 2003.....	53
5.4 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 3 E 5 DE NOVEMBRO DE 2003.....	63
5.5 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 28 E 31 DE MAIO DE 2003.....	70
5.6 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 17 E 20 DE AGOSTO DE 2003.....	71
5.7 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 27 E 31 DE OUTUBRO DE 2003.....	72
5.8 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 03 E 05 DE NOVEMBRO DE 2003.....	73
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	78
ANEXO 1 - PROGRAMAS EM LINGUAGEM MATLAB.....	79
PROGRAMA CONVNAROD1440.M.....	80
PROGRAMA FIGMTM5.M.....	82
PROGRAMA BANDPASS.M.....	85
ANEXO 2 - TITULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS E OU SUBMETIDOS.....	86
ANEXO 3 - CERTIFICADOS.....	88

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 – OBJETIVOS DO PROJETO

O projeto “INTERAÇÃO DO PLASMA SOLAR COM O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE OBSERVADO NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL” tem como objetivos:

- Realizar medidas geomagnéticas contínuas no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, e no Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ.
- Realizar estudos comparativos entre os parâmetros de plasma solar medidos pelo satélite ACE no Ponto Lagrangiano no espaço e as variações geomagnéticas registradas no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS e no Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ.

Com a conclusão dos objetivos acima descritos pretende-se realizar estudos sobre as variações geomagnéticas observadas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

### 1.2 – PLANO DE TRABALHO

O plano de trabalho consiste da coleta de dados geomagnéticos operando as estações geomagnéticas e dados de plasma solar no meio interplanetário fornecidos por satélites, como ACE e WIND. Pesquisar a existência de correlações entre as variações geomagnéticas e os parâmetros de plasma solar no meio interplanetário e procurar entender os processos físicos envolvidos. As atividades se desenvolveram de acordo com o seguinte cronograma:

- **De Agosto de 2004 a Janeiro de 2005** - Estudar a literatura sobre Geomagnetismo e aprender as técnicas de análise de dados de Fourier.
- **De Agosto de 2004 a Julho de 2005** - Aquisição e tratamento contínuos dos dados geomagnéticos de São Martinho da Serra e Vassouras. Coleta contínua dos parâmetros de plasma solar do satélite ACE.
- **De Fevereiro de 2005 a Julho de 2005** - Após detectar e selecionar alguns eventos importantes, estudar a literatura nas revistas científicas para entender os processos físicos que estão ocorrendo no meio ionizado da ionosfera e magnetosfera Terrestre.

### 1.3 – LOCAIS DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto será desenvolvido no Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT em Santa Maria, RS, e no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS.

### 1.3.1 – O CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRSPE/INPE-MCT.

O Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, mostrado na Figura 1.1, visa o atendimento dos seguintes objetivos:

- Dar suporte logístico técnico-científico ao desenvolvimento de programas, projetos e atividades do Instituto realizados nas regiões Sul do Brasil e Cone-Sul da América;
- Apoiar os lançamentos e monitoramentos de satélites, foguetes e balões, no trânsito dos mesmos, na calibração das cargas úteis e no processamento de dados;
- Efetuar manutenção do banco de dados obtidos pela Estação Terrena de Rastreo e Controle de Satélites – ETRCS/CRSPE/INPE e pelo Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE;
- Prestar apoio a usuários localizados nas regiões Sul do Brasil e Cone-Sul da América na obtenção de dados produzidos pelo Instituto;
- Desenvolver equipamentos, para suporte dos laboratórios, para uso de missões do Instituto e para coleta de dados convencionais ou via satélite;
- Realizar a administração das atividades, dos recursos humanos e dos recursos financeiros movimentados pelo CRSPE/INPE, ETRCS/CRSPE/INPE e OES/CRSPE/INPE, bem como as de suprimento de materiais, bens patrimoniais e as de orçamento e finanças.

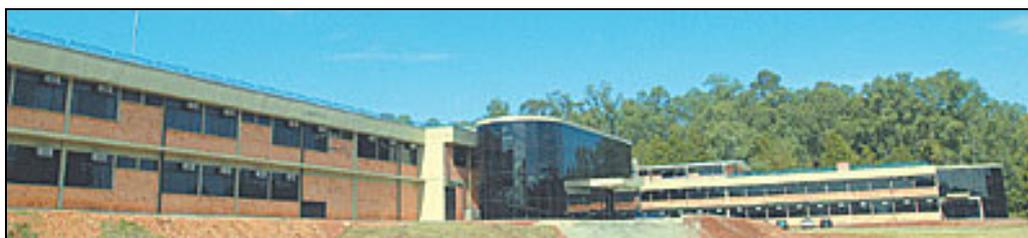


Figura 1.1: O Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT.

### 1.3.2 – O OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRSPE/INPE-MCT

O Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE, localizado no município de São Martinho da Serra, RS, mostrado na Figura 1.2, tem como atribuições:

- Executar e desenvolver as atividades e projetos de pesquisa técnico e científica em Astronomia, nas áreas de Astrofísica e Radioastronomia;
- Executar e desenvolver as atividades e projetos de pesquisa técnico e científica em Geofísica Espacial, nas áreas de Geomagnetismo, Magnetosfera e Heliosfera, eletricidade atmosférica, física e química da média e baixa atmosfera;
- Executar e desenvolver as atividades e projetos de pesquisa técnico e científica em aeronomia, nas áreas da físico-química e da física da alta atmosfera e da Ionosfera;
- Coletar dados, arquivando-os e mantendo-os em banco de dados formatados de acordo com padrões internacionais;

- Desenvolver e fortalecer atividades de cooperação científica com pesquisadores e instituições de pesquisa nacionais e estrangeiras.



Figura 1.2: O Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT.

## CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 – CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

O campo magnético terrestre (Figura 2.1) consiste em uma componente dominante, cujas fontes se encontram no interior da Terra, apresentando flutuações numa escala de tempo de anos ou séculos, e de uma variação nela superposta flutuando numa escala de dias, horas, minutos ou segundos.

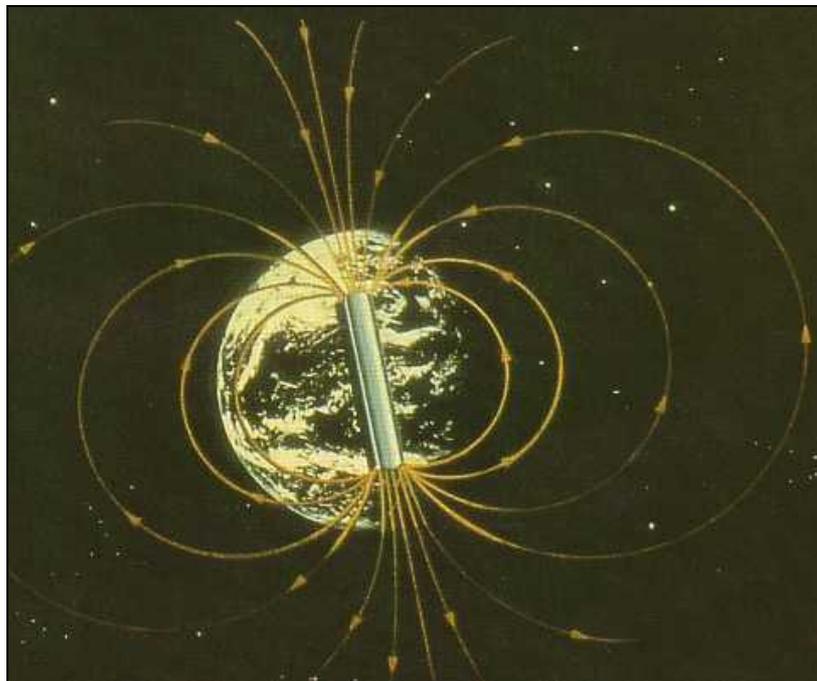


Figura 2.1: Dipolo magnético colocado no centro da Terra e levemente inclinado em relação ao eixo de rotação.

Fonte: Pinto Júnior e Gonzalez, 1989.

A primeira componente é denominada “Campo Principal”, e a segunda é denominada “Campo de Variações”.

A existência da segunda componente é atribuída a fenômenos que ocorrem na atmosfera superior e a resultantes correntes induzidas na superfície da Terra.

O campo magnético principal é produzido por correntes elétricas que fluem no núcleo terrestre, em profundidades maiores que 2900 km. O material existente nessas regiões apresenta-se fundido (a altas temperaturas) e num estado de movimento resultante de convecção térmica provocado por uma não uniforme geração de calor devida ao

decaimento de materiais radioativos irregularmente distribuídos. Por ação dínamo esse fluxo pode induzir forças eletromotrizes capazes de produzir e manter correntes elétricas. Extensos redemoinhos, em contínua mutação por ação da convecção térmica produzem a parte irregular do campo (irregularidades regionais) e a maior parte de sua variação secular.

As anomalias regionais existentes no campo magnético Terrestre originam-se possivelmente na magnetização permanente e induzida de rochas na crosta terrestre. A magnetização das rochas depende da quantidade e natureza de minerais de óxido de ferro nelas contidos. No caso de ter sido retida a magnetização que existia por ocasião da solidificação das rochas, tem-se de levar em conta se esta magnetização permanente é maior ou menor que a induzida pelo atual campo terrestre (Amarante, 1966).

O campo geomagnético é um campo vetorial, e portanto possui magnitude ou intensidade, direção e sentido. A intensidade total do vetor magnético representado pela letra (F) é independente do sistema de coordenadas, mas é comum representá-lo alinhado com as direções geográficas no sistema.

A Figura 2.2 mostra o vetor total do campo geomagnético (F) e suas três componentes X, Y e Z, para uma localidade no hemisfério norte.

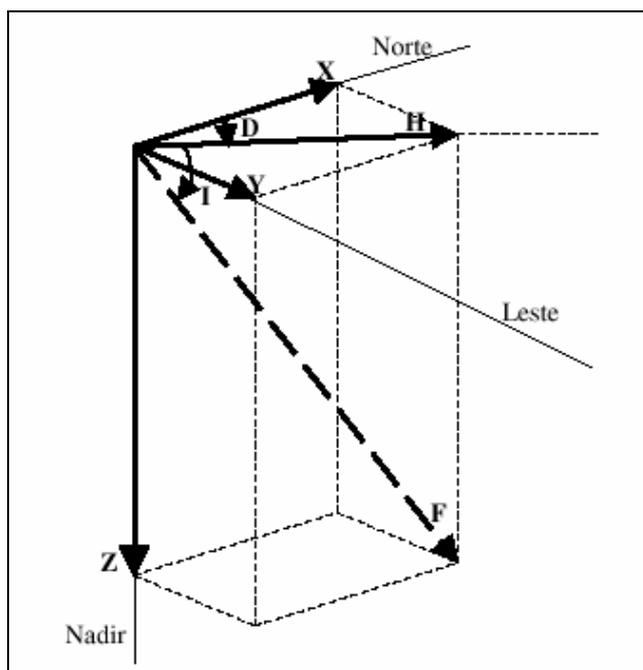


Figura 2.2 – Elementos do vetor campo geomagnético.

Na Figura 2.2 estão representados os elementos lineares e angulares do vetor campo geomagnético. Os elementos lineares são:

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

$Y$  – componente magnética leste (positiva para leste);  
 $Z$  – componente magnética vertical (positiva quando aponta para baixo);  
 $H$  – componente magnética horizontal (define o norte magnético local);  
 $F$  – intensidade total do campo magnético num determinado ponto.

Os elementos angulares são:

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

As variações geomagnéticas podem ser classificadas em seculares, diurnas (período de 24 horas), distúrbios (associados a tempestades magnéticas e com períodos bastante variáveis), pulsações (com períodos entre 0,2 e 1000s), atmosféricas (períodos inferiores a 1 s) e produzidas pelo homem, como mostra a Figura 2.3, sendo que as variações seculares são as únicas com origem interna à Terra.

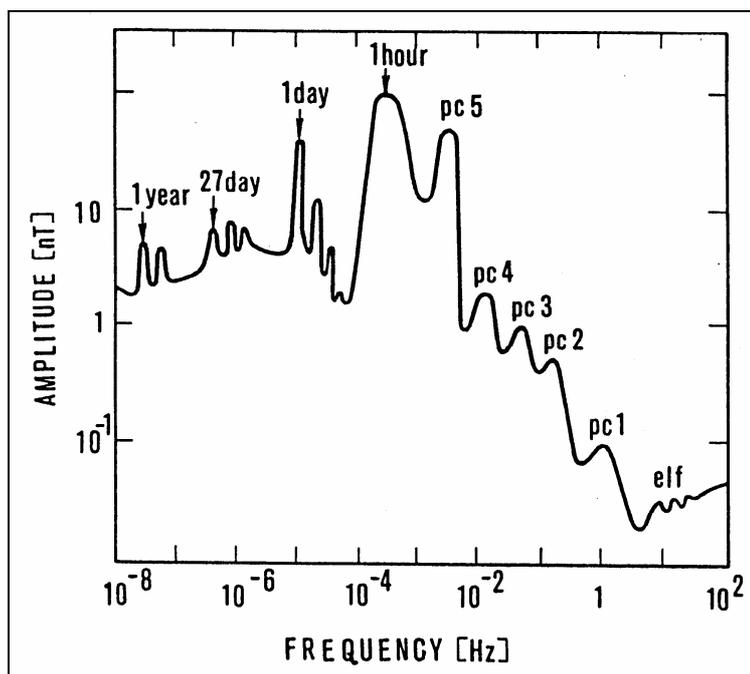


Figura 2.3: Amplitude das variações naturais da componente horizontal H.  
Fonte: Serson, 1973.

## 2.2 – FENÔMENOS SOLARES E SEUS EFEITOS GEOFÍSICOS

O Sol pode ser dividido em interior solar e atmosfera solar (Figura 2.4). O interior é constituído de Núcleo, Zona Radiativa e Zona Convectiva. A parte externa é composta por: Fotosfera, Cromosfera e Coroa.

O interior solar possui um núcleo radiativo e um envelope convectivo que pode chegar até a superfície. A energia emitida pelo Sol se origina de reações nucleares que ocorrem no seu centro e demora  $10^7$  anos para ser transportada pela Zona Radiativa e em seguida pela Zona Convectiva até atingir a superfície, onde a temperatura é de aproximadamente 5.800 K. O interior solar é formado pelo Núcleo, que se estende até 0,25 raios solares, onde a energia é gerada através de reação de fusão nuclear, apresentando uma temperatura,  $T$ , da ordem de  $1,5 \times 10^7$  K e densidade  $\rho \sim 1,6 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ ; pela Zona Radiativa, se estendendo no intervalo de 0,25 a 0,75 raios solares, onde a energia gerada no núcleo é dissipada através do processo de difusão radiativa, tendo uma temperatura da ordem de  $8 \times 10^6$  K e pela Zona de Convecção, estendendo-se no intervalo de 0,75 a 1 raio solar, com temperatura no intervalo de  $5 \times 10^5$  a 6600 K e onde a energia é dissipada sob a forma de convecção.

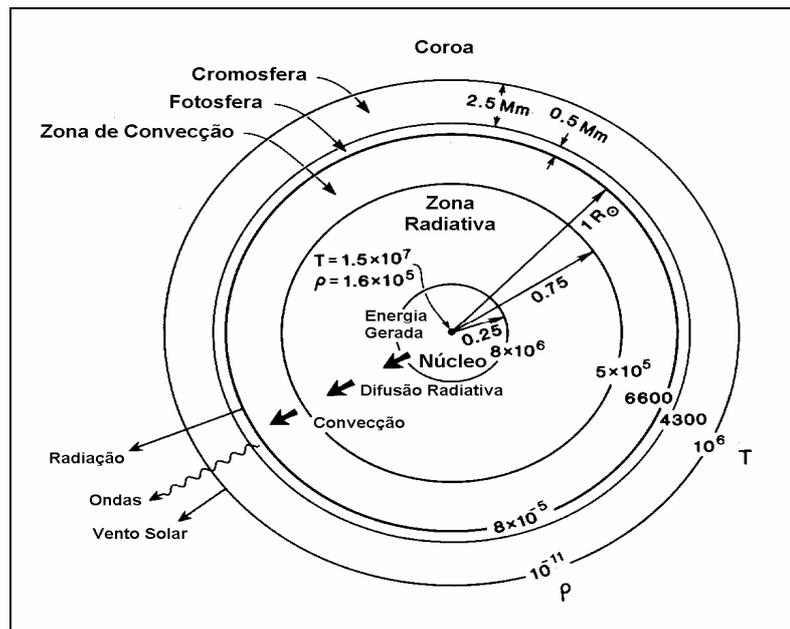


Figura 2.4: Estrutura do interior solar e atmosfera.

Fonte: Kivelson e Russell (1995, p.61).

A luz emitida pelo Sol se origina na atmosfera solar, que consiste em três diferentes camadas: fotosfera, cromosfera e coroa. A fotosfera contribui com a maior quantidade de

luz recebida na Terra e também é a região em que ocorrem as erupções solares “flares” e as proeminências.

Perturbações na alta atmosfera da Terra seguem-se a perturbações solares, que podem ser separadas em perturbações produzidas por radiação ultravioleta ou Raios X e aquelas produzidas por radiação corpuscular emitida por regiões solares perturbadas.

A seguir é feita uma breve apresentação do que são esses fenômenos solares, uma vez que eles estão intimamente relacionados com as variações detectadas no campo magnético Terrestre.

### 2.2.1 – EMISSÃO DE PARTÍCULAS PELO SOL

A emissão corpuscular por parte do Sol consiste de três tipos básicos:

- a) partículas com altas energias, associadas a “flares”;
- b) nuvens de plasma, associadas a “flares”;
- c) plasma que se evade continuamente da coroa solar, constituindo o Vento Solar.

### 2.2.2 – MANCHAS SOLARES

As primeiras manchas escuras no disco solar indicam uma perturbação no Sol. As manchas solares (Figura 2.5) são regiões onde se desenvolvem campos magnéticos de intensidades muito altas, da ordem de alguns milhares de gauss na parte central (3500 gauss, conforme medido através do efeito Zeeman nas linhas de absorção originárias dessas regiões) o que contrasta com campos da ordem de 1 gauss nas demais regiões.

O número de manchas solares atravessa um ciclo de 11 anos, aparecendo as primeiras a cerca de 40° de latitude solar e depois regredindo até o equador enquanto o número existente aumenta para depois diminuir.

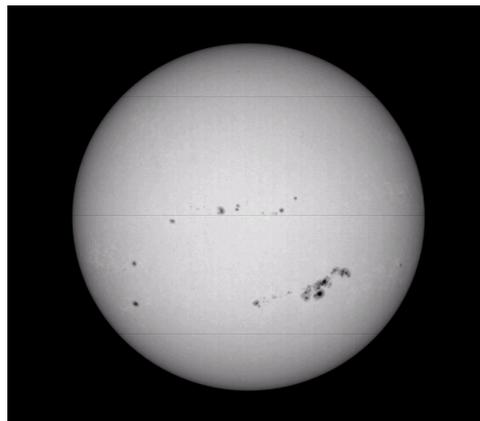


Figura 2.4: As manchas solares.

Fonte: [http://www.noao.edu/outreach/press/pr01/images/gong\\_sunspot.jpg](http://www.noao.edu/outreach/press/pr01/images/gong_sunspot.jpg)

### 2.2.3 – ERUPÇÕES OU “FLARES”

A energia liberada com estas erupções é muito grande. Para uma erupção intensa (Figura 2.6), a energia desprendida em poucos minutos pode atingir até  $10^{33}$  ergs, que excede toda a energia calorífica armazenada na cromosfera e coroa solares. A fonte para essa energia deve estar nos intensos e complicados campos magnéticos existentes nas regiões solares ativas.

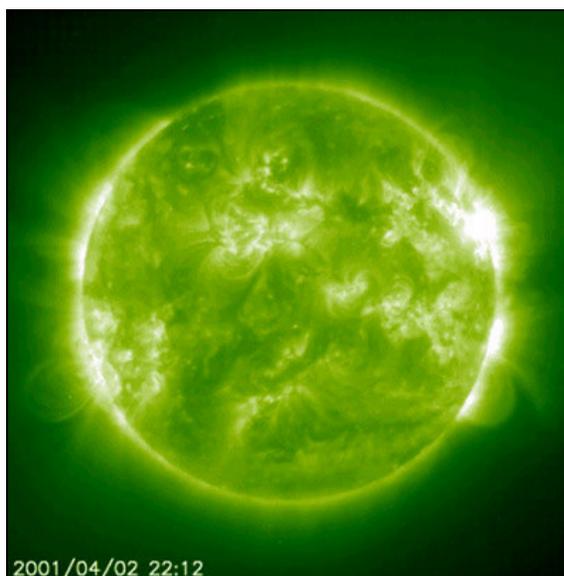


Figura 2.6: Flare observado dia 2 de Abril de 2001 às 22:12 UT.  
Fonte: [http://www.esa.int/esaSC/SEMHP700MD\\_index\\_1.html](http://www.esa.int/esaSC/SEMHP700MD_index_1.html)

### 2.3 – MAGNETOSFERA TERRESTRE

Medições feitas com satélites artificiais e foguetes indicam que, a grandes distâncias da Terra, próximo à fronteira externa da magnetosfera (mais de 70.000 Km de altura), as linhas de campo magnético Terrestre afastam-se daquelas previstas pelo modelo do dipolo. Tal afastamento apresenta-se na forma de uma variação diurna conforme vista de um ponto sobre a Terra girante, porém apresenta-se constante conforme visto por um observador inercial no sol, desprezando-se o efeito resultante do fato que o eixo de rotação da Terra e o eixo do dipolo magnético não coincidem.

Esta deformação é associada ao movimento da Terra através do meio interplanetário, e ao fluxo de plasma ejetado continuamente pelo sol, o vento solar.

Abramos aqui um parêntese a fim de estabelecer o conceito de plasma, uma vez que essa noção é de grande importância no entendimento dos vários fenômenos geomagnéticos. Quando um gás é elevado a temperaturas suficientemente altas ou

submetido à intensa radiação (X ou ultravioleta), os átomos e moléculas dos mesmos se tornam ionizados, sendo os elétrons são arrancados por violentas colisões entre as partículas, devido á agitação térmica, ou expulsos dos átomos como resultado da absorção de fótons com altas energias. Quando isso ocorre o comportamento dinâmico do gás passa a ser grandemente afetado por forças eletromagnéticas que agem sobre os íons e elétrons livres, e suas propriedades se tornam suficientemente diferentes das do gás normal não ionizado que se justifica uma mudança de denominação. Assim para se representar esse estado gasoso altamente ionizado, porem macroscopicamente neutro, escolheu-se o nome de plasma. A propriedade mais fundamental de um plasma é a sua tendência de permanecer eletricamente neutro. Quando por alguma razão, em uma dada região do mesmo a densidade de carga difere de zero, desenvolvendo-se altos potenciais que fazem as partículas carregadas moverem-se rapidamente de modo a reduzir as diferenças de potencial e restabelecer a neutralidade elétrica. É este fenômeno o principal responsável pelas oscilações hidromagnéticas e pelas várias peculiaridades associadas às ondas eletromagnéticas que se propagam em plasmas (Amarante, 1966).

O vento solar com seu continuo fluxo de plasma, ao passar pela Terra, liga-se às linhas do campo geomagnético e as arrasta consigo, trazendo como resultado uma compressão da Magnetosfera no lado oferecido ao sol e uma elongação da mesma no lado oposto, como é ilustrado na Figura 2.7.

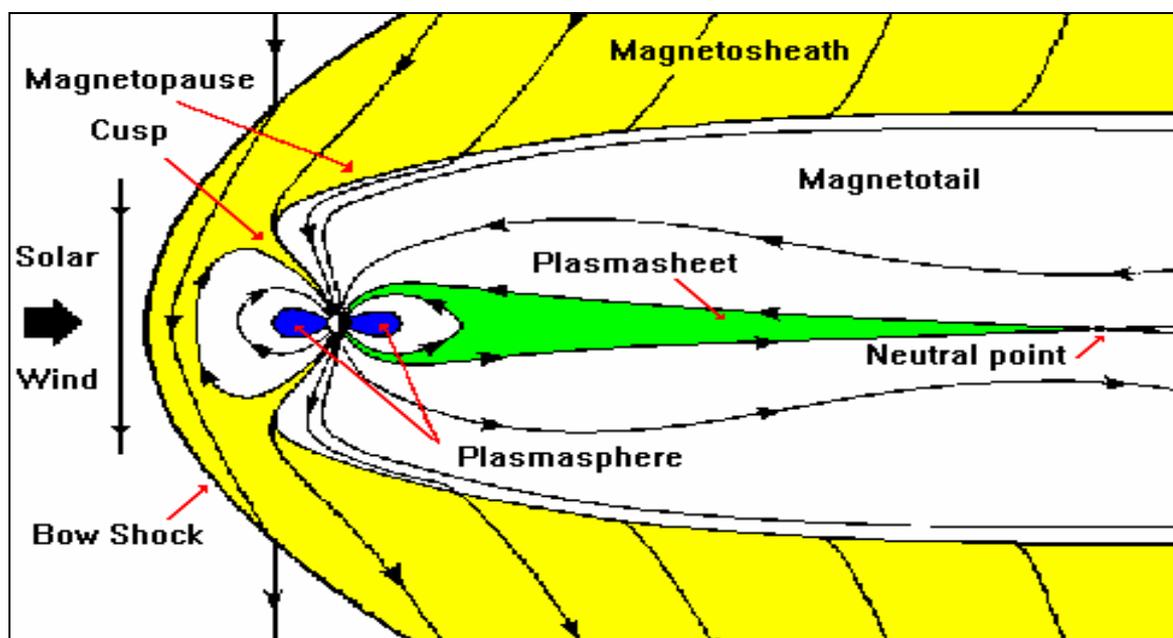


Figura 2.7: Magnetosfera Terrestre.

Fonte: <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere.html>

## 2.4 – CINTURÕES DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN

As linhas do campo geomagnético são curvas, e nas extremidades estão mais próximas à superfície da Terra. As partículas eletricamente carregadas nestas extremidades das linhas geomagnéticas (pontos de reflexão ou “mirror points”) são refletidas de volta à região equatorial e portanto o movimento giratório oscila entre os hemisférios norte e sul. Simultaneamente, o movimento helicoidal de giro sofre um deslocamento em longitude, elétrons para leste e íons para oeste, dando origem a uma corrente elétrica em grande escala, a corrente de anel ou “ring current”. O movimento das partículas assim descrito é possível devido à praticamente uma ausência de colisões, e é no sentido descrito acima que se costuma dizer que a magnetosfera é a região em que o campo magnético domina o movimento das partículas. Entre estas, as que giram em torno das linhas de campo magnético fechadas, são chamadas de partículas aprisionadas ou “trapped particles” cujas características dependem das condições geomagnéticas (Figura 2.8).

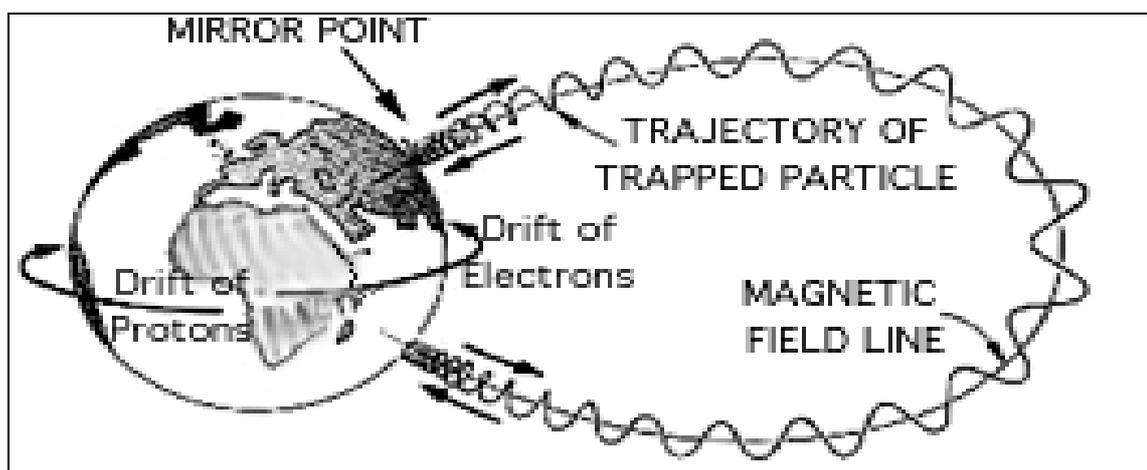


Figura 2.8: Trajetória das partículas aprisionadas.  
Fonte: <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Irdbelt.html>

Essas partículas aprisionadas constituem os cinturões de radiação, também denominados de cinturões de radiação de Van Allen (Figura 2.9) em homenagem ao cientista de Iowa que detectou a relativamente alta quantidade de elétrons e íons (radiação) energéticos que os compõe (Van Allen et. al., 1959).

O cinturão de Van Allen é composto de duas faixas, das quais a interior se situa entre 2200 e 5000 quilômetros ou 2 a 3 Re, e a exterior entre 13000 e 55000 quilômetros ou 3 a 7 Re da superfície da Terra. O Cinturão Interior é constituído principalmente de prótons de alta energia devido ao choque das partículas de raios cósmicos. O Cinturão Exterior é

formado principalmente por elétrons de alta energia, provenientes de raios cósmicos e por processos de aceleração magnetosféricos.

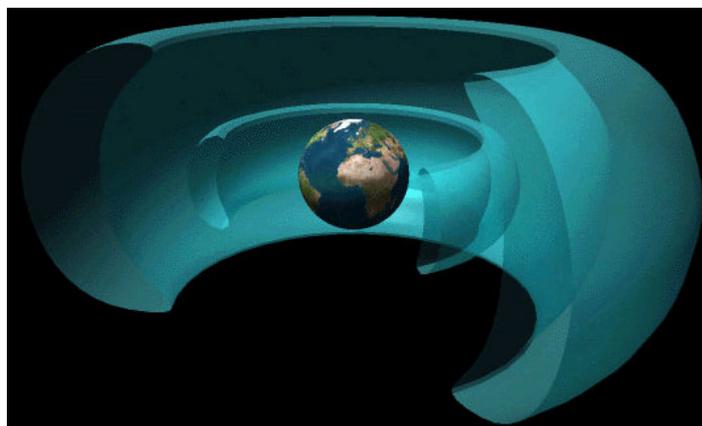


Figura 2.9: Cinturões de radiação de Van Allen

Fonte: [http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/glossary/radiation\\_belts.html&edu=high](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/glossary/radiation_belts.html&edu=high)

## 2.5 – VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

A variação geomagnética diurna é causada por sistemas de correntes elétricas, que se originam devido ao movimento das camadas atmosféricas ionizadas através das linhas do campo magnético Terrestre devido principalmente à atração gravitacional do Sol. Esses sistemas de corrente circulam na região E da Ionosfera (região da atmosfera, de aproximadamente 60 a 1000 km de altitude, em que a densidade de íons é alta o suficiente para afetar transmissões de ondas eletromagnéticas em rádio frequência) ilustrada na Figura 2.10, tendo dois vórtices localizados nas proximidades das latitudes 30°N e 30°S e são fixos no espaço em relação ao Sol, enquanto a Terra gira embaixo deles.

A variação diurna é função da época do ano, da atividade solar e da latitude geomagnética.

Com base no índice de atividade magnética K, podemos classificar os dias, de acordo com a atividade magnética, em calmos, perturbados e normais. A variação do campo magnético sobre dias magneticamente calmos é chamada variação Sq (do inglês, Solar quiet). Correspondentemente, para dias perturbados, a variação é chamada SD (Solar Disturbed). A variação que ocorre durante uma tempestade magnética é chamada Dst (Storm Time Disturbance).

Hibberd (1981) mostrou que para variações da componente horizontal H a maior parte dos efeitos de perturbações, que contaminam gravações em estações únicas, podem ser removidos pelo uso da diferença  $\Delta H$  dos valores de H em duas estações tendo a mesma longitude, mas diferentes latitudes. Perturbações devido a correntes magnetosféricas distantes são muito parecidas nas duas estações e acabam cancelando-se, mas os efeitos

devido a correntes ionosféricas continuam presentes. A diferença  $\Delta H$  será denotada por  $S_R$  ( $\Delta H$ ), ou simplesmente  $S_R$ . Os distúrbios magnéticos resultam da entrada de grandes quantidades de plasma solar na magnetosfera, por ocasião de tempestades magnéticas.

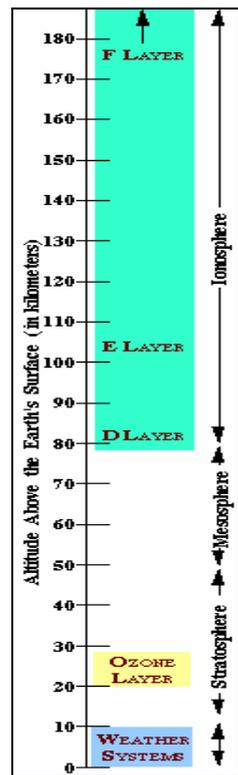


Figura 2.10: Divisão da Ionosfera em suas respectivas camadas.

Fonte: <http://www.sel.noaa.gov/>

As tempestades magnéticas são consequência do aumento de correntes magnetosféricas e ionosféricas devido à interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre, 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 três a quatro horas, uma fase principal, com várias horas de duração, e uma fase de recuperação, com duração de algumas horas a alguns dias, dependendo da intensidade da tempestade.

As pulsações geomagnéticas e os eventos transientes relacionam-se com interações complexas entre o vento solar e as camadas de plasma que constituem a magnetosfera e a ionosfera Terrestres. São geradas por flutuações na velocidade e densidade do vento solar

que, em contato com a magnetosfera, originam ondas hidromagnéticas. Essas ondas chegam até a ionosfera guiadas pelas linhas de campo geomagnético, causam precipitação de partículas, intensificam as correntes ionosféricas e são modificadas nessa interação, transformando-se em ondas eletromagnéticas.

Samson (1991) dividiu as pulsações geomagnéticas em dois tipos de pacotes de ondas:

- 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;
  - Pc6, período acima de 600 s.
- Pulsações Irregulares (Pi)
  - Pi1, período 1 a 40 segundos;
  - Pi2, período 40 a 150 s;
  - Pi3, período acima de 150 s.

No domínio da frequência, dividiu também os tipos de pulsações em três categorias: baixa frequência (1 – 10 mHz), média frequência (10 mHz – 0,1 Hz) e alta frequência (0,1 – 10 Hz).

Existe um tipo de variação magnética chamada Travelling Convection Vortices (TCVs), que são eventos magnéticos impulsivos observados em altas latitudes. Sua fonte é o vento solar e por isso são considerados importantes na transferência de energia do vento solar para dentro da magnetosfera.

Nos magnetogramas os TCVs são vistos como variações isoladas do campo magnético, com uma estrutura bipolar na componente H e uma variação positiva ou negativa na componente D. Quando diversas estações geomagnéticas, longitudinalmente separadas, são utilizadas, esta assinatura é vista propagando-se em direção a cauda da magnetosfera.

## 2.5 – ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

A mais baixa intensidade do Campo Magnético Terrestre é observada numa extensa região que compreende parte do Oceano Atlântico e parte do território Brasileiro. Como consequência direta desse fenômeno - denominado Anomalia Magnética Brasileira ou Anomalia Magnética do Atlântico Sul 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. Esta particularidade, descoberta no início da era dos satélites, nos anos 50, faz da região um singular laboratório natural de pesquisas sobre física do plasma e da radiação, geofísica,

geomagnetismo e aeronomia (investigação das camadas superiores da atmosfera). 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.

Medidas efetuadas ao longo dos últimos quatro séculos indicam que numa escala de alguns milhares de anos, essa região de baixa intensidade magnética tende a mover-se ao redor do Planeta, na direção leste-oeste. E observações astronômicas mostram que anomalias semelhantes a essa - que resulta, fundamentalmente, de uma não-coincidência entre os centros magnético e geográfico da Terra - devem ocorrer em muitos outros planetas do sistema solar, idéia reforçada pela recente verificação do fenômeno em Júpiter (Pinto Júnior e Gonzalez, 1989).

Na Figura 2.11 estão ilustradas as diversas regiões da superfície terrestre com sua respectiva intensidade do campo geomagnético total  $F$ . Observa-se claramente que a região onde o campo geomagnético tem sua menor intensidade cobre grande parte do território brasileiro.

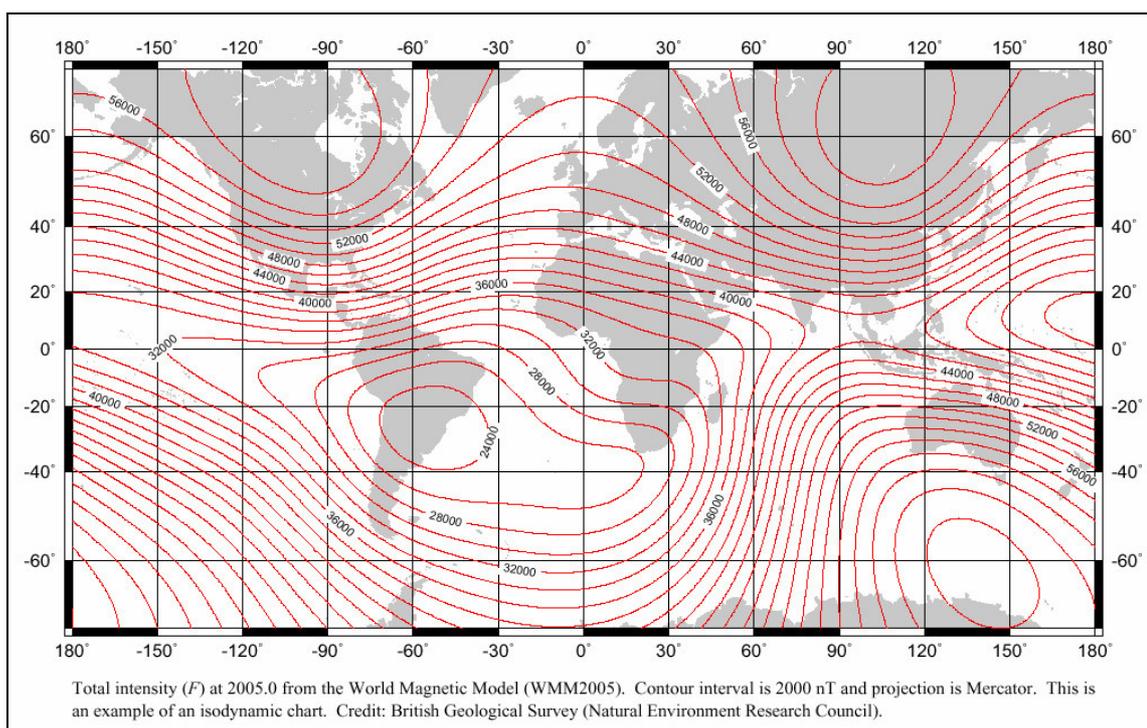


Figura 2.11: Carta Magnética Mundial do ano 2005, mostrando a intensidade total  $F$ , do Campo Magnético Terrestre.

Fonte: <http://geomag.usgs.gov/MagCharts>



## 2.6 – ELETROJATO EQUATORIAL

Consiste em correntes elétricas ionosféricas intensas que fluem na região E da ionosfera, durante as 06:00 e 18:00 horas LT “Local Time”, a uma altura de aproximadamente 100 a 115 km e largura de 500 a 600 km na direção Norte-Sul ao longo do equador magnético (região onde a inclinação magnética é igual a zero). Essas correntes elétricas tem intensidade máxima exatamente em cima do equador magnético, e sua intensidade vai diminuindo com a distância em relação a região de máxima intensidade, até ficar com a mesma intensidade das correntes ionosféricas Sq. Devido ao Eletrojato Equatorial ou “Equatorial Electrojet”, a escala da variação diurna da componente H (Norte-Sul) é maior próxima ao equador magnético quando comparada a regiões mais afastadas do equador magnético.

A importância do eletrojato equatorial é que nele se originam os sistemas de forças elétricas que regem a distribuição do plasma ionosférico em baixas latitudes, e assim influem nas características da radiopropagação (Sobral, 1999).

### CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A seguir serão comentados os instrumentos que fornecem os dados utilizados no desenvolvimento desse projeto.

#### 3.1 – MAGNETÔMETRO FLUXGATE DE NÚCLEO SATURADO

Neste equipamento, um núcleo altamente permeável, de fácil saturação, é utilizado para amplificar o sinal do campo magnético obtido. A propriedade de histerese do núcleo saturável é utilizada pela imposição de um campo oscilante intenso, que é cancelado pelo campo local. A intensidade do campo geomagnético é obtida pela geração de harmônicos de distorção no campo de saída, medidos pelo sensor secundário ao redor do núcleo. A quantidade de interesse é o segundo harmônico da frequência de excitação, gerado no range de saturação linear do sensor.

Um campo geomagnético ambiente  $H_0$  é sobreposto a um campo de excitação senoidal  $A$ ,  $A \gg H_0$ , no qual  $A$  é ajustado para ser tão grande quanto necessário para saturação do núcleo de alta permeabilidade. O cancelamento do campo assimétrico causado pela adição do campo ambiente,  $H_0$ , resulta numa distorção da forma da variação da densidade de fluxo magnético  $B$ , unindo-se a uma segunda bobina sensora enrolada ao redor do núcleo. Esta distorção da variação de  $B$  com relação ao tempo,  $t$ , contém harmônicos pares em suas componentes de Fourier. A função do campo de entrada pode ser aproximada como  $B(t) = a(H_0 + H_e) + b(H_0 + H_e)^3 + c(H_0 + H_e)^5$ , onde  $H_e$  é o campo de excitação e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes. Os harmônicos, a partir do terceiro, podem ser desconsiderados, pois são consideravelmente menores do que o segundo. Com um filtro de banda estreita, este segundo harmônico de saída é selecionado para tornar-se a medida do campo ambiente,  $H_0$ , depois de serem comparados a um segundo harmônico “artificial” a partir de uma duplicação da oscilação de excitação original. Com uma oscilação de excitação de aproximadamente 700 c/s, uma variação de  $1-\gamma$ , do campo ambiente, produz uma saída de aproximadamente 25  $\mu V$ . Para medidas de sinais fracos, são utilizados dois núcleos em direções opostas no circuito de excitação, e uma bobina secundária cercando ambos. As duas contribuições primárias, nas bobinas com núcleo saturado postas em direções opostas, são então canceladas, como mostra a Figura 3.1 (Campbell, 1997).

Os magnetômetros fluxgate de núcleo saturado e baixo ruído, com uma taxa de aquisição a cada dois segundos (0,5 Hz) fornecem os dados das variações geomagnéticas detectadas na superfície terrestre, para as componentes H (Norte-Sul), D (Leste-Oeste) e Z (Vertical), sendo que o relógio do equipamento é sincronizado com os sinais do sistema GPS. Neste projeto usamos os dados geomagnéticos adquiridos na estação geomagnética do Observatório Espacial do Sul, na estação geomagnética do Observatório Geomagnético de Vassouras e na estação geomagnética do Observatório Espacial de São Luis. Na Figura 3.2 são mostrados os sistemas de aquisição e armazenamento de dados geomagnéticos do

magnetômetro fluxgate instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS.

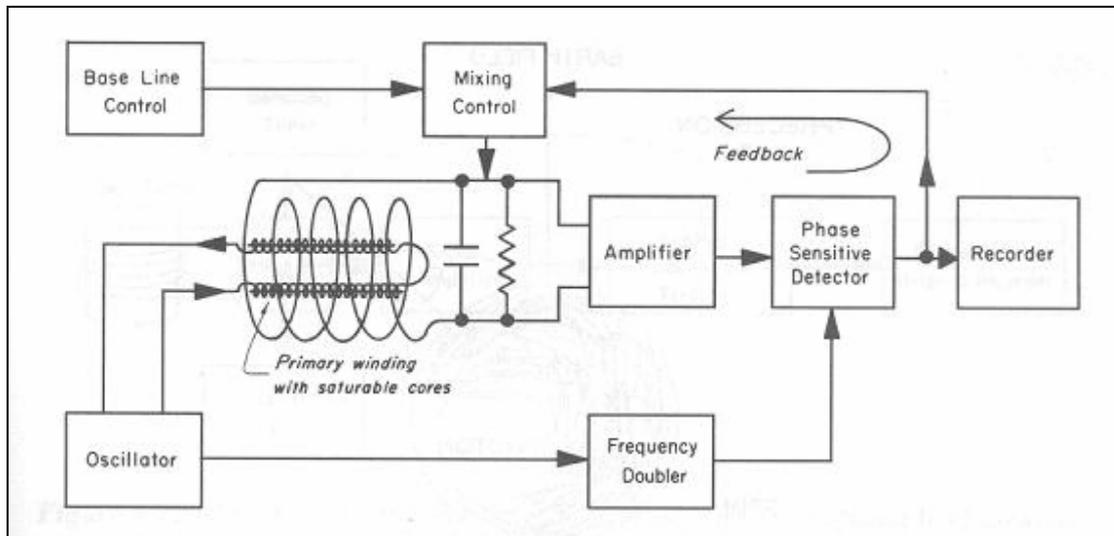


Figura 3.1: Magnetômetro Fluxgate para medida direcional do campo geomagnético.

Fonte: Campbell, 1997

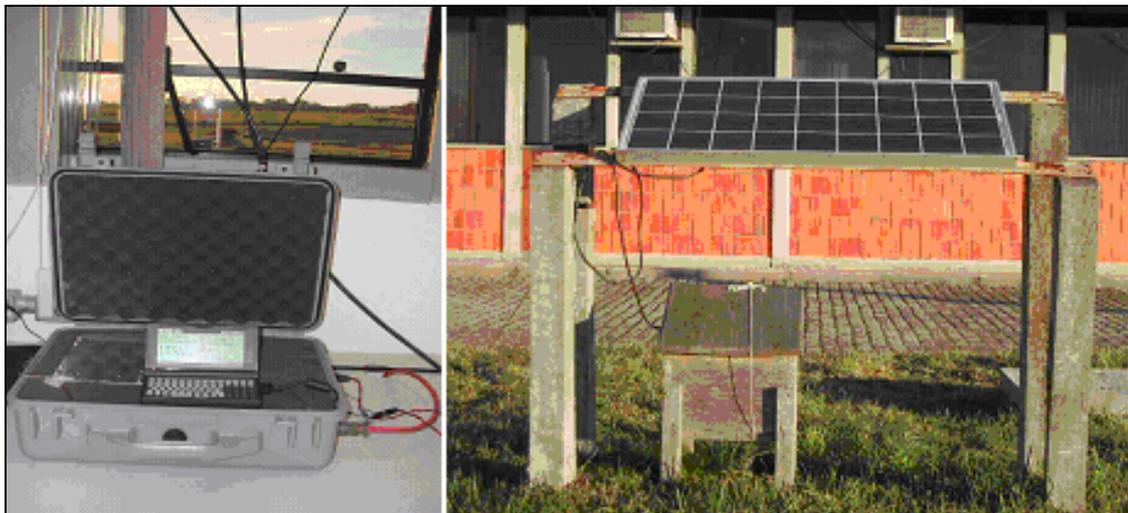


Figura 3.2: Magnetômetro fluxgate instalado no OES/CRSPE/INPE-MCT.

### 3.2 – SATÉLITE ACE

O satélite ACE (Advanced Composition Explorer), ilustrado na Figura 3.3, foi lançado em 25 de Agosto de 1997 pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) com o objetivo de determinar a composição isotópica e química de diferentes amostras de matéria, incluindo a da coroa solar, do meio interplanetário, do meio interestelar local e da Galáxia.



Figura 3.3: Satélite ACE.

Fonte: <http://helios.gsfc.nasa.gov/ace/gallery.html>

O satélite ACE está em órbita no ponto L1, ponto de equilíbrio gravitacional entre a Terra e o Sol (Figura 3.4).

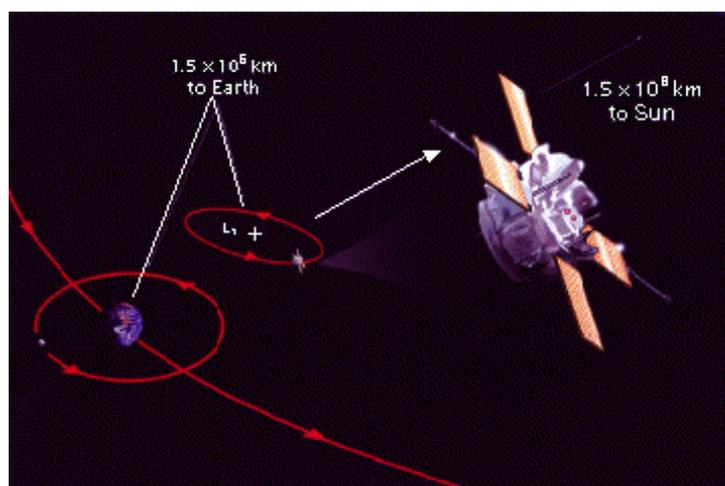


Figura 3.4: Posição do satélite ACE no espaço.

Fonte: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace\\_mission.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html) - summary



O satélite ACE fornece os dados das variações observadas nos parâmetros do meio interplanetário.

## CAPÍTULO 4 - SELEÇÃO DOS DADOS E METODOLOGIA EMPREGADA

### 4.1 – SELEÇÃO DOS DADOS

Objetivando-se encontrar correlações entre os parâmetros interplanetários do vento solar e variações observadas no campo geomagnético na superfície terrestre, escolheu-se os dados a serem analisados, de acordo com índice Dst. O índice Dst, baseado em medidas de observatórios magnéticos próximos ao equador, é uma medida da intensidade da corrente de anel durante uma tempestade magnética (Fernandez, 2002).

Os eventos escolhidos são as tempestades geomagnéticas ocorridas entre os dias 28 e 31/05/2003, 17 e 20/08/2003, 27 a 31/10/2003, 03 a 05/11/2003.

### 4.2 – METODOLOGIA EMPREGADA

Foi realizada a coleta contínua e o processamento dos dados geomagnéticos adquiridos no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, e no Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ, e igualmente para os parâmetros de Plasma Solar através de dados fornecidos pelos satélites ACE e WIND.

É importante salientar que inicialmente estava prevista a utilização dos dados geomagnéticos do Observatório Espacial do Sul (29.43°S, 53.80°W) e do Observatório Geomagnético de Vassouras (22.40°S, 43.65°W), porém com o objetivo de se fazer uma análise mais completa a respeito das variações geomagnéticas detectadas no Brasil durante tempestades geomagnéticas, também foram utilizados dados geomagnéticos do Observatório Espacial de São Luís (2.6°S, 44.2°W) que está localizado na linha do equador magnético.

Os dados geomagnéticos adquiridos e gravados em formato binário são convertidos para o formato ASCII. O arquivo de dados no formato ASCII é constituído por 43200 linhas de dados, correspondentes a uma aquisição a cada dois segundos para um dia e para as três componentes do campo geomagnético.

Após a seleção dos dias a serem analisados, foram construídos, inicialmente, os gráficos dos parâmetros do plasma solar no meio interplanetário. Os parâmetros utilizados nesse projeto são: velocidade do vento solar (V), pressão dinâmica (Dyn Press), campo elétrico interplanetário (E) e componente Z do campo magnético interplanetário (Bz).

Esses parâmetros são utilizados para que possamos identificar o momento do choque das partículas emitidas pelo Sol, durante um distúrbio solar, e seus conseqüentes efeitos no campo magnético terrestre, quando comparados as variações detectadas nas três componentes do campo geomagnético.

Tomando-se médias por minuto, nos arquivos com 43200 aquisições, obtemos arquivos de 1440 valores por dia (sendo um correspondente a cada minuto). As médias são feitas através do programa ConvNarod1440.m em linguagem MATLAB.

Posteriormente, á esses arquivos de 1440 valores, foi aplicado um filtro passa-banda (programa FIGMTM5.m), objetivando a eliminação da variação diurna e deixando passar apenas as variações no intervalo de 180 a 900s, ou seja, apenas pulsações geomagnéticas na faixa das Pc5 e Pc 6.

Após, para os períodos de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas durante um determinado dia, utilizamos novamente o programa FIGMTM5.m para se fazer a análise dos parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas correspondentes as pulsações geomagnéticas detectadas.

Finalmente, comparamos os parâmetros de polarização obtidos para as estações geomagnéticas anteriormente mencionadas.

A seguir são descritas sucintamente algumas técnicas de análise de dados que foram utilizados no desenvolvimento deste projeto.

#### 4.2.1 - FILTRO PASSA BANDA

Ao plotarmos o gráfico da intensidade do campo geomagnético versus tempo, este gráfico nos mostrará a variação diurna (período de 24 horas) do campo geomagnético. Como o objetivo deste trabalho é estudar as pulsações geomagnéticas com períodos entre 180 e 900 segundos, faz-se necessário filtrar o sinal da variação diurna, permitindo que passem somente os sinais das micropulsações.

Para fins de filtragem de sinais digitais existem filtros que operam no domínio do tempo, deixando passar somente o sinal acima ou abaixo de uma determinada frequência. A esses filtros dá-se o nome de filtros passa alta e passa baixa, respectivamente (Zanandrea, 1994). Para estudar as micropulsações geomagnéticas necessita-se de um filtro que deixe passar apenas sinais em uma banda de frequência. A esses filtros dá-se o nome de filtros passa-faixa ou passa-banda. Neste trabalho utilizamos o filtro BANDPASS.m em linguagem MATLAB.

#### 4.2.2 – ANÁLISE DE FOURIER

Um processo físico pode ser descrito no domínio do tempo, por uma quantidade  $h$  como função do tempo,  $h(t)$ , e também no domínio da frequência,  $H(f)$ , com  $-\infty < f < \infty$ . Para muitos propósitos é usual pensar que  $h(t)$  e  $H(f)$  são representações diferentes da mesma função. As relações entre  $h(t)$  e  $H(f)$  são dadas pelas equações da transformada de Fourier:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

e

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4.2)$$

onde  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular dada em radianos por segundo. Se  $t$  é medido em segundos, então  $f$  é dado em ciclos por segundo ou Hz (unidade de frequência). Entretanto, as equações (4.1) e (4.2) podem ser operadas em qualquer unidade (Press et al., 1996 e Stearms, 1975).

A potência total de um sinal pode ser calculada tanto no domínio do tempo como no domínio de frequência. A relação entre os dois resultados é dada pelo teorema de Parseval.

$$\text{potência} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \quad (4.3)$$

#### 4.2.3 – TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Suponhamos que temos  $N$  pontos consecutivos de uma mostra ( $N$  dados), ou seja:

$$h_k \equiv h(t_k), t_k = k\Delta, k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4.4)$$

onde  $\Delta$  é o intervalo de amostragem,  $t$  é o tempo (ou uma abscissa qualquer),  $h$  é uma função (sinal) em análise.

O recíproco do intervalo de amostragem  $\frac{1}{\Delta}$  é chamado de taxa de amostragem e se  $\Delta$  é medido em segundos, a taxa de amostragem é o número de amostras por segundo.

Para qualquer intervalo de amostragem temos uma frequência especial  $f_c$  chamada de frequência de Nyquist (ou frequência crítica de Nyquist) que é dada por:

$$f_c = \frac{1}{(2\Delta)} \quad (4.5)$$

O valor de  $f_c$  representa a maior frequência de espectro a ser obtida, ou seja, o espectro estará na faixa de frequência de  $-f_c < f < f_c$ .

Desta maneira, estima-se a transformada discreta de Fourier na faixa de frequência de  $-f_c < f < f_c$  nos valores discretos.

$$f_n = \frac{n}{(N\Delta)}, n = \frac{-N}{2}, \dots, \frac{N}{2} \quad (4.6)$$

A transformada de Fourier

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (4.7)$$

será aproximada para a soma discreta:

$$H(f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2\pi i f_n t} dt \cong \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{-2\pi i f_n t_k} \Delta = \Delta \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{-2\pi i k n / N} \quad (4.8)$$

onde foi usado  $t_k = k\Delta$  e  $f_n = \frac{n}{(N\Delta)}$ . A equação 4.8 é chamada de transformada discreta de Fourier. Pode-se ainda escrever  $H_n$ :

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{-2\pi i k n / N} \quad (4.9)$$

A transformada discreta de Fourier mapeia  $N$  números complexos de  $h_k$  para  $H_n$ . Ela não depende de qualquer parâmetro dimensional, tal como o intervalo de amostragem  $\Delta$ .

A transformada discreta inversa de Fourier, através da qual pode-se recuperar os dados da amostra, é dada por:

$$h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n e^{2\pi i k n / N} \quad (4.10)$$

#### 4.2.4 – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

O tempo de computação da transformada de Fourier é muito grande. Definindo  $W$  como o número complexo:

$$W = e^{-2\pi i / N} \quad (4.11)$$

nos leva a ter para a transformada discreta de Fourier:

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} h_k \quad (4.12)$$

Então o vetor  $h_k$  é multiplicado por uma matriz cujos elementos  $(n,k)$  são as constantes  $W^{nk}$  para a potência  $n \times k$ . A matriz multiplicação produz um vetor resultante cujas componentes é a função  $H_n$ . A matriz multiplicação requer  $N^2$  multiplicações, mais um número menor de operações para gerar as potências de  $W$ . Desta forma, a transformada discreta de Fourier opera em  $N^2$  processos. Este número pode ser reduzido para  $N \log_2^N$  operações usando algum algoritmo conhecido como transformada rápida de Fourier (FFT). Como a diferença entre  $N^2$  e  $N \log_2^N$  é imensa, o tempo de computação é bastante reduzido para valores grandes de  $N$ .

#### 4.2.5 – ESPECTRO DE POTÊNCIA

Se  $f(t)$  é uma função que representa um sinal obtido no tempo  $t$ , então pode-se fazer uma análise espectral deste sinal usando a transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4.13)$$

onde a função  $F(\omega)$  representa o espectro correspondente a  $f(t)$ . Em muitos casos, entretanto, é mais apropriado considerar a potência de um sinal em vez de sua amplitude ou deslocamento. Neste sentido, define-se potência como sendo proporcional ao quadrado da amplitude. O espectro correspondente é designado por espectro de potência (Thomson, 1977).

A potência média para uma função real  $f(t)$  é definida pela expressão:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt \quad (4.14)$$

quando este limite existe (Bath, 1974 e Marple, 1987).

O fator  $|f(t)|^2$  é chamado de potência instantânea de  $f(t)$ , e a integral:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (4.15)$$

é a energia total de  $f(t)$ , quando a integral converge.

A potência de uma sinal  $f(t)$  está relacionada ao espectro de potência correspondente  $H(\omega)$  através do teorema de Parseval:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega \quad (4.16)$$

A quantidade real  $|H(\omega)|^2$  é comumente chamada de espectro de potência ou espectro de energia, ou mais precisamente, densidade espectral de potência ou densidade espectral de energia. A densidade espectral de energia é expressa em unidades de energia por unidade ou intervalo de frequência. No teorema de Parseval, o termo  $|H(\omega)|^2$  não carrega a informação sobre a fase do espectro da função do tempo. Isto significa que é impossível recuperar o sinal original  $f(t)$  se o espectro é dado. Significa também que os sinais com idênticas amplitudes de espectro, mas diferentes fases, teriam a mesma potência. Portanto o espectro de potência não carrega a informação completa do sinal original já que a fase é uma variável perdida.

Agora, supondo que  $c(t)$  seja uma função que representa uma amostra de  $N$  pontos com valores  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$  e estes pontos estejam dispostos em um tempo  $T$ , ou seja:  $T = (N - 1)\Delta$ . A potência total é expressa então por:

$$\frac{1}{T} \int_0^T |c(t)|^2 dt \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} |c_j|^2 \quad (4.17)$$

Quando se tem uma amostra com  $N$  pontos de uma função  $c(t)$  em intervalos iguais e usamos a FFT para calcular a transformada discreta de Fourier:

$$C_k = \sum_{j=0}^{N-1} c_j e^{-2\pi i j k / N}, \text{ com } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4.18)$$

o espectro de potência (periodograma) vai ser definido em  $\frac{N}{2} + 1$  frequências como:

$$P(0) = P(f_0) = \frac{1}{N^2} |C_0|^2 \quad (4.19)$$

$$P(k) = p(f_k) = \frac{1}{N^2} \left[ |C_k|^2 + |C_{N-k}|^2 \right] \text{ com } k = 1, 2, \dots, \left( \frac{N}{2} - 1 \right) \quad (4.20)$$

$$P(k) = P(f_{N/2}) = \frac{1}{N^2} |C_{N/2}|^2 \quad (4.21)$$

onde  $f_k$  é definida somente para frequências positivas e zero:

$$f_k \equiv \frac{k}{N\Delta} = \frac{2f_c k}{N} \text{ com } k = 1, \dots, N/2 \quad (4.22)$$

onde  $f_c = \frac{1}{2\Delta}$  e o teorema de Parseval na forma discreta:

$$\sum_{j=0}^{N-1} |c_j|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-2} |C_k|^2 \quad (4.23)$$

foi usado para relacionar a função  $C_k$  a  $c_j$  (Press et al., 1986).

#### 4.2.6 – SUAVIZAÇÃO DO ESPECTRO

Na seção anterior, viu-se que quando se tem uma série temporal com  $N$  pontos, tomada em intervalos de tempo ( $\Delta$ ) iguais, podemos obter o espectro de potência para  $\frac{N}{2} + 1$  harmônicos através das equações 4.19, 4.20 e 4.21. Os períodos que aparecem neste espectro, não estão igualmente espaçados. Para corrigir este problema, usa-se transformar a escala de período em logarítmica ( $\log^T$ ). Na maioria dos casos o número de harmônicos  $\frac{N}{2} + 1$  do espectro de potência é muito grande, o que dificulta a visualização dos resultados. Costuma-se, então suavizar o espectro, dividindo-o em bandas de períodos linearmente espaçados na escala logarítmica.

A suavização do espectro é obtida dividindo o espectro de potência em bandas de frequência.

#### 4.2.7 – POLARIZAÇÃO DE ONDAS

Os métodos de estimação dos parâmetros de polarização em função da frequência são muito importantes na análise de sinais geomagnéticos, pois o campo magnético registrado, de acordo com o princípio da superposição, é resultado da soma de diversas ondas, que são geradas por processos físicos distintos e se propagam por diferentes meios materiais, de forma que podem apresentar diferentes padrões espectrais e de polarização.

Baseados nos princípios de ótica estatística, aplicados a ondas quase monocromáticas, Fowler et al., 1967, desenvolveram uma técnica para determinar os parâmetros de polarização como: o grau de polarização, elipticidade, azimute e fase, através de uma matriz espectral, para o plano de onda em duas dimensões. Contudo, os dados para o estudo de ondas ULF usualmente envolvem medidas em um sistema de coordenadas tridimensional. Samson (1973; 1977; 1983a, b, c) descreveu um método de estimação dos parâmetros de polarização em função da frequência. Esta técnica usa uma matriz espectral para fazer a análise de polarização de onda em função da frequência espectral. Os parâmetros de polarização são importantes para o estudo de modelos de geração e propagação de ondas no meio magnetosférico.

O vetor campo magnético de uma onda descreve uma elipse de polarização. O grau de polarização, é a taxa entre a energia polarizada e a energia total. Se o grau de polarização for igual a 100%, a onda é totalmente polarizada e, se for igual a 0%, a onda é totalmente não polarizada. A elipticidade  $\varepsilon$ , é a razão entre o comprimento do eixo menor e o maior da elipse. A elipse de polarização é linear quando  $\varepsilon \rightarrow 0$  e circular quando  $\varepsilon \rightarrow 1$ . O sentido de polarização é dado pelo sinal da elipticidade (que pode variar entre  $-1 \leq \varepsilon \leq 1$ ), sendo polarizada a direita ou no sentido dos ponteiros do relógio, quando  $\varepsilon > 0$  e polarizada a esquerda ou contra os ponteiros do relógio, quando  $\varepsilon < 0$ , visto do plano de propagação da onda. O ângulo de polarização ou azimute  $\psi$ , é o ângulo formado entre o eixo maior da elipse e o eixo x no plano XY, onde  $-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ . Quando  $\psi > 0^\circ$  o eixo maior da elipse está na direção do primeiro e terceiro quadrantes e se  $\psi < 0^\circ$  então o eixo maior da elipse está na direção do segundo e quarto quadrantes (Zanandrea, 1999). Uma descrição mais completa do método de análise de polarização de ondas eletromagnéticas pode ser encontrado em Zanandrea (1999) e Pereira (1993).



## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO

A seguir são feitas análises das tempestades geomagnéticas ocorridas durante os dias 28 a 31/05/2003, 17 a 20/08/2003, 27 a 31/10/2003 e 03 a 05/11/2003. Esses eventos foram selecionados através dos dados do índice Dst, dos parâmetros do plasma solar no meio interplanetário e das variações geomagnéticas detectadas na superfície terrestre.

Os dados do índice Dst são fornecidos pela Universidade de Kyoto, Japão, através do site <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>. As tempestades geomagnéticas são agrupadas em três grupos característicos, de acordo com sua intensidade em, fracas:  $-50nT \leq Dst \leq -30nT$ ; moderadas:  $100nT \leq Dst \leq 50nT$ ; intensas:  $Dst < -100nT$  (Gonzalez et. al.,1994).

Os dados dos parâmetros do Plasma Solar do satélite ACE são fornecidos pela Universidade da Califórnia (UCLA), Estados Unidos, através do site [http://www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/polar/corr\\_data.html](http://www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/polar/corr_data.html).

Os dados geomagnéticos correspondem às variações geomagnéticas detectadas pelos magnetômetros fluxgate instalados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS (SMS), no Observatório Geomagnético de Vassouras, RJ (VSS), e no Observatório Espacial de São Luís, MA (SLZ).

### 5.1 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 28 E 31 DE MAIO DE 2003.

A Figura 5.1 mostra uma queda no índice Dst (Dst Index) no dia 29/05/2003, que aliada às variações nos parâmetros do plasma solar, velocidade (V), pressão dinâmica (Dyn Press), campo elétrico interplanetário (E) e componente Z do campo magnético interplanetário (Bz), indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética intensa.

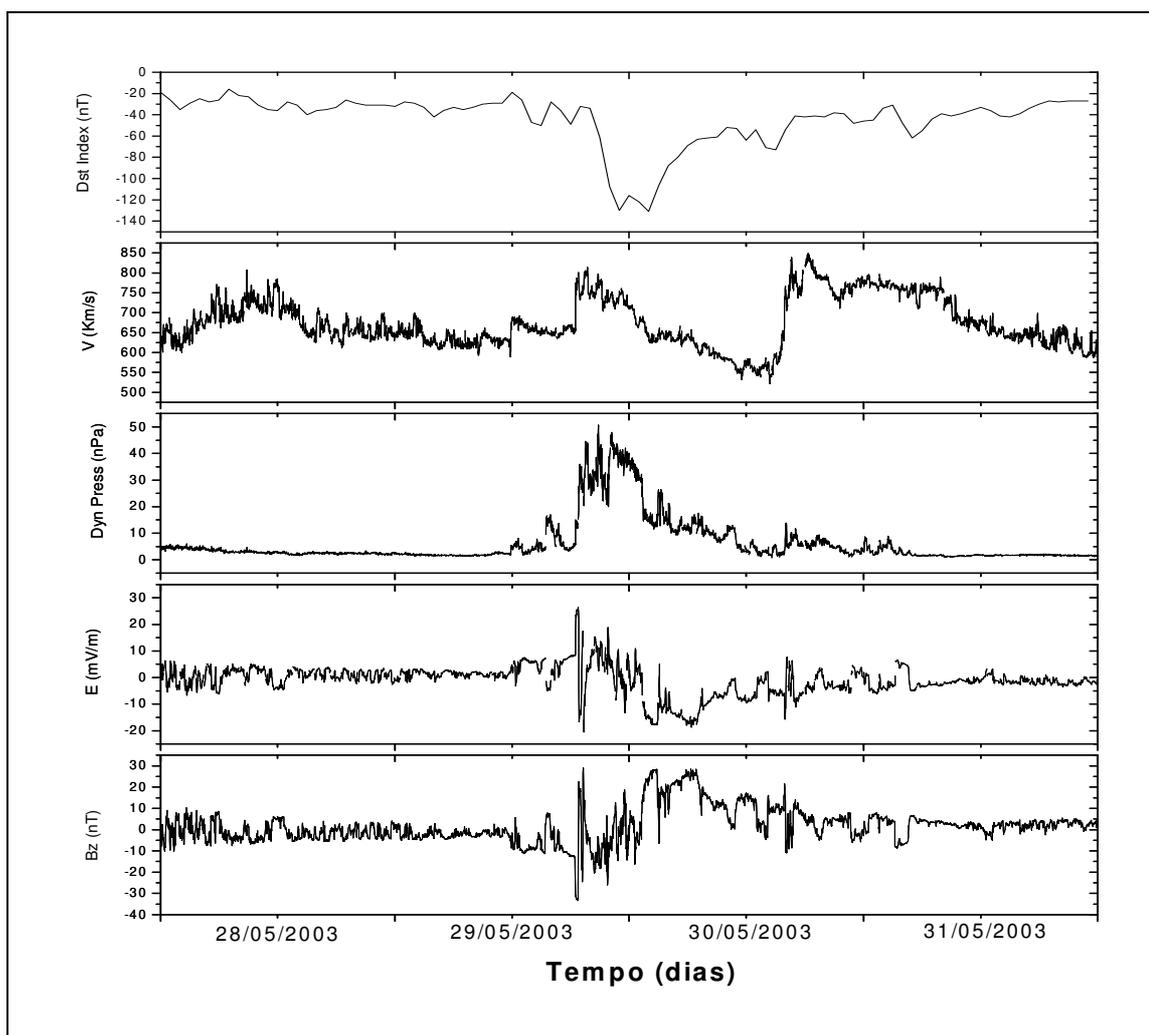


Figura 5.1: Índice Dst e parâmetros do plasma solar para o período entre 28 e 31/05/2003.

A Figura 5.2 mostra as variações geomagnéticas detectadas nas estações geomagnéticas do Observatório Espacial do Sul (SMS), do Observatório Geomagnético de Vassouras (VSS) e do Observatório Espacial de São Luís (SLZ) para as componentes H e D do campo geomagnético.

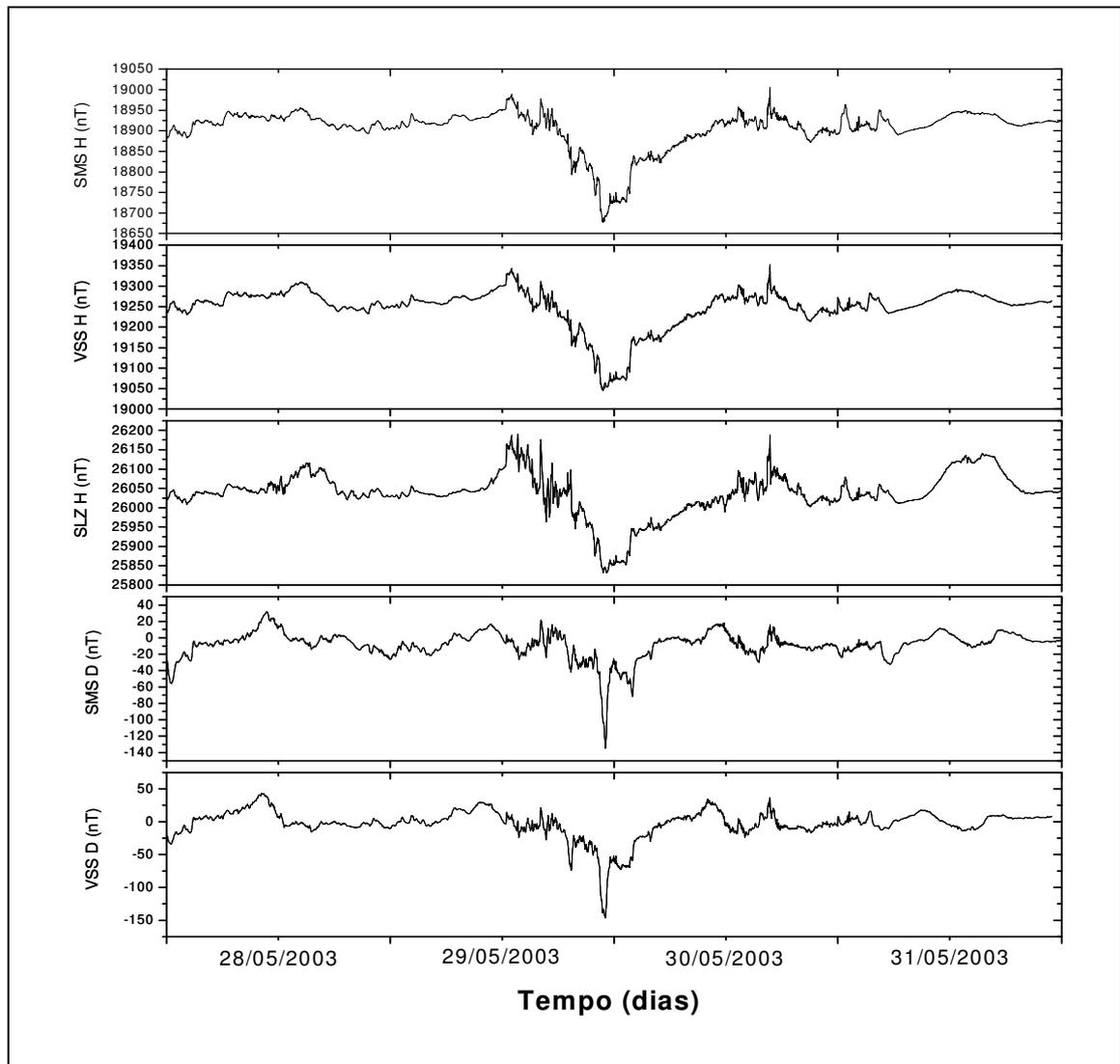


Figura 5.2: Variações geomagnéticas detectadas em SMS, VSS e SLZ.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 28/05/2003.

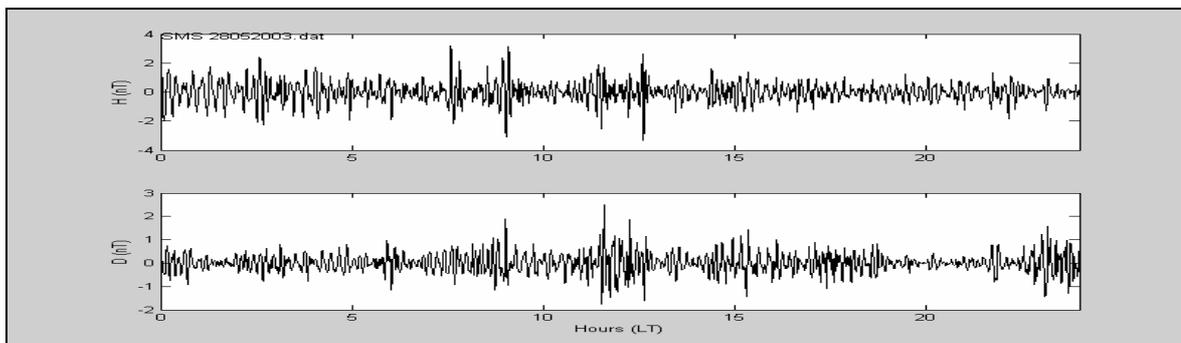


Figura 5.3: Dados filtrados de SMS.

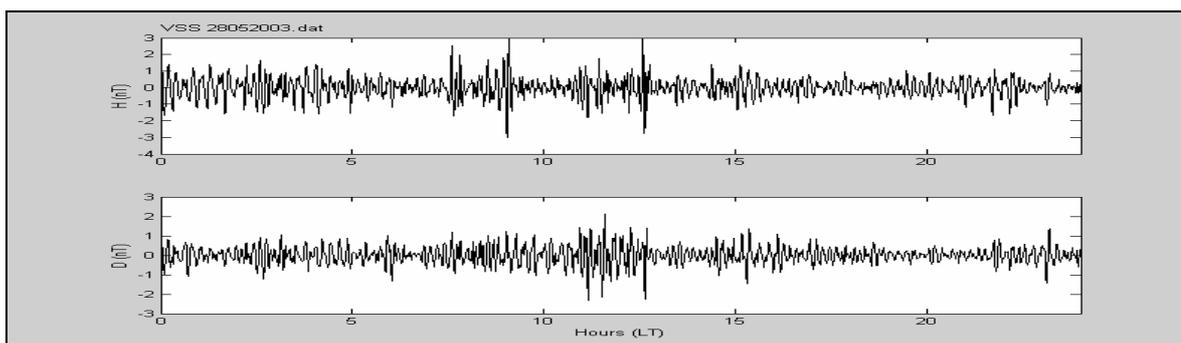


Figura 5.4: Dados filtrados de VSS.

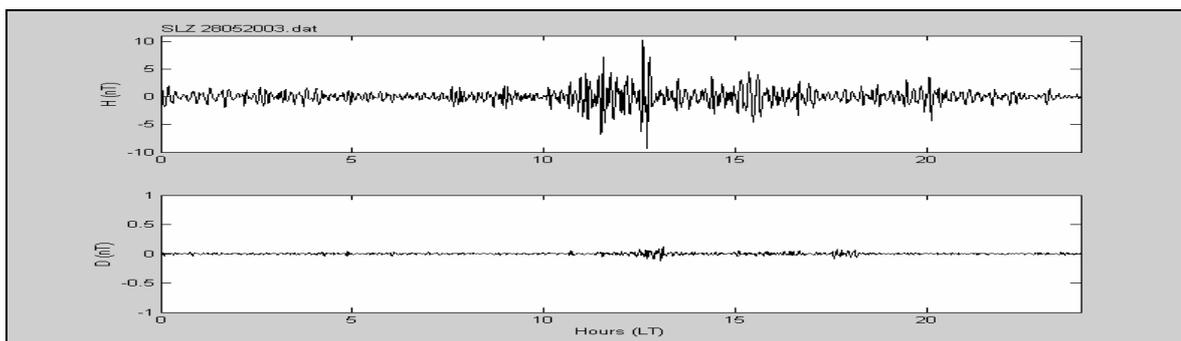


Figura 5.5: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 29/05/2003.

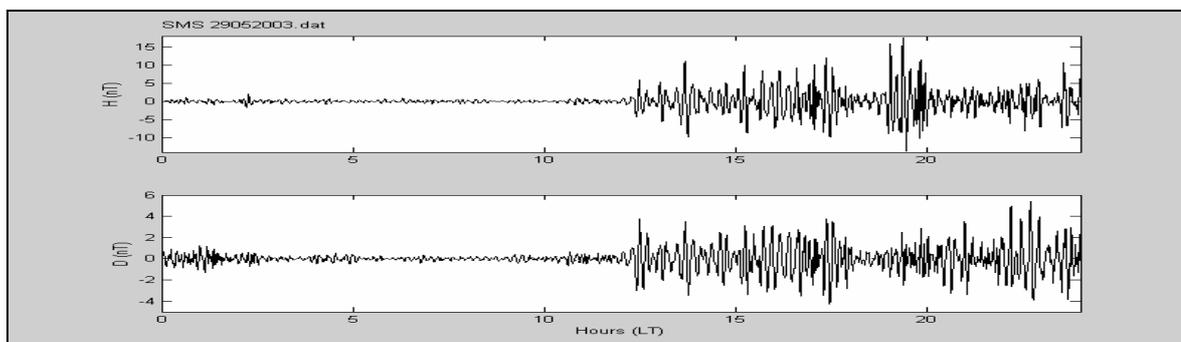


Figura 5.6: Dados filtrados de SMS.

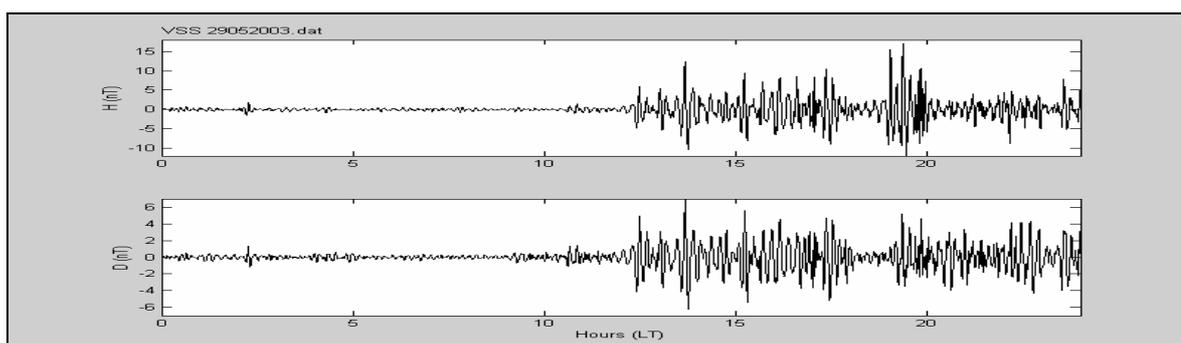


Figura 5.7: Dados filtrados de VSS.

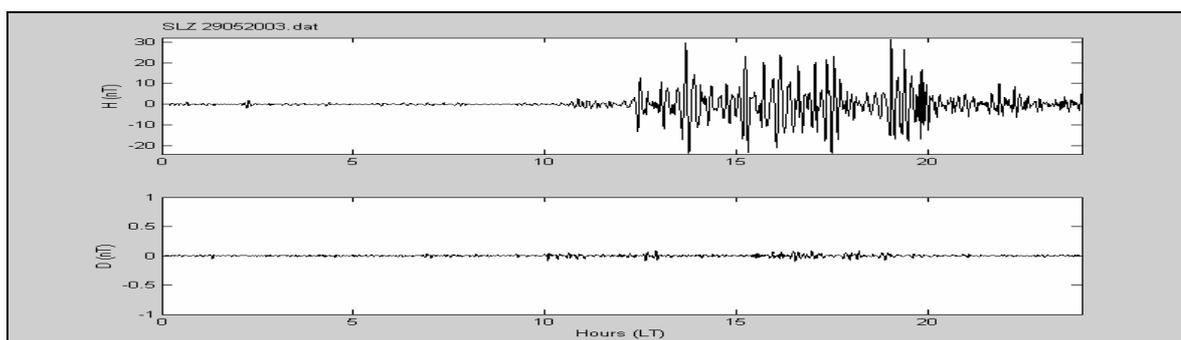


Figura 5.8: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 30/05/2003.

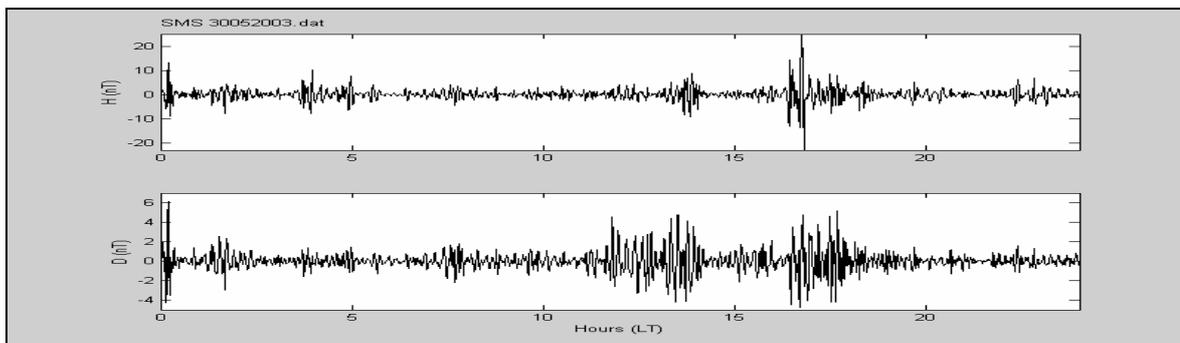


Figura 5.9: Dados filtrados de SMS.

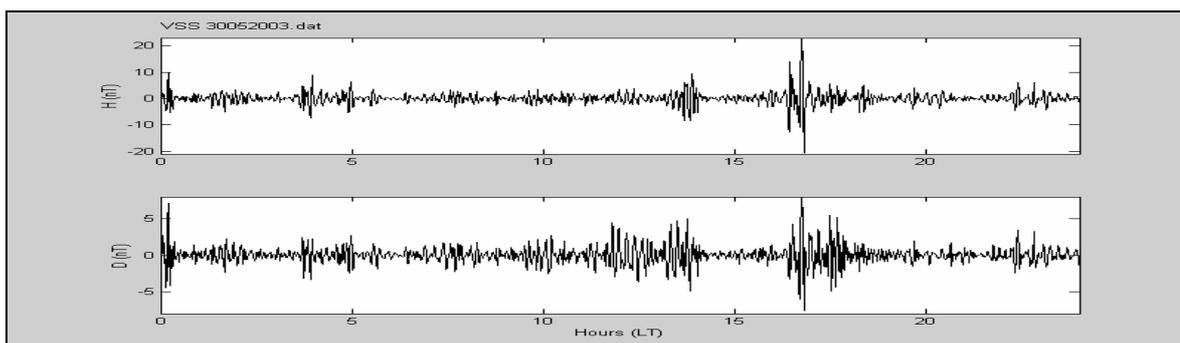


Figura 5.10: Dados filtrados de VSS.

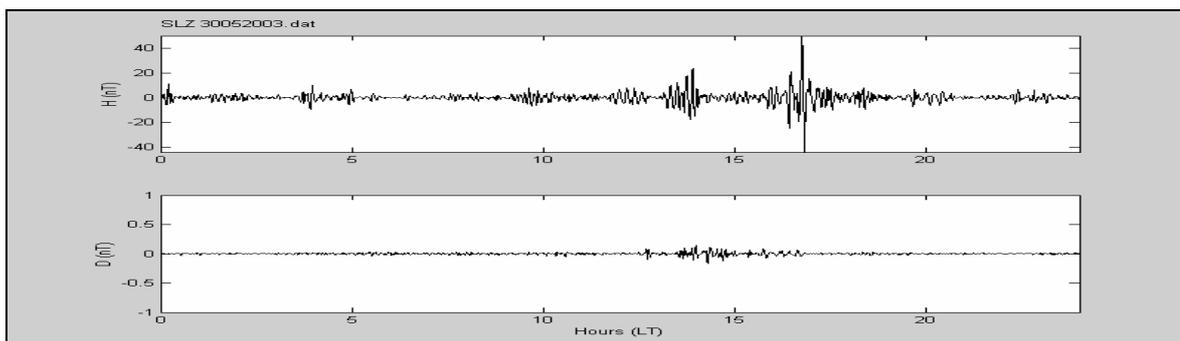


Figura 5.11: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 31/05/2003.

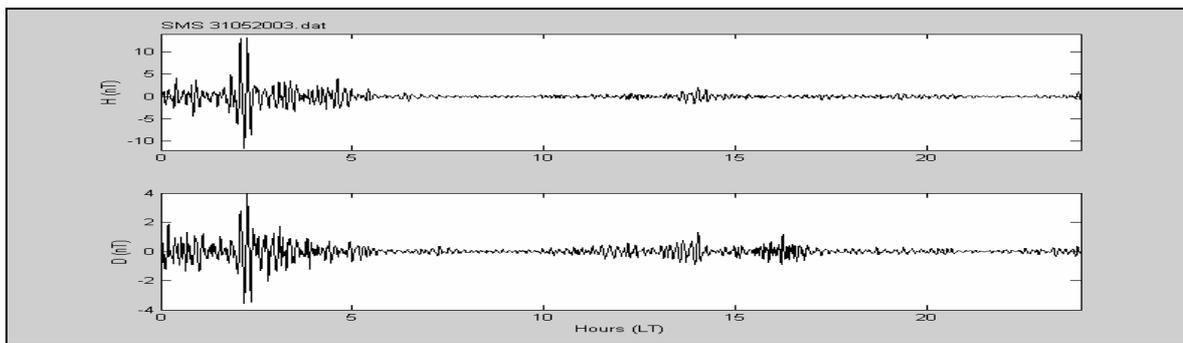


Figura 5.12: Dados filtrados de SMS.

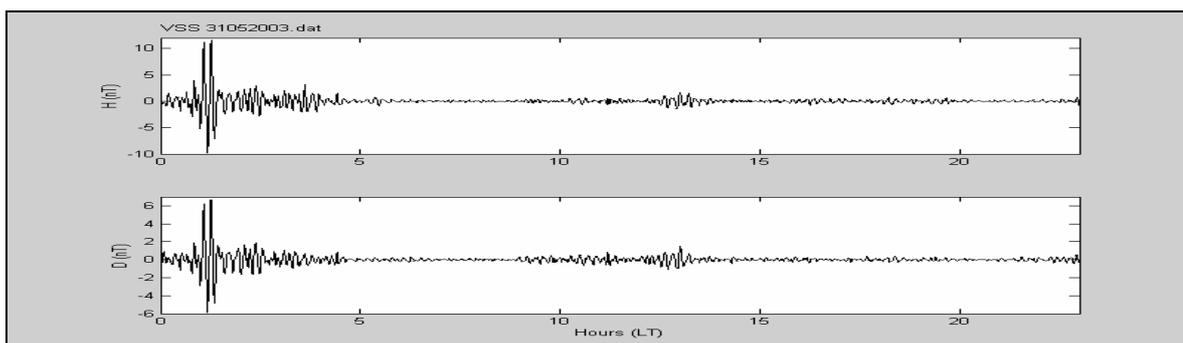


Figura 5.13: Dados filtrados de VSS.

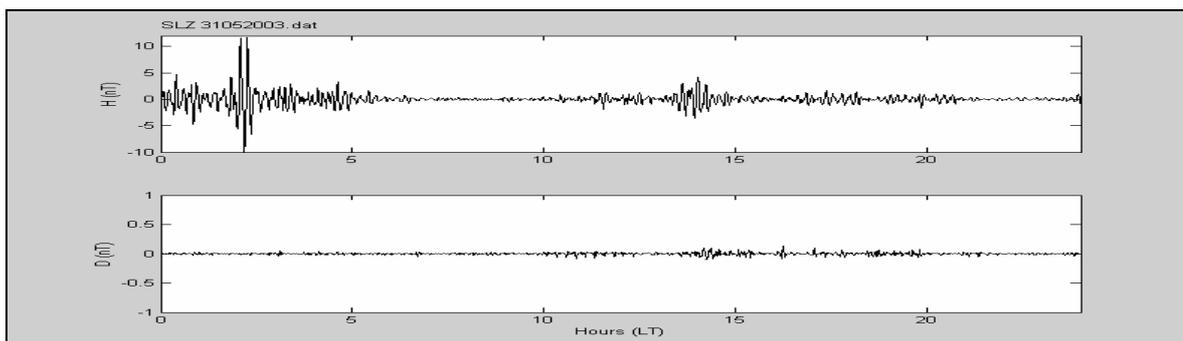


Figura 5.14: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 11:00 UT e 24:00 UT no dia 29/05/2003 para SMS, VSS e SLZ.

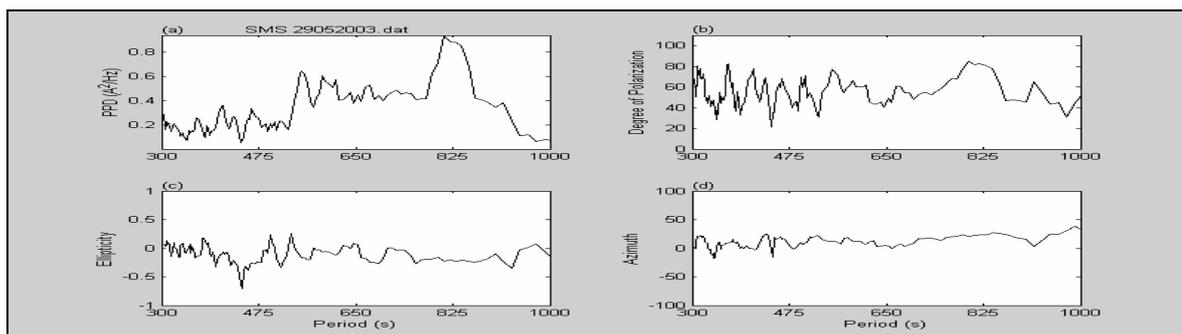


Figura 5.15: Parâmetros de polarização para SMS.

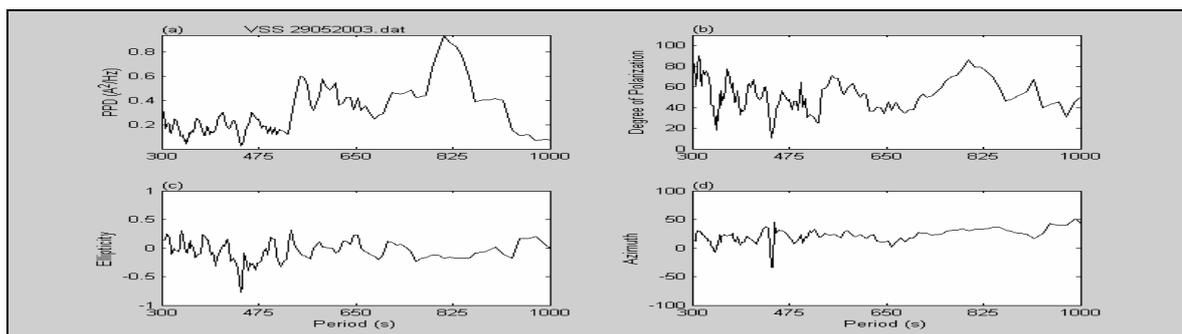


Figura 5.16: Parâmetros de polarização VSS.

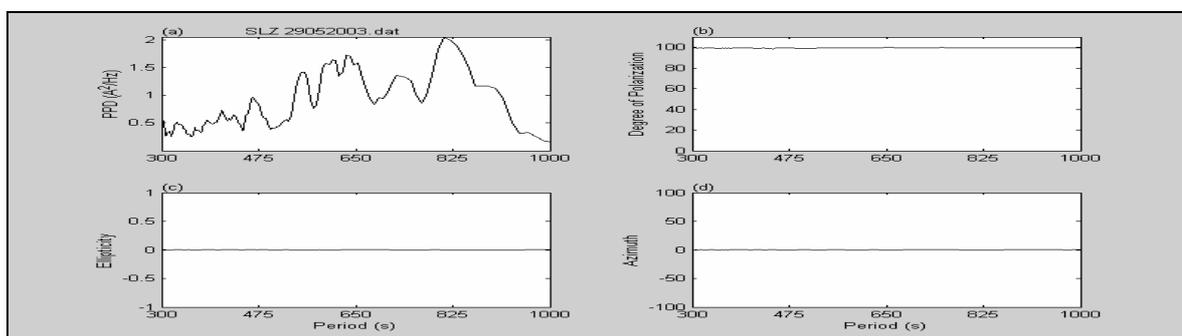


Figura 5.17: Parâmetros de polarização para SLZ.

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 11:00 UT e 24:00 UT no dia 30/05/2003 para SMS, VSS e SLZ.

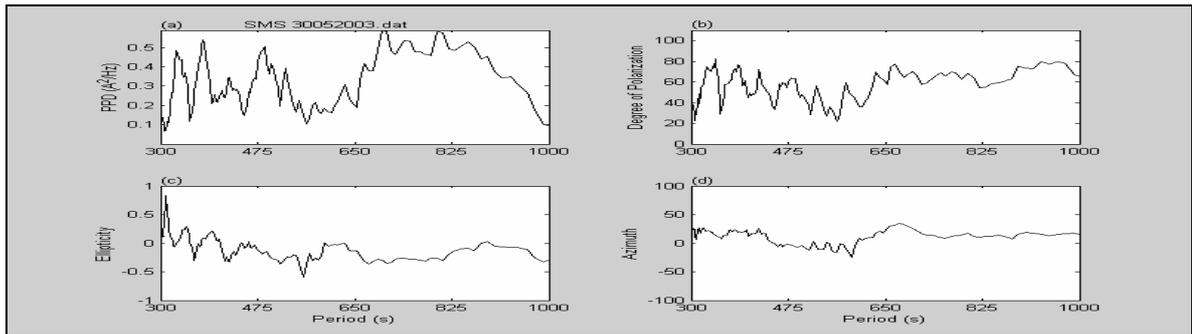


Figura 5.18: Parâmetros de polarização para SMS.

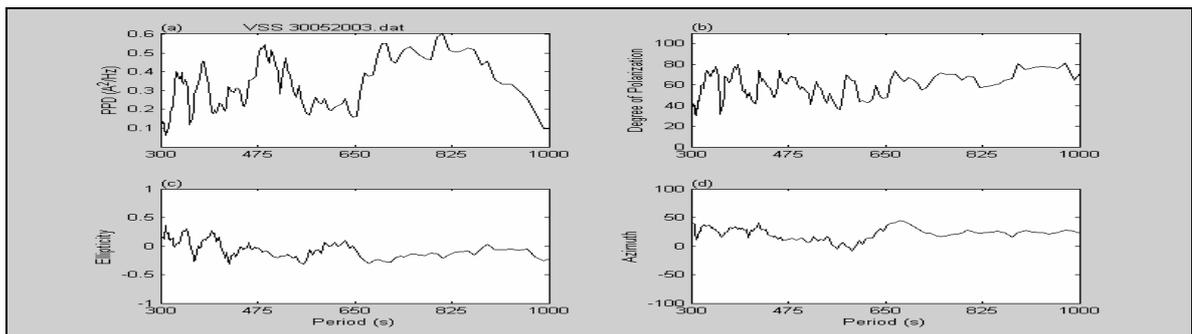


Figura 5.19: Parâmetros de polarização para VSS.

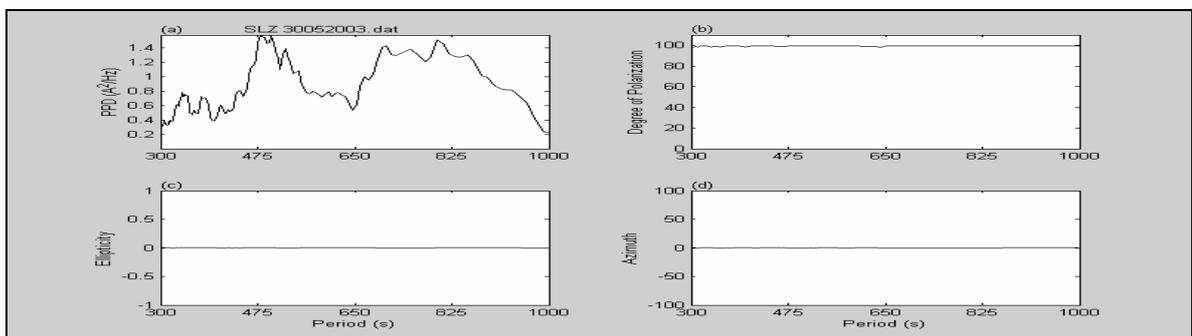


Figura 5.20: Parâmetros de polarização para SLZ.

## 5.2 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 17 E 20 DE AGOSTO DE 2003.

A Figura 5.21 mostra uma queda no índice Dst nos dias 17 e 18/08/2003, que aliada às variações nos parâmetros do plasma solar, velocidade (V), pressão dinâmica (Dyn Press), campo elétrico interplanetário (E) e componente Z do campo magnético interplanetário (Bz), indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética intensa.

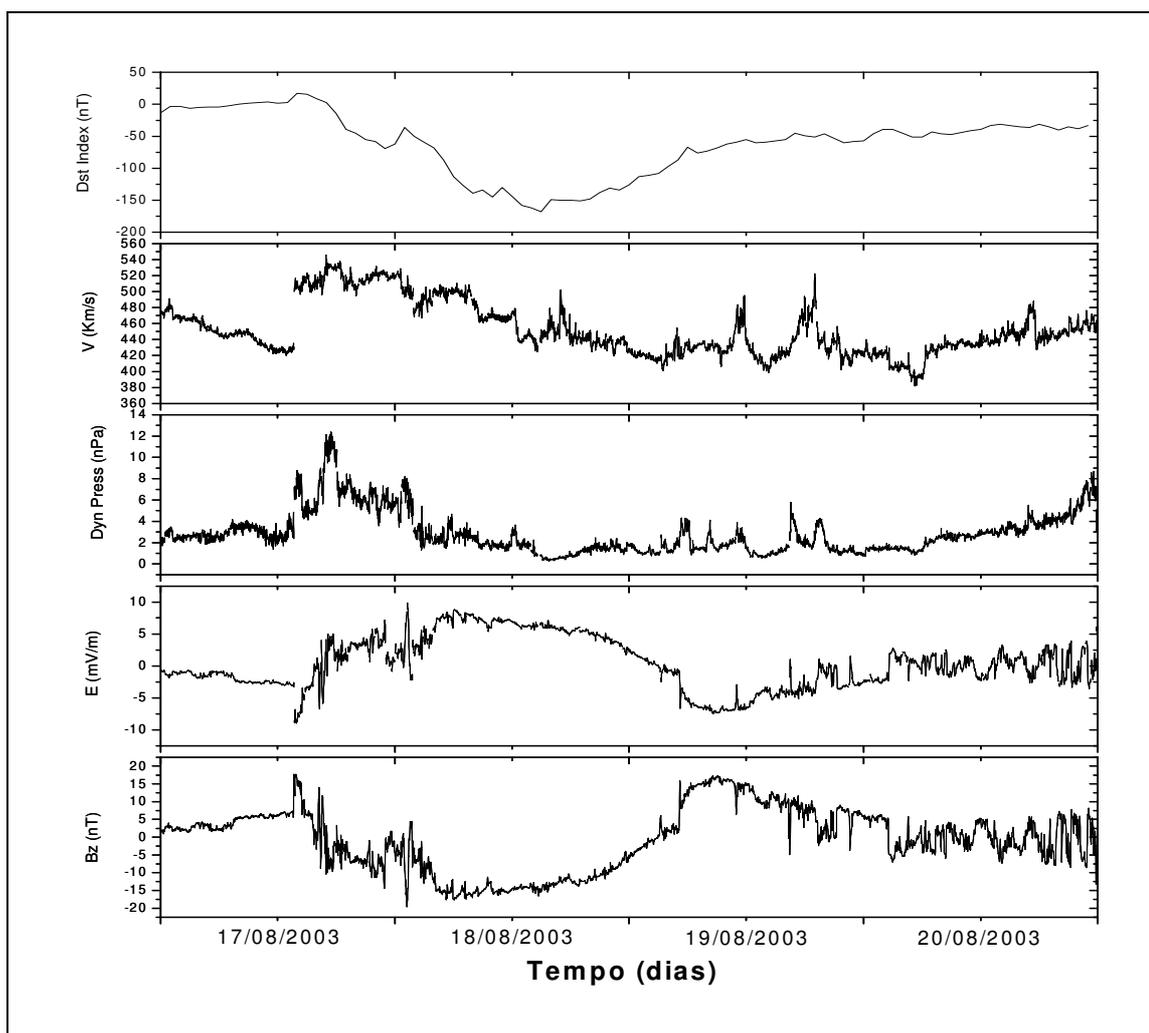


Figura 5.21: Índice Dst e parâmetros do plasma solar para o período entre 17 e 20/08/2003.

A Figura 5.22 mostra as variações geomagnéticas detectadas nas estações geomagnéticas do Observatório Espacial do Sul (SMS) e do Observatório Geomagnético de Vassouras (VSS), para as componentes H e D do campo geomagnético.

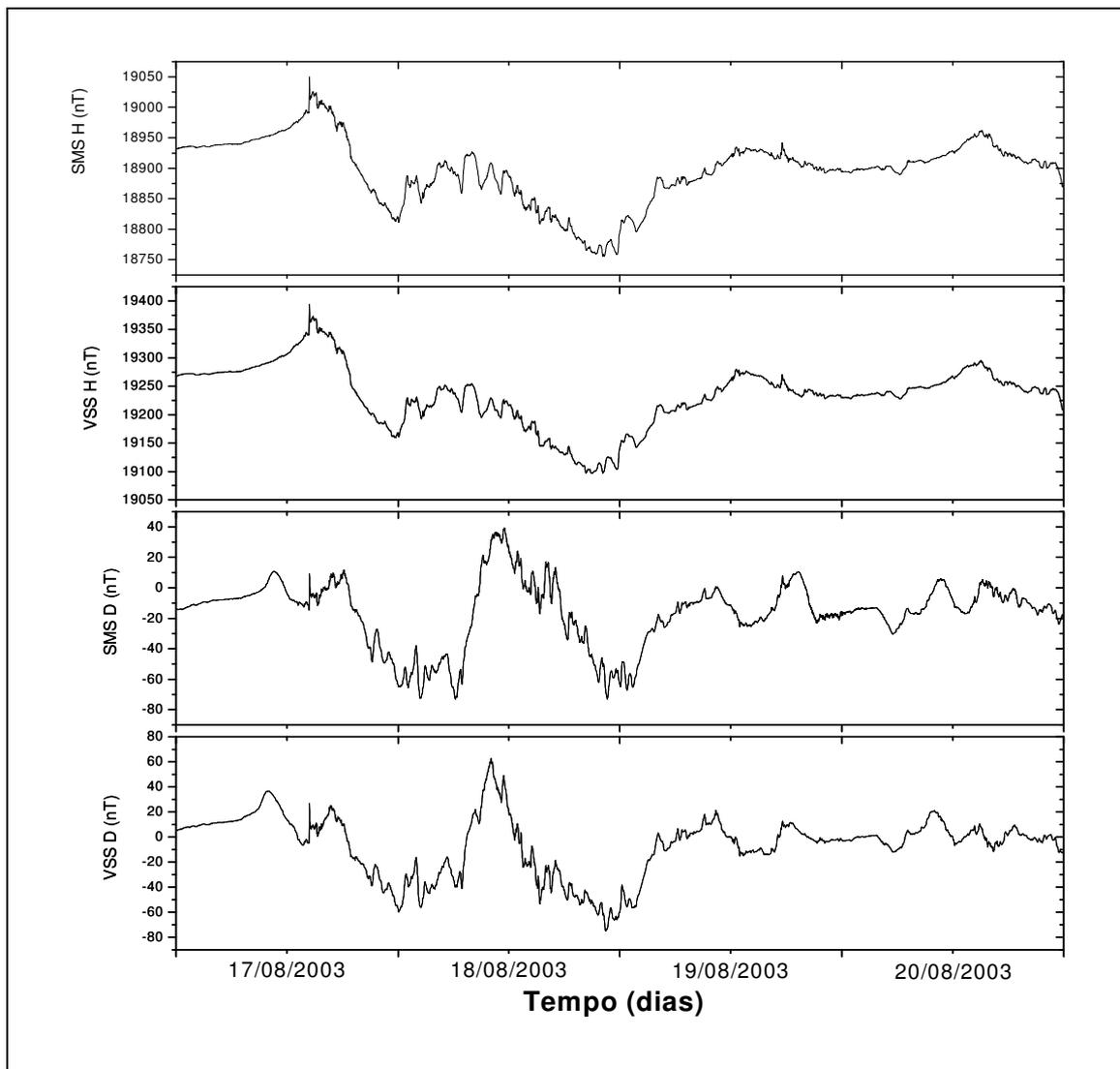


Figura 5.22: Variações geomagnéticas detectadas em SMS e VSS.

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS e VSS para o dia 17/08/2003.

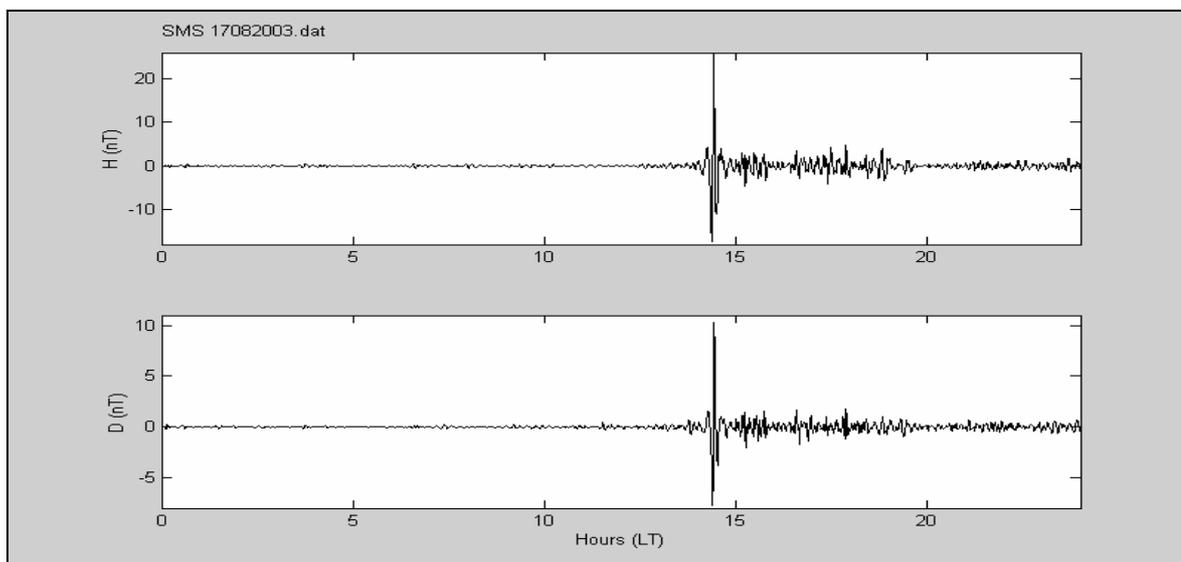


Figura 5.23: Dados filtrados de SMS.

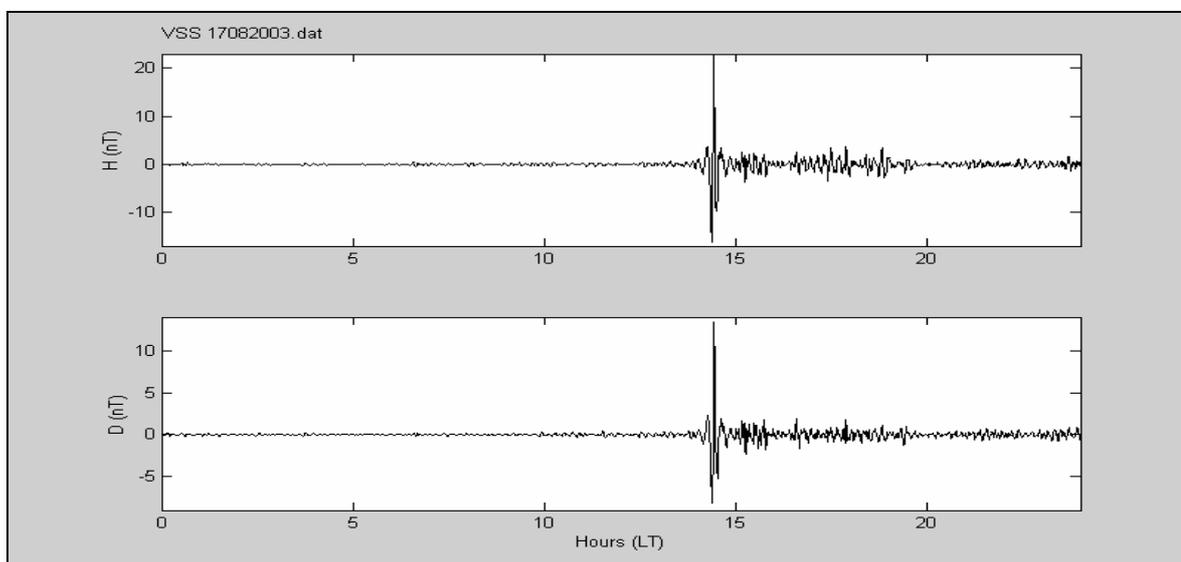


Figura 5.24: Dados filtrados de VSS.

As Figuras 5.25 e 5.26 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS e VSS para o dia 18/08/2003.

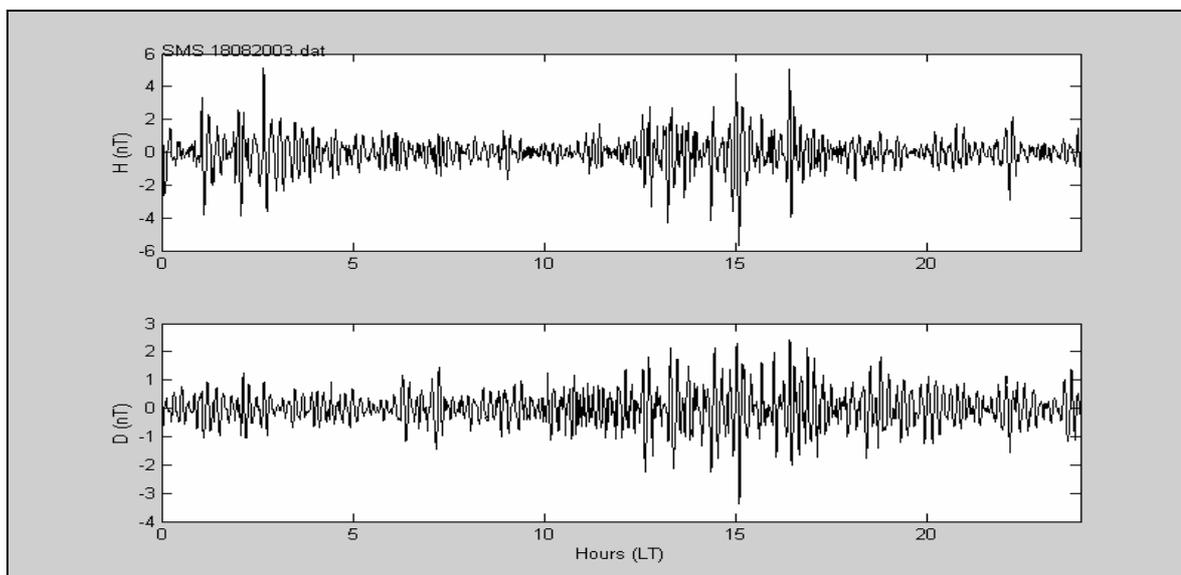


Figura 5.25: Dados filtrados de SMS.

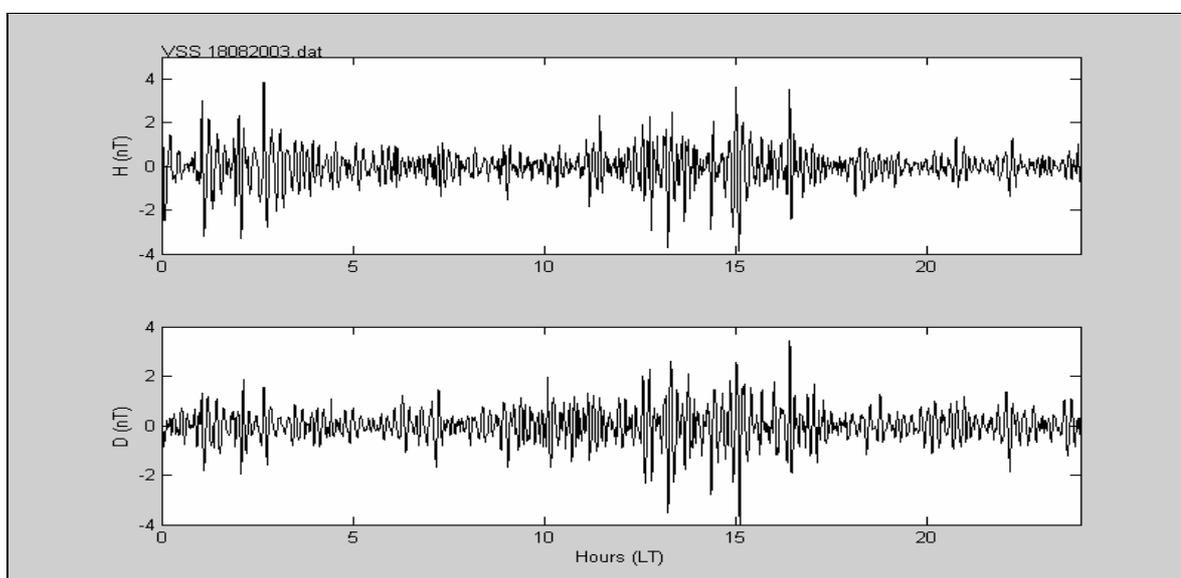


Figura 5.26: Dados filtrados de VSS.

As Figuras 5.27 e 5.28 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS e VSS para o dia 19/08/2003.

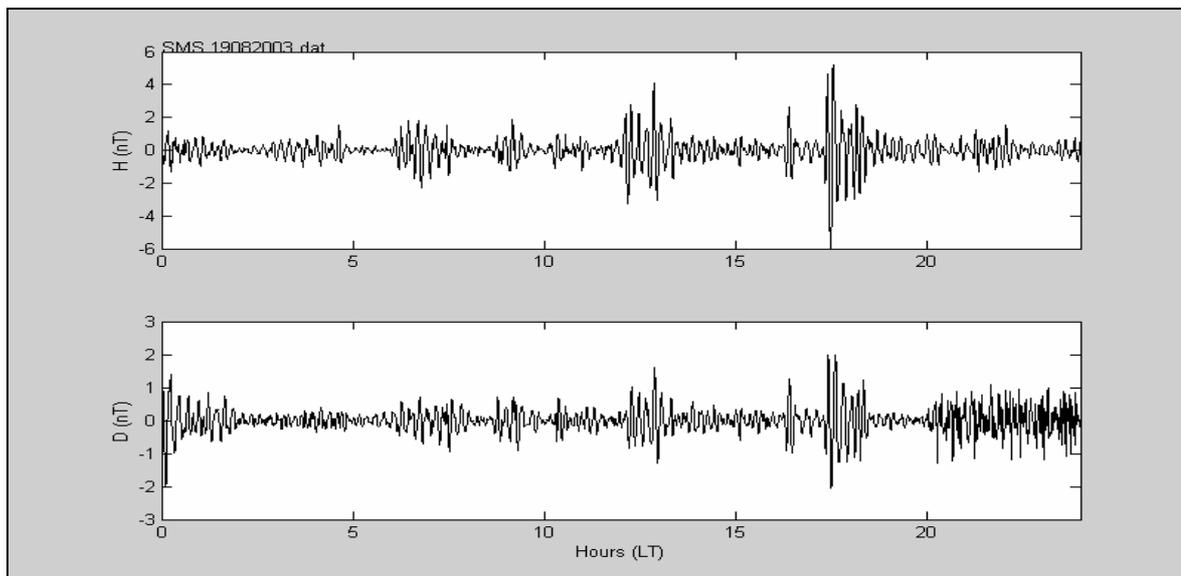


Figura 5.27: Dados filtrados de SMS.

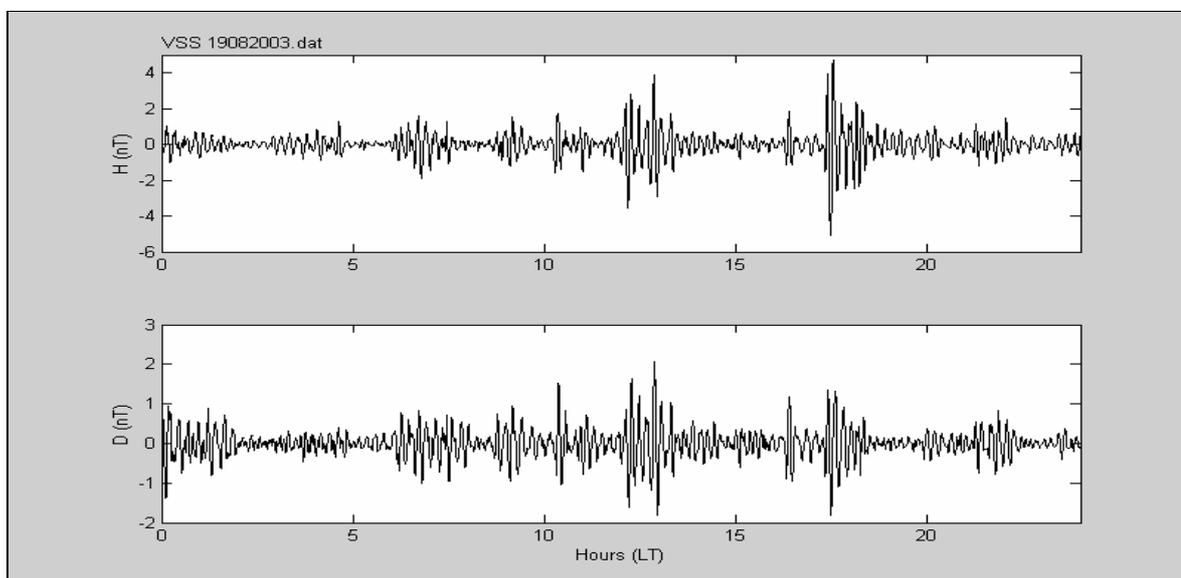


Figura 5.28: Dados filtrados de VSS.

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS e VSS para o dia 20/08/2003.

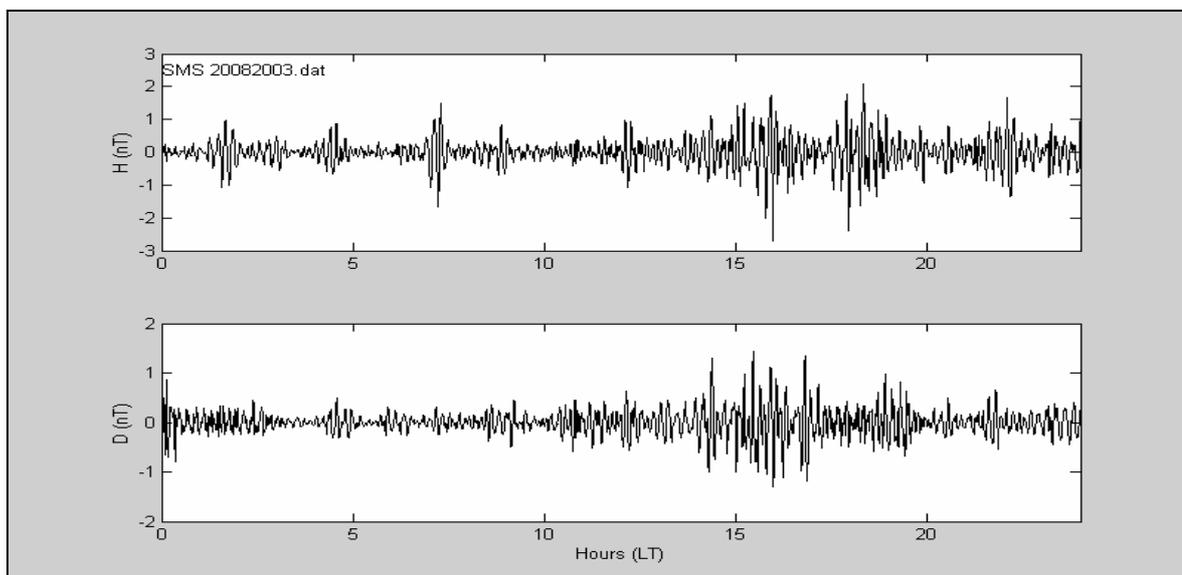


Figura 5.29: Dados filtrados de SMS.

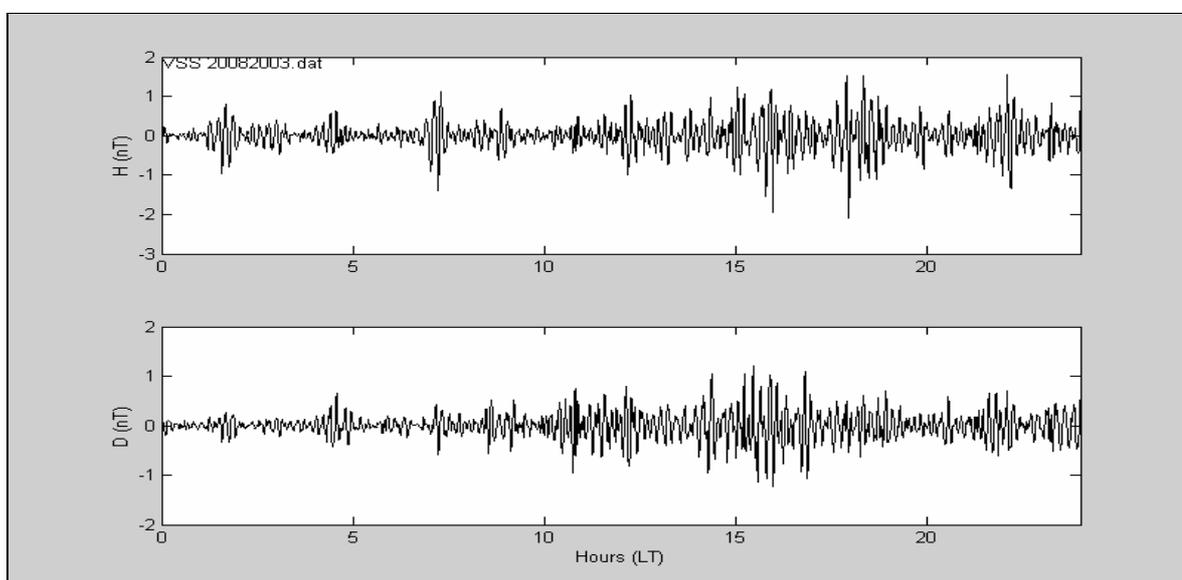


Figura 5.30: Dados filtrados de VSS.

As Figuras 5.31 e 5.32 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 13:00 UT e 24:00 UT no dia 17/08/2003 para SMS e VSS.

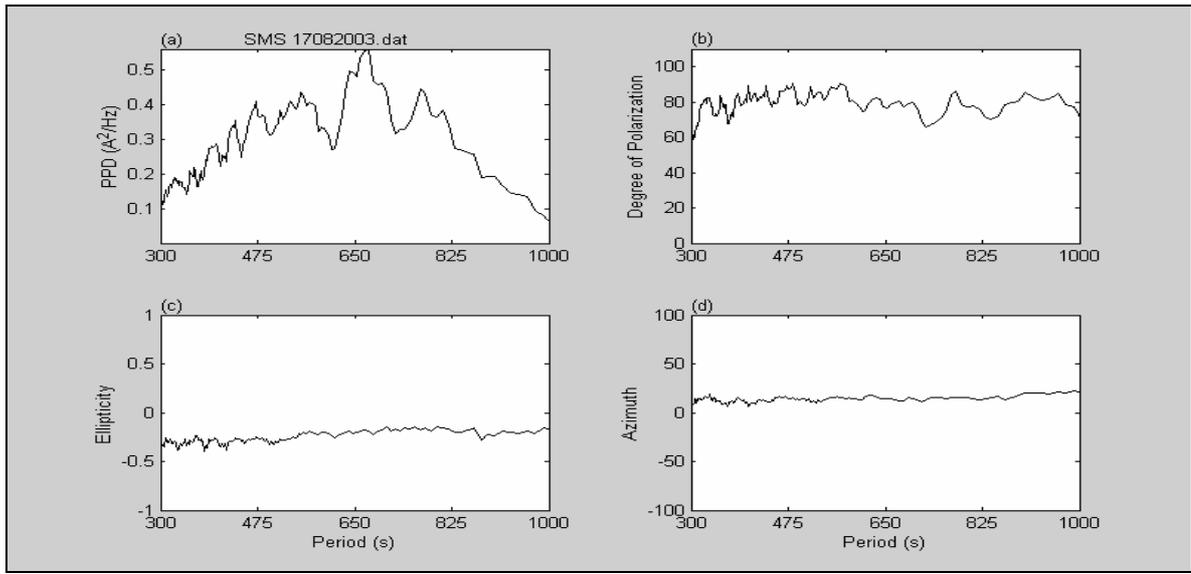


Figura 5.31: Parâmetros de polarização para SMS.

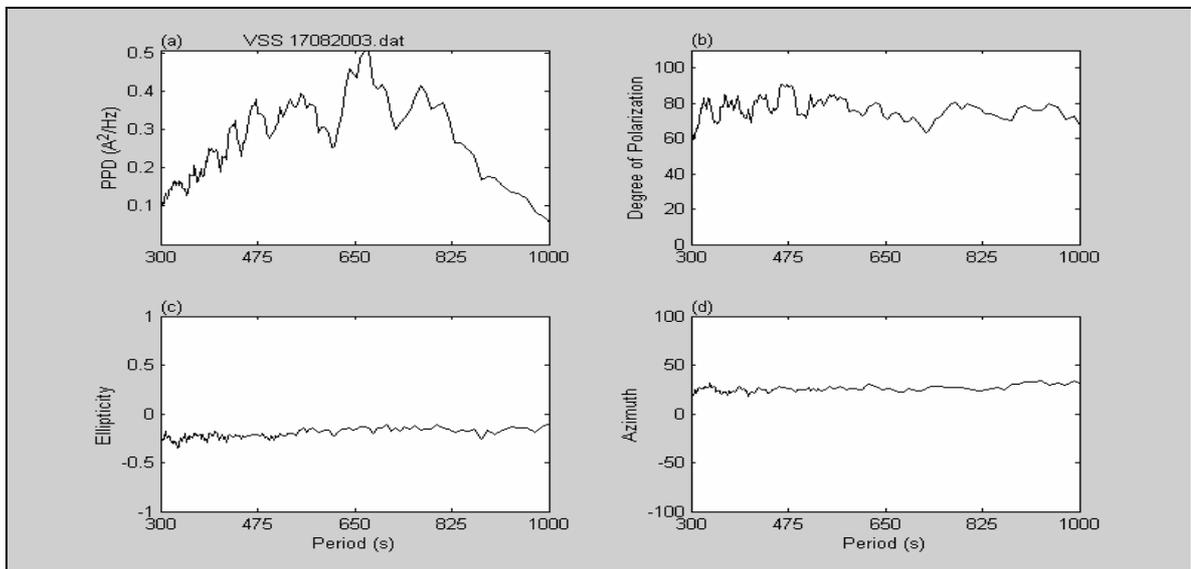


Figura 5.32: Parâmetros de polarização para VSS.

As Figuras 5.33 e 5.34 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 00:00 UT e 08:00 UT no dia 18/08/2003 para SMS e VSS.

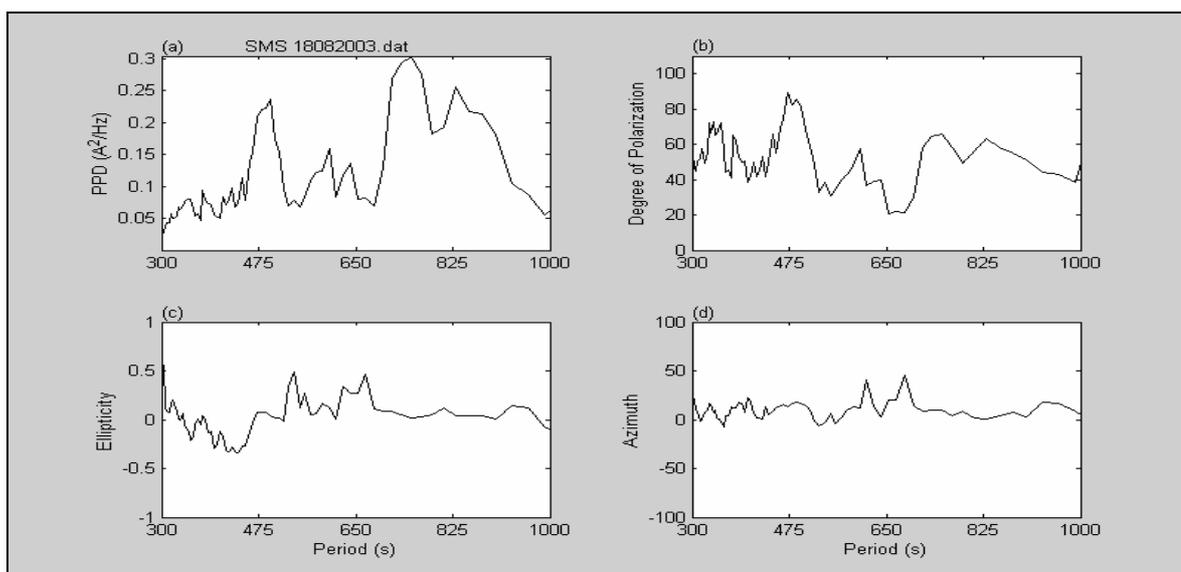


Figura 5.33: Parâmetros de polarização para SMS.

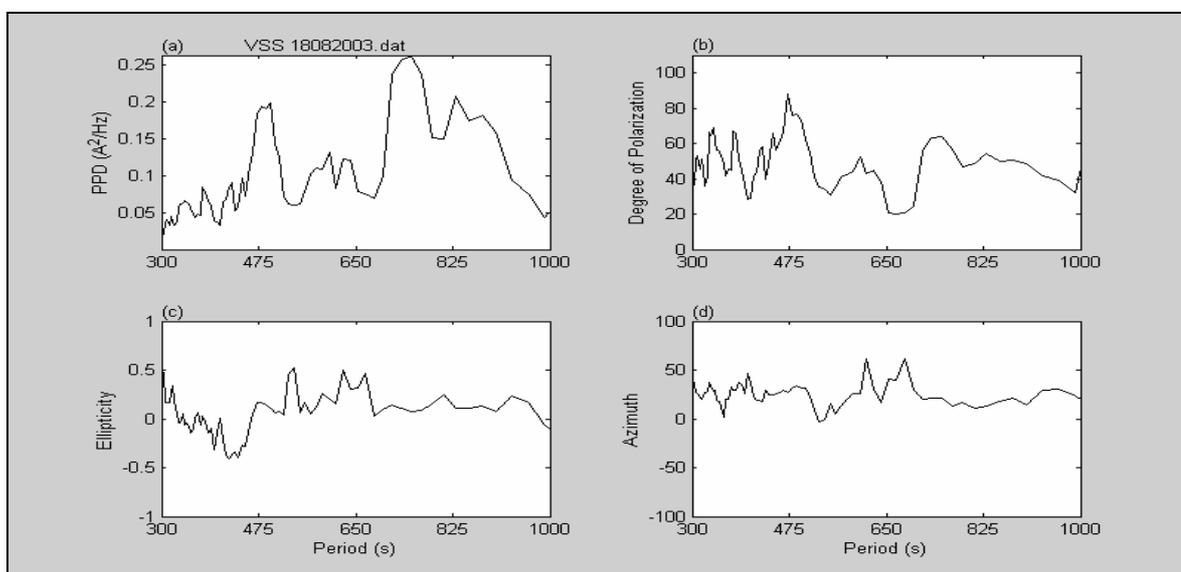


Figura 5.34: Parâmetros de polarização para VSS.

As Figuras 5.35 e 5.36 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 11:00 UT e 18:30 UT no dia 18/08/2003 para SMS e VSS.

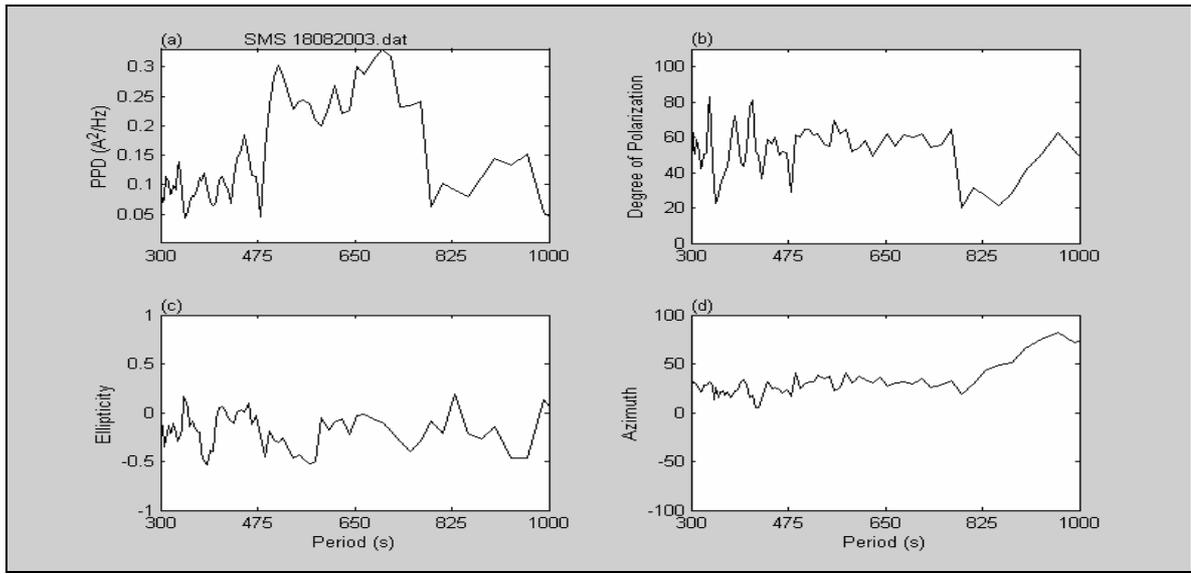


Figura 5.35: Parâmetros de polarização para SMS.

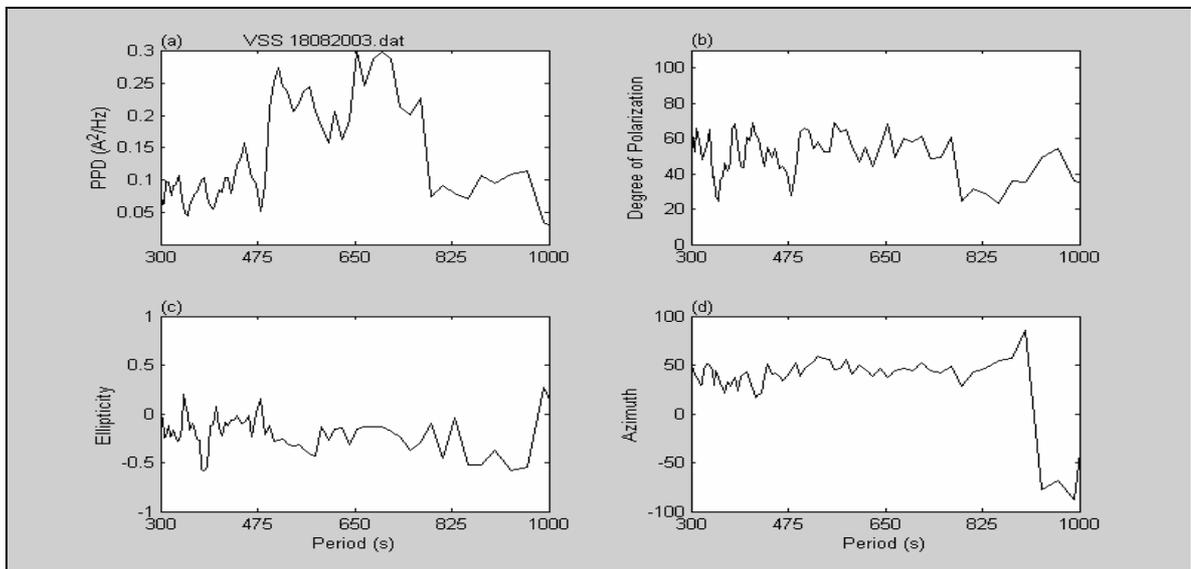


Figura 5.36 Parâmetros de polarização para VSS.

### 5.3 - ANÁLISE DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS OCORRIDAS ENTRE 27 E 31 DE OUTUBRO DE 2003.

A Figura 5.37 mostra uma queda no índice Dst no dia 29/10/2003, e outra no dia 30/10/2003, que aliadas às variações nos parâmetros do plasma solar, velocidade (V), pressão dinâmica (Dyn Press), campo elétrico interplanetário (E) e componente Z do campo magnético interplanetário (Bz), indicam a ocorrência de duas tempestades geomagnéticas intensas.

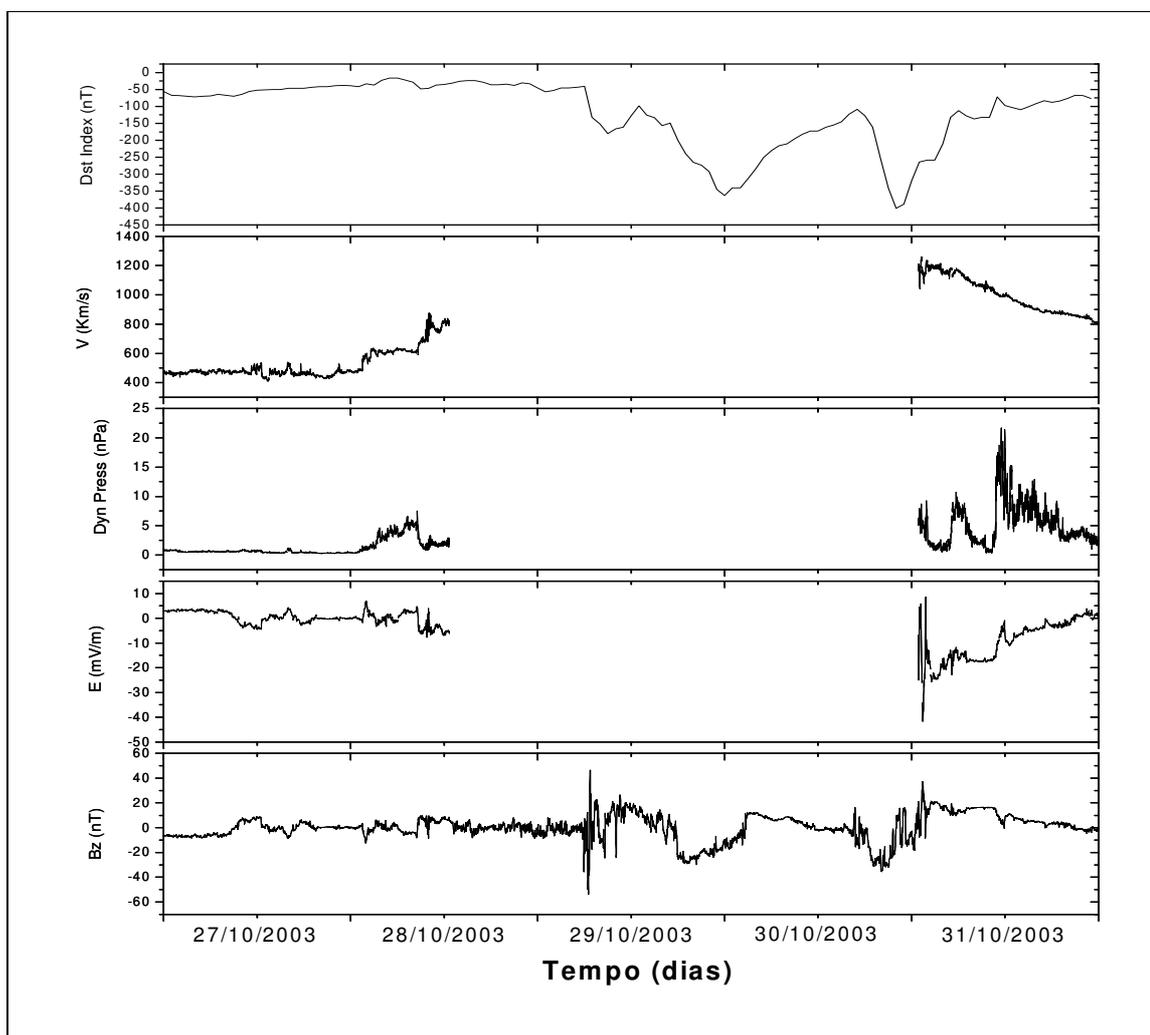


Figura 5.37: Índice Dst e parâmetros do plasma solar para o período entre 27 e 31/10/2003.

A Figura 5.38 mostra as variações geomagnéticas detectadas nas estações geomagnéticas do Observatório Espacial do Sul (SMS), do Observatório Geomagnético de Vassouras (VSS) e do Observatório Espacial de São Luís (SLZ) para as componentes H e D do campo geomagnético.

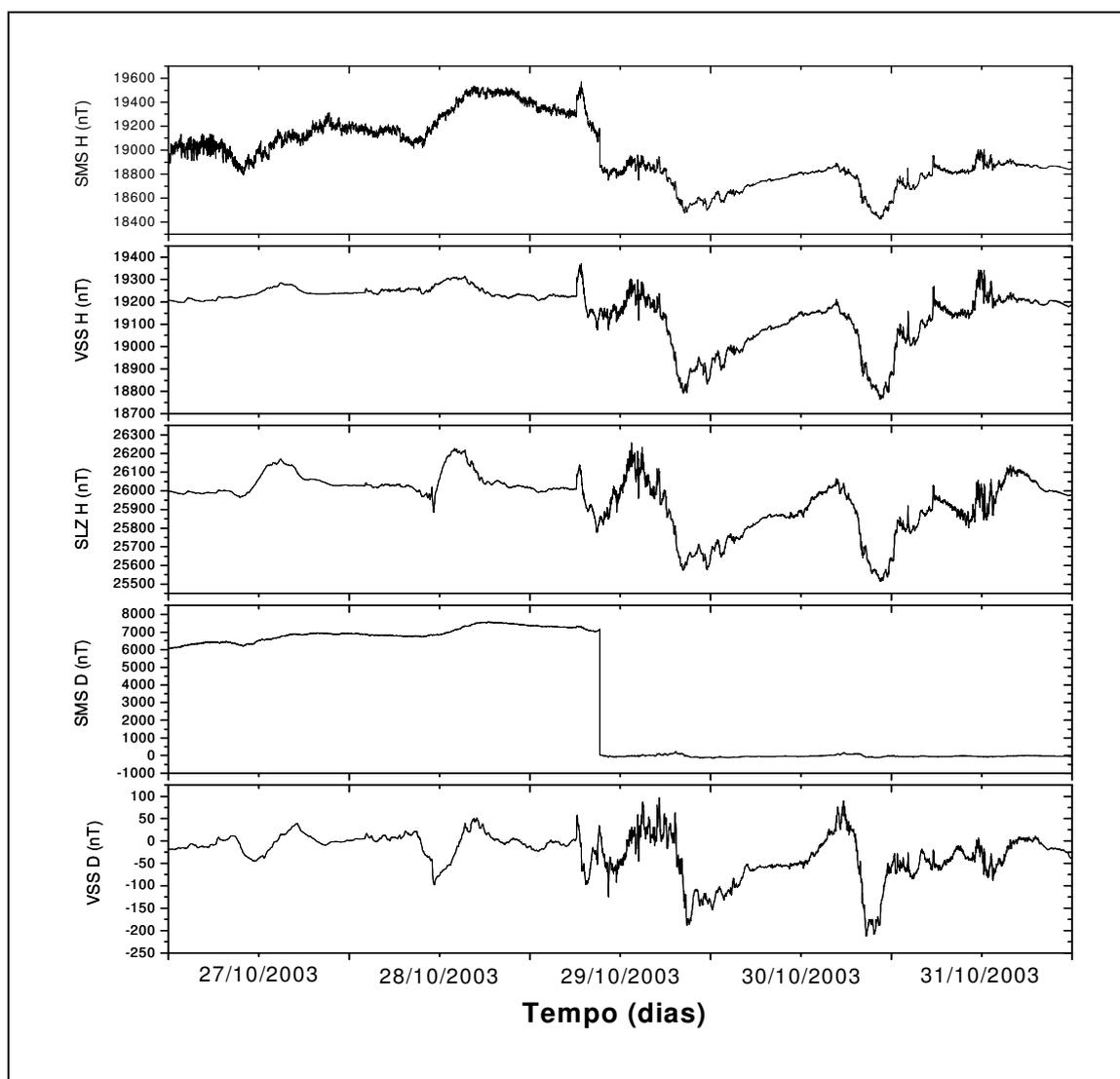


Figura 5.38: Variações geomagnéticas detectadas em SMS, VSS e SLZ.

As Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 27/10/2003.

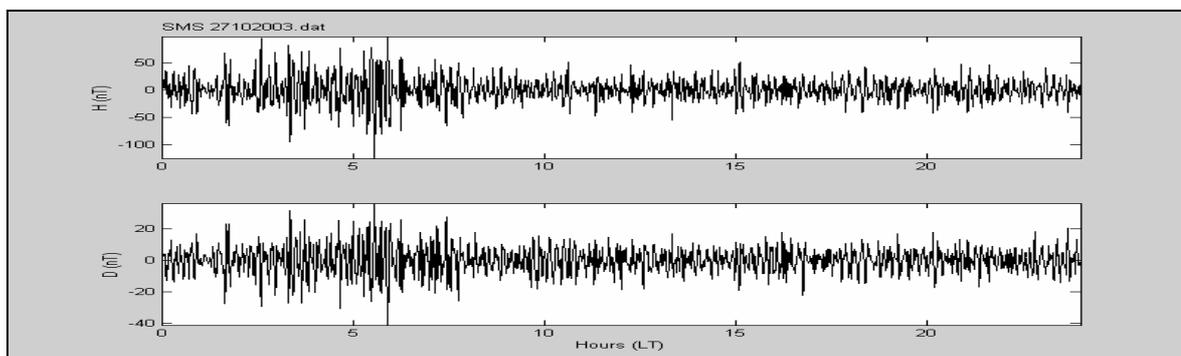


Figura 5.39: Dados filtrados de SMS.

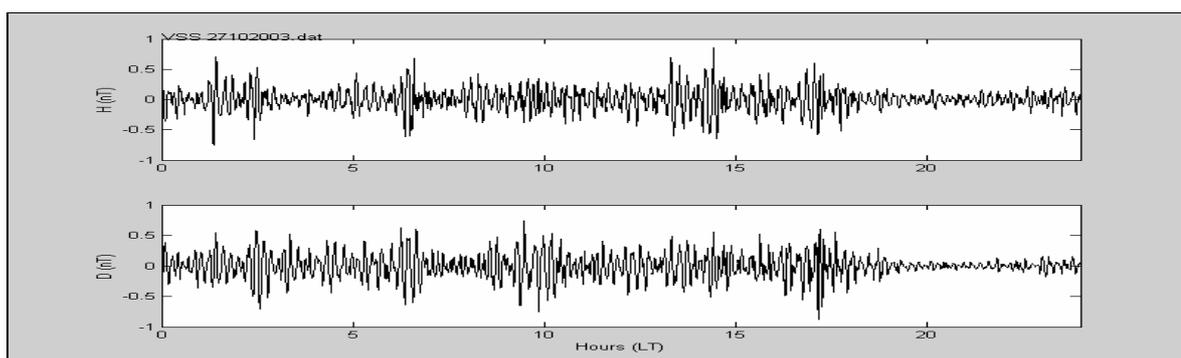


Figura 5.40: Dados filtrados de VSS.

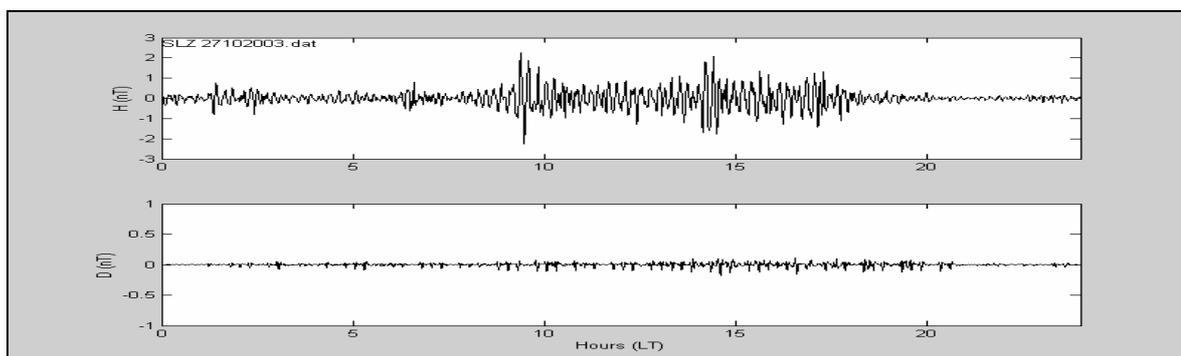


Figura 5.41: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.42, 5.43 e 5.44 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 28/10/2003.

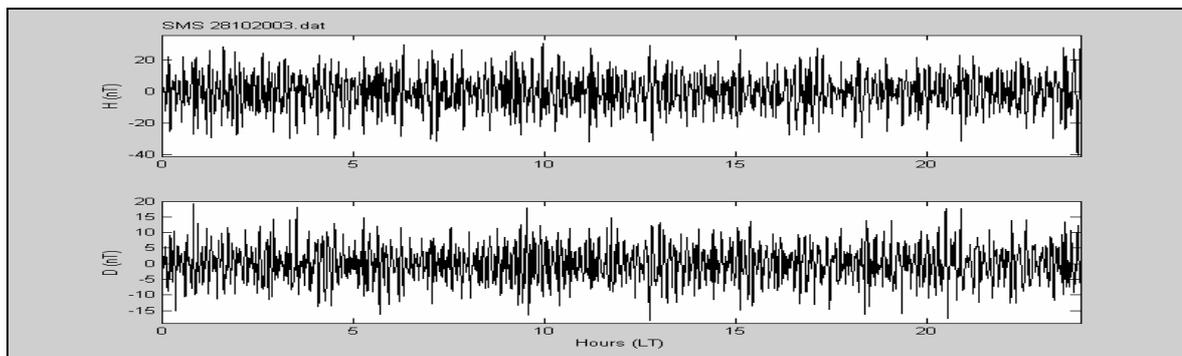


Figura 5.42: Dados filtrados de SMS.

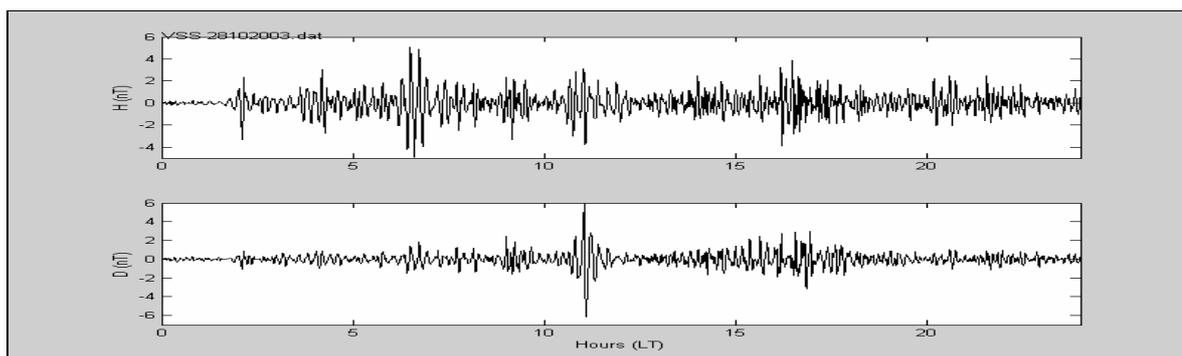


Figura 5.43: Dados filtrados de VSS.

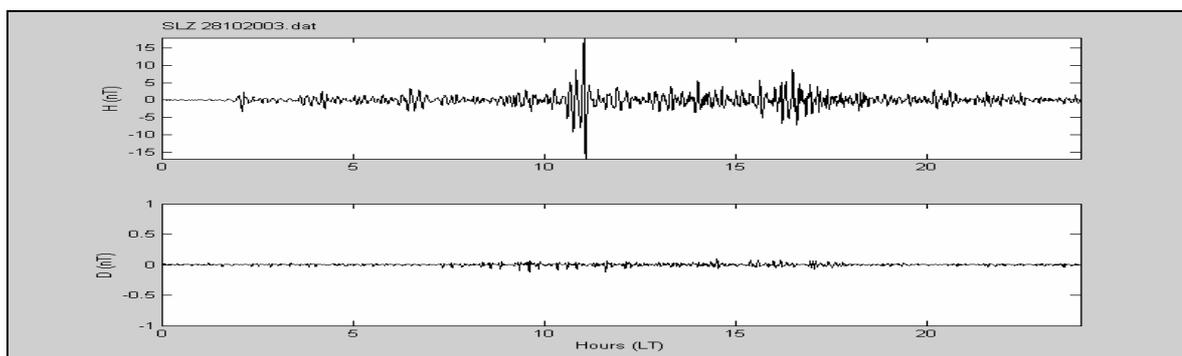


Figura 5.44: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.45, 5.46 e 5.47 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 29/10/2003.

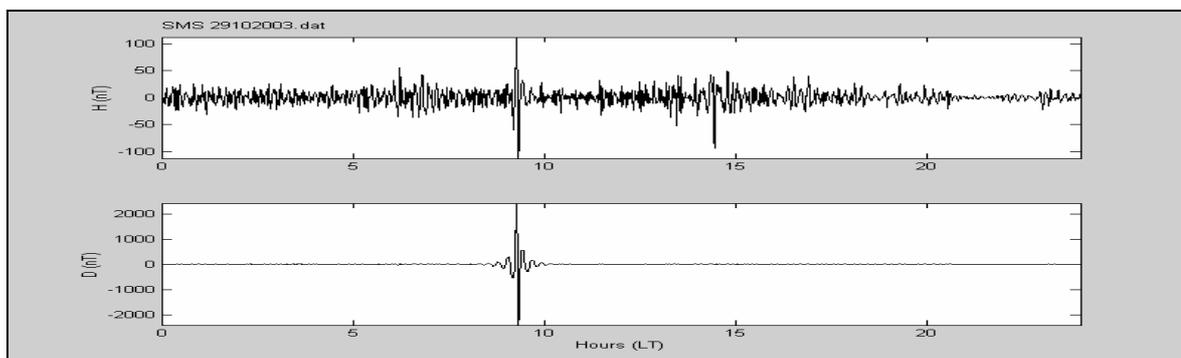


Figura 5.45: Dados filtrados de SMS.

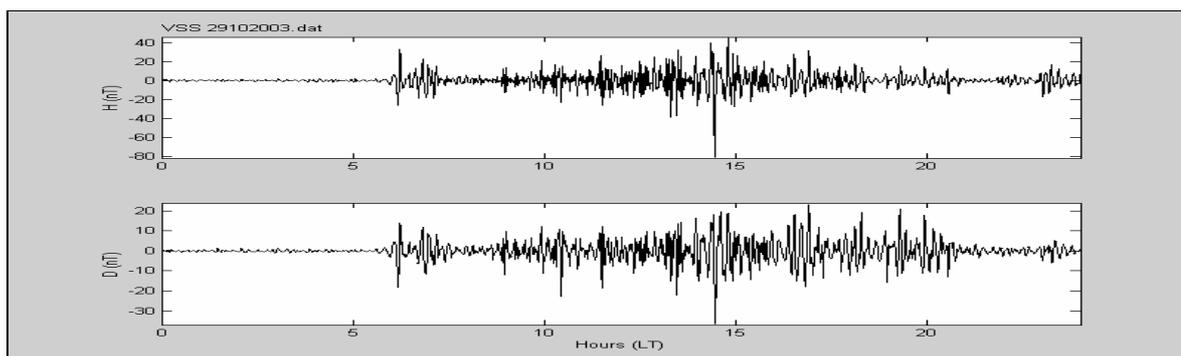


Figura 5.46: Dados filtrados de VSS.

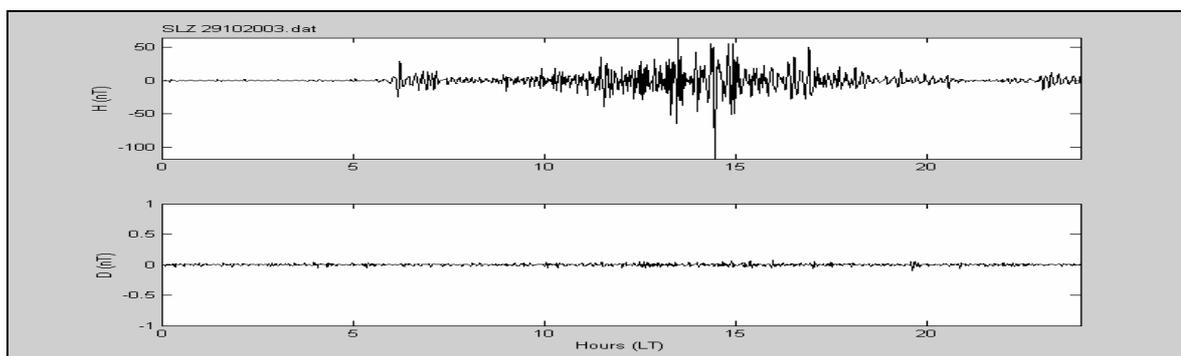


Figura 5.47: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.48, 5.49 e 5.50 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 30/10/2003.

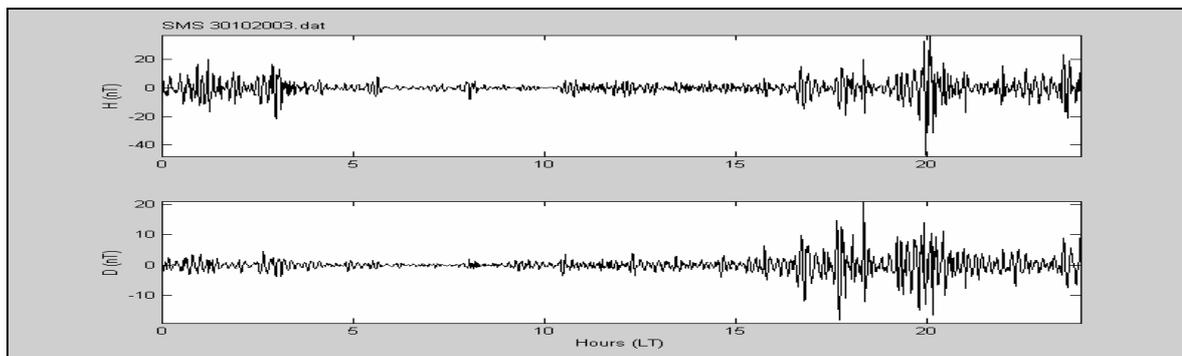


Figura 5.48: Dados filtrados de SMS.

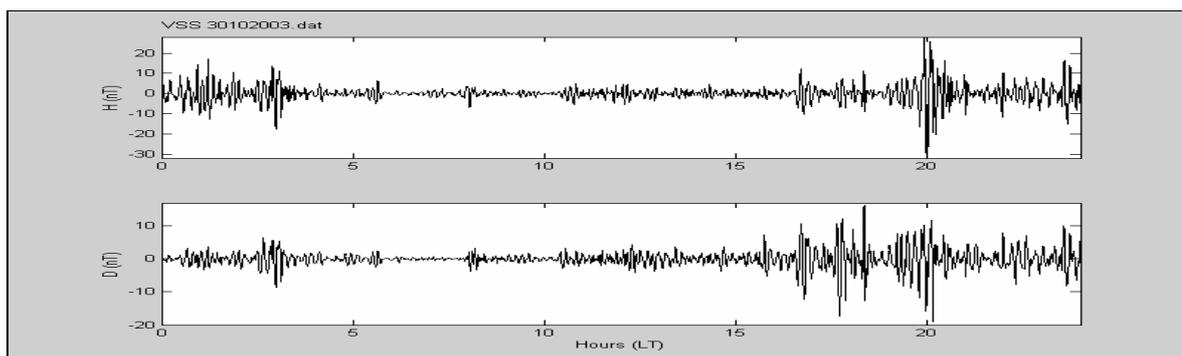


Figura 5.49: Dados filtrados de VSS.

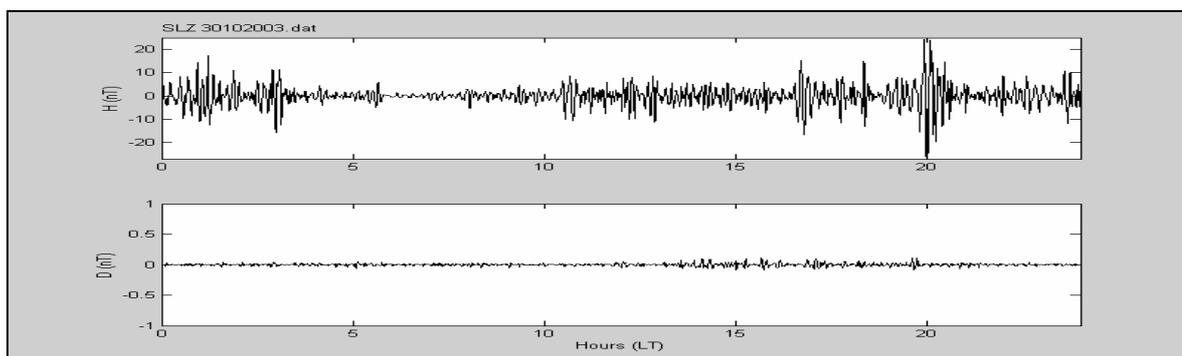


Figura 5.50: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.51, 5.52 e 5.53 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 31/10/2003.

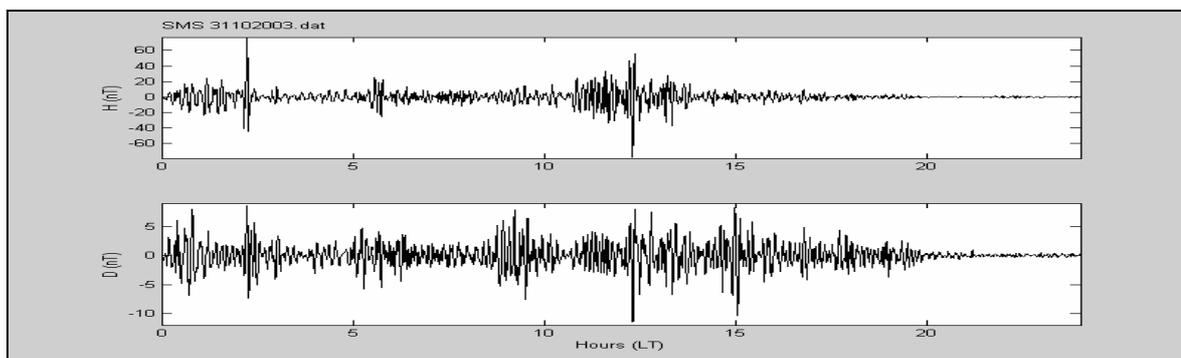


Figura 5.51: Dados filtrados de SMS.

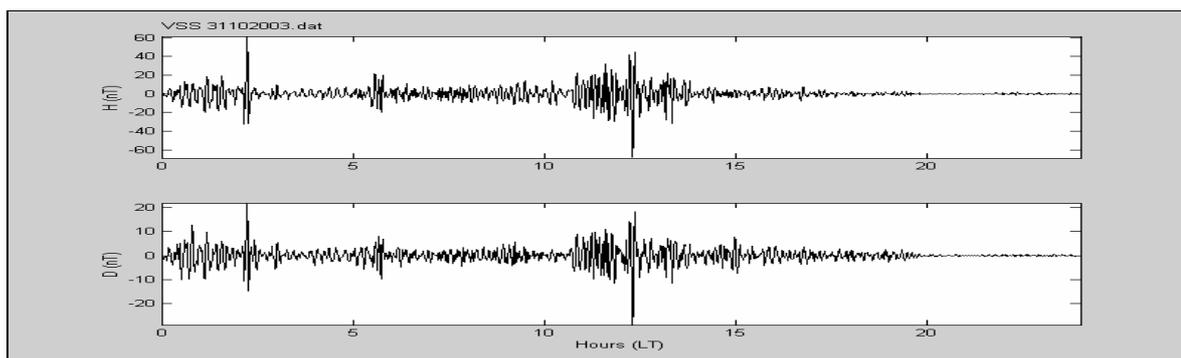


Figura 5.52: Dados filtrados de VSS.

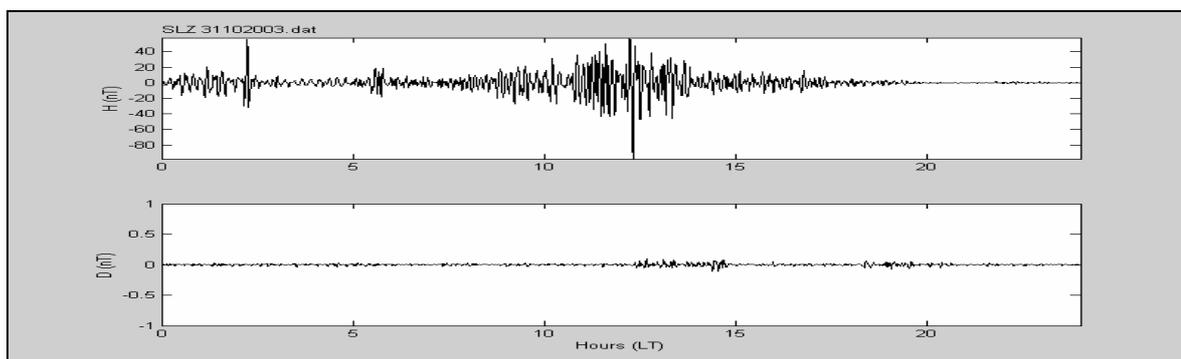


Figura 5.53: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.54, 5.55 e 5.56 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 06:00 UT e 21:00 UT no dia 29/10/2003 para SMS, VSS e SLZ.

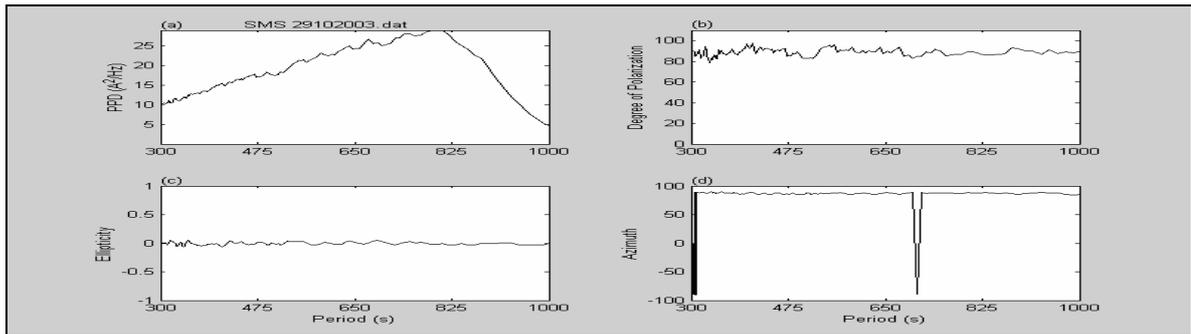


Figura 5.54: Parâmetros de polarização para SMS.

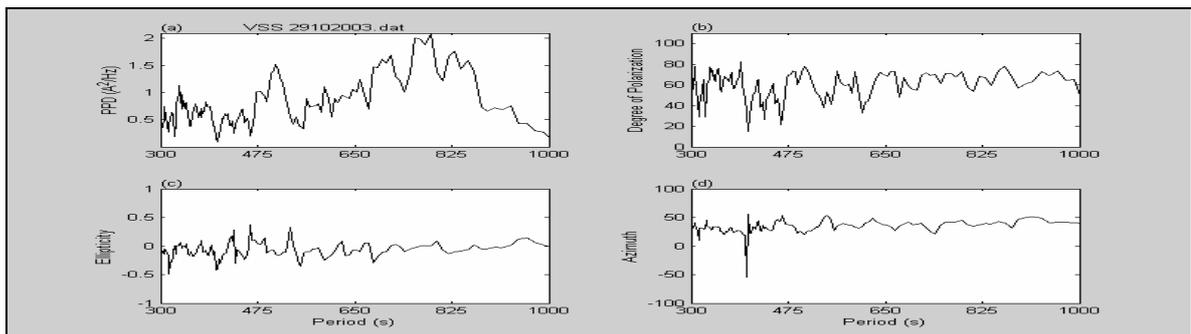


Figura 5.55: Parâmetros de polarização para VSS.

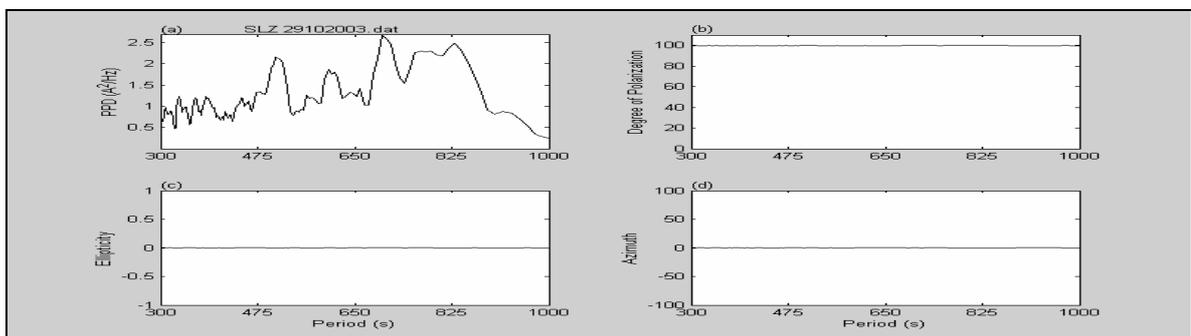


Figura 5.56: Parâmetros de polarização para SLZ.

As Figuras 5.57, 5.58 e 5.59 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 16:00 UT e 24:00 UT no dia 30/10/2003 para SMS, VSS e SLZ.

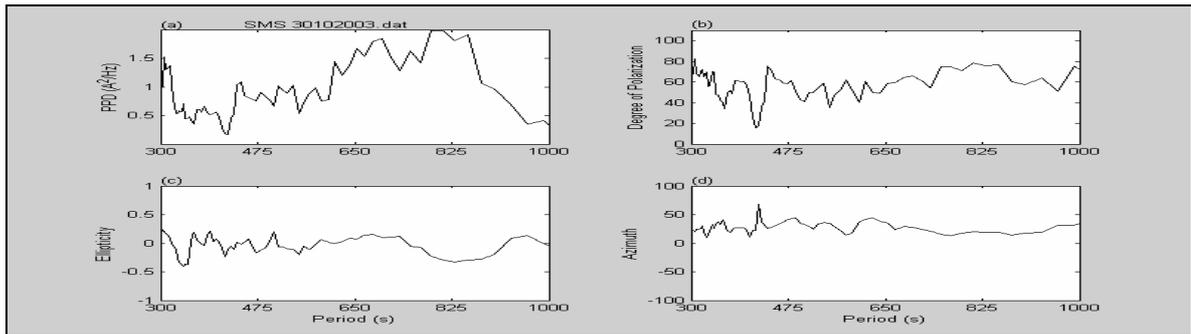


Figura 5.57: Parâmetros de polarização para SMS.

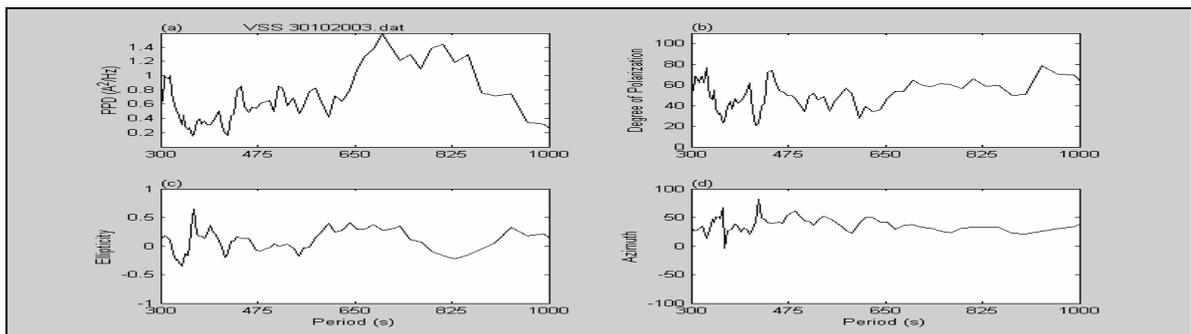


Figura 5.58: Parâmetros de polarização para VSS.

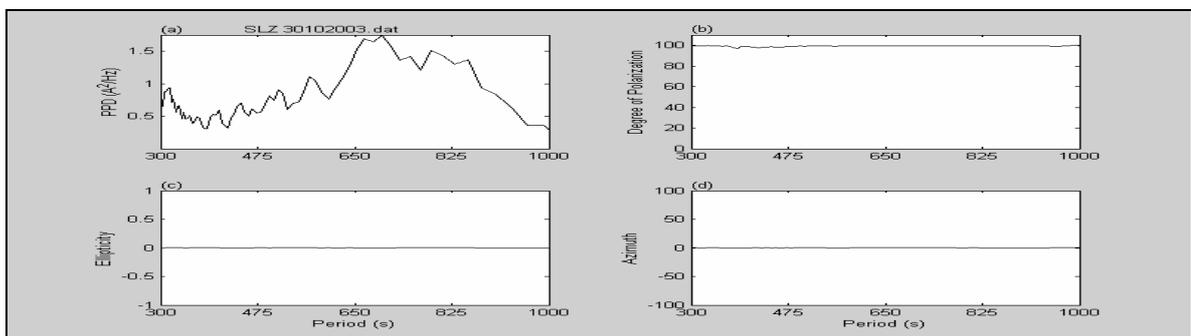


Figura 5.59: Parâmetros de polarização para SLZ.

As Figuras 5.60, 5.61 e 5.62 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 10:00 UT e 16:00 UT no dia 31/10/2003 para SMS, VSS e SLZ.

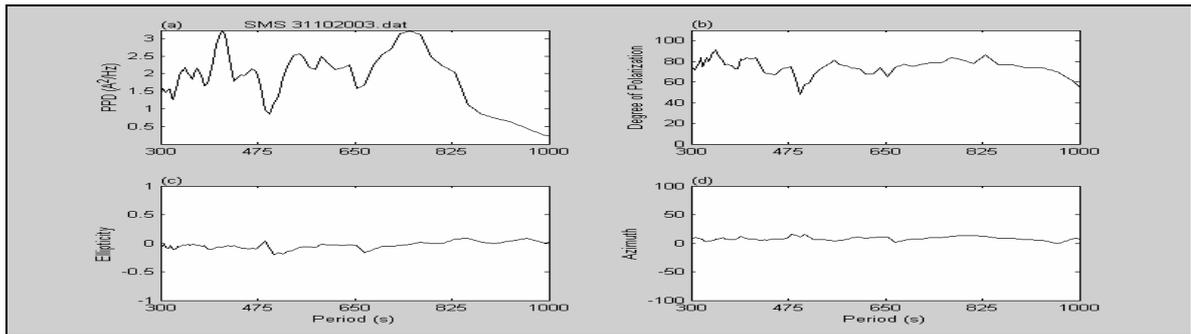


Figura 5.60: Parâmetros de polarização para SMS.

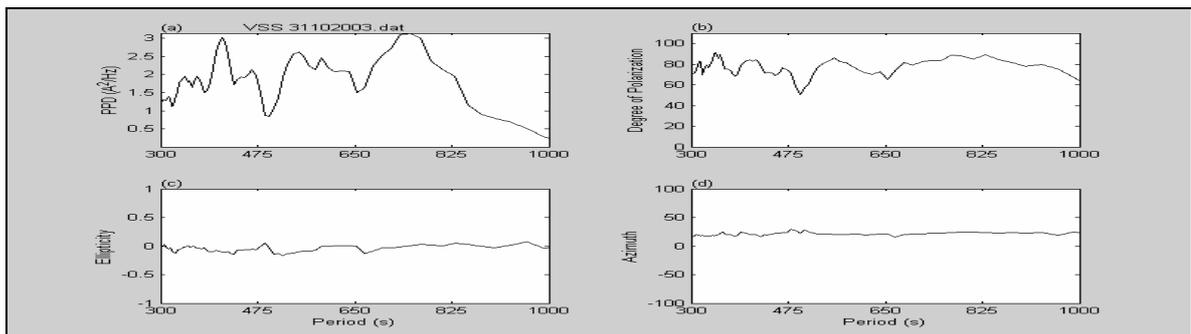


Figura 5.61: Parâmetros de polarização para VSS.

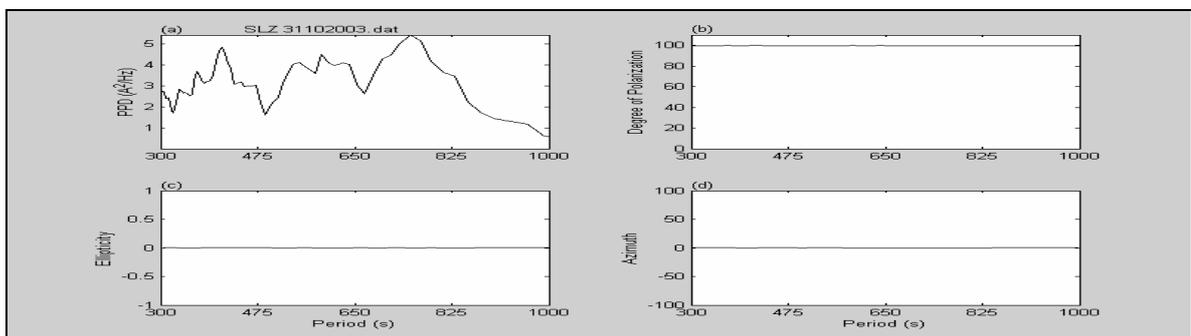


Figura 5.62: Parâmetros de polarização para SMS.

#### 5.4 - ANÁLISE DA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 3 E 5 DE NOVEMBRO DE 2003.

A Figura 5.63 mostra uma queda no índice Dst no dia 04/11/2003, que aliada às variações nos parâmetros do plasma solar, velocidade (V), pressão dinâmica (Dyn Press), campo elétrico interplanetário (E) e componente Z do campo magnético interplanetário (Bz), indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética moderada.

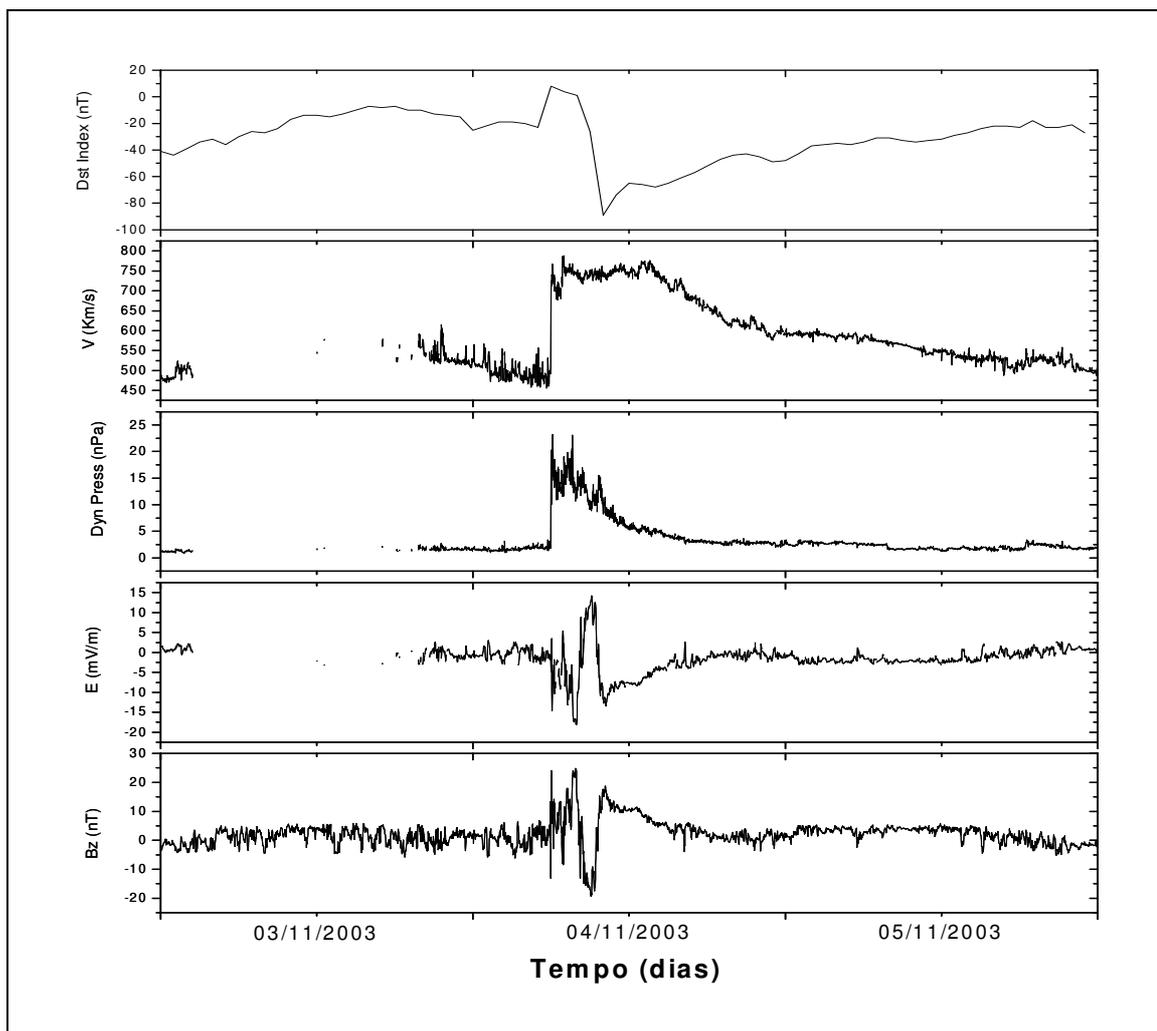


Figura 5.63: Índice Dst e parâmetros do plasma solar para o período entre 04 e 05/05/2003.

A Figura 5.64 mostra as variações geomagnéticas detectadas nas estações geomagnéticas do Observatório Espacial do Sul (SMS), do Observatório Geomagnético de Vassouras (VSS) e do Observatório Espacial de São Luís (SLZ) para as componentes H e D do campo geomagnético.

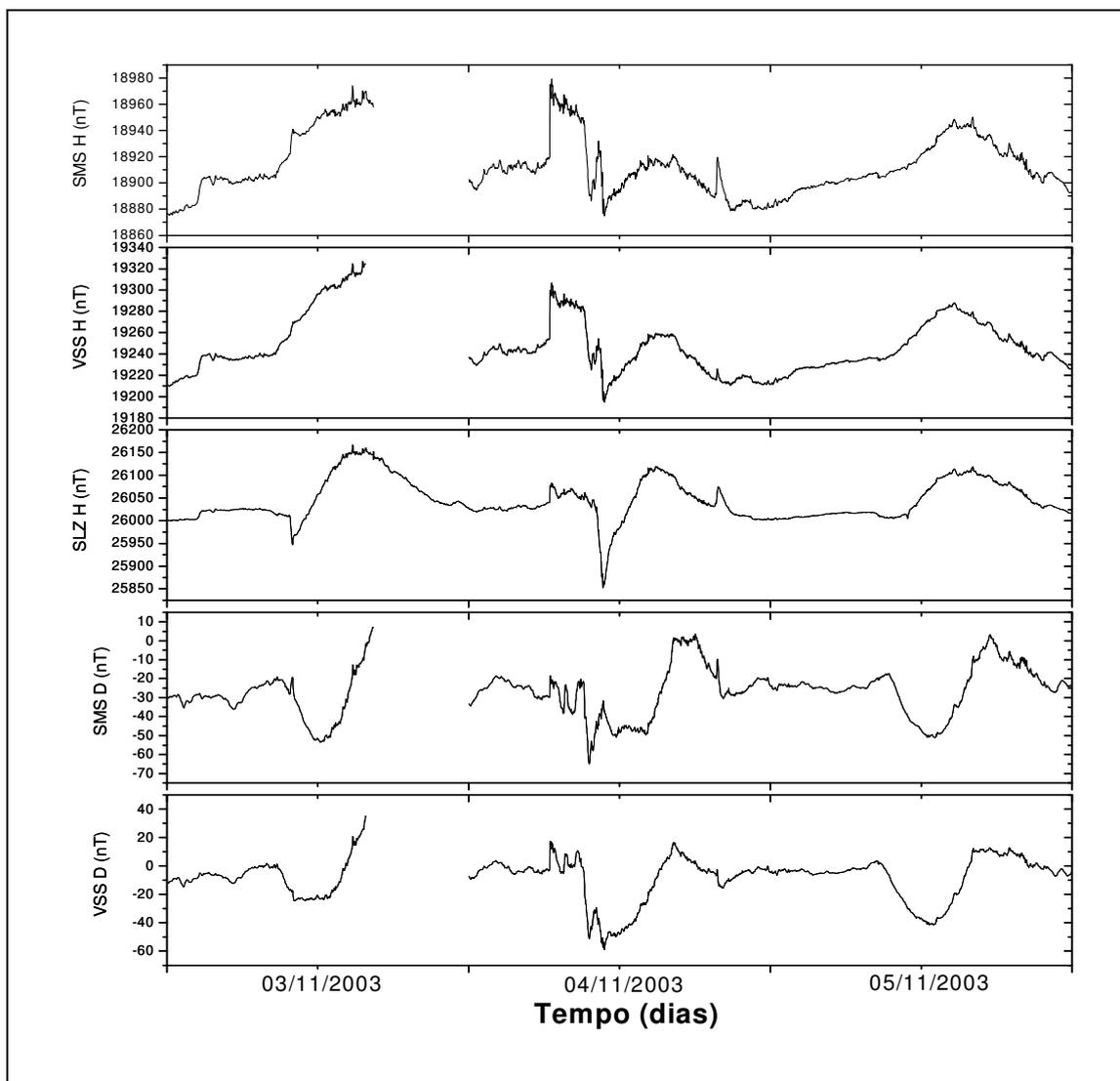


Figura 5.64: Variações geomagnéticas detectadas em SMS, VSS e SLZ.

As Figuras 5.65, 5.66 e 5.67 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 03/11/2003.

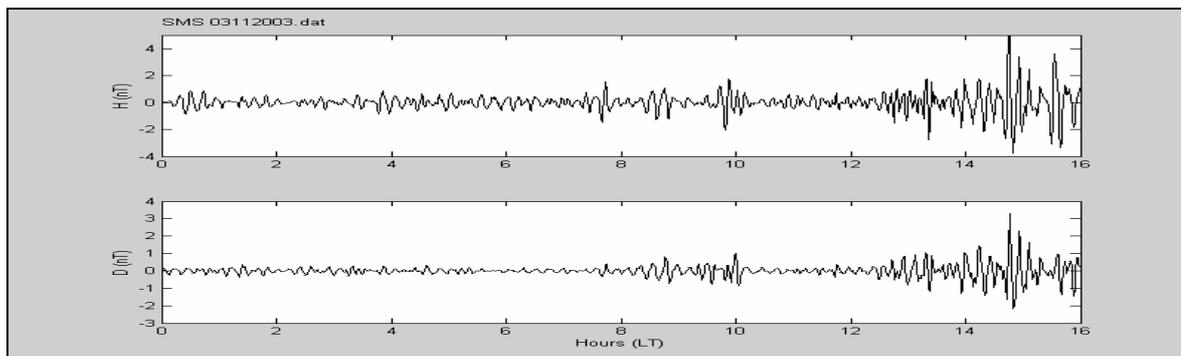


Figura 5.65: Dados filtrados de SMS.

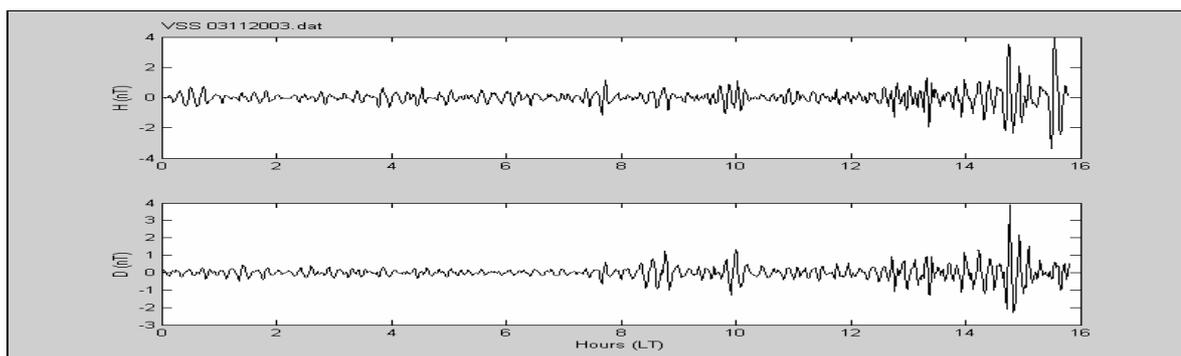


Figura 5.66: Dados filtrados de VSS.

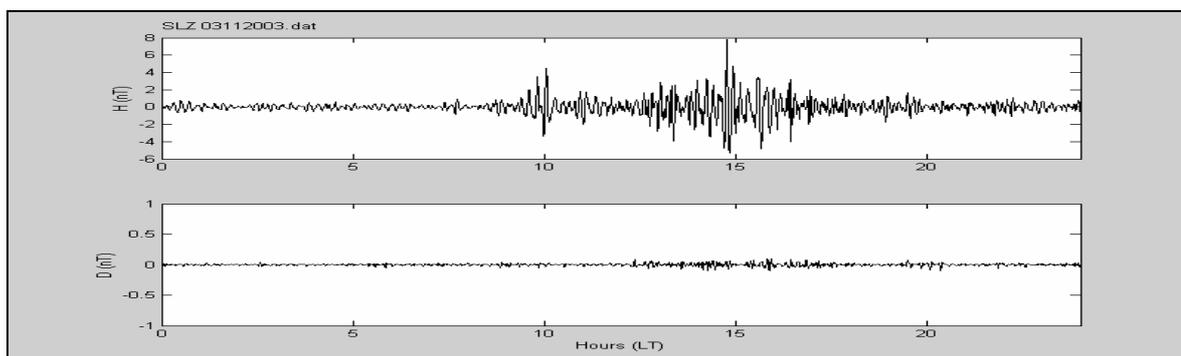


Figura 5.67: Dados filtrados de VSS.

As Figuras 5.68, 5.69 e 5.70 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 04/11/2003.

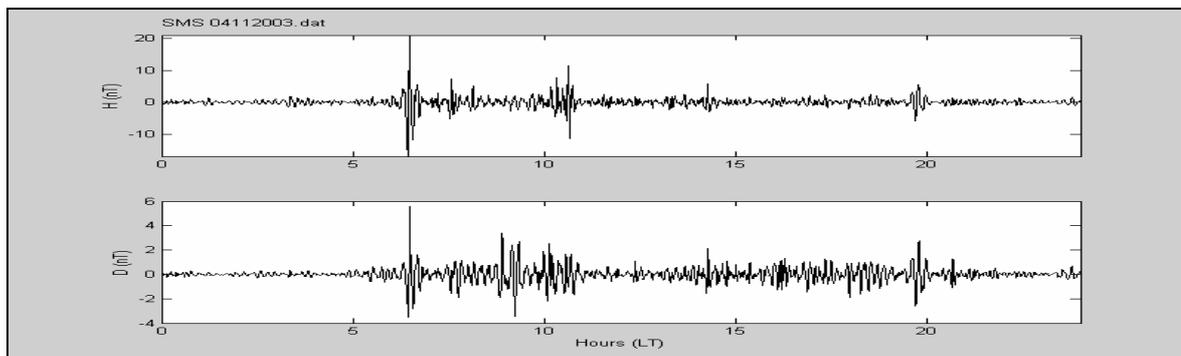


Figura 5.68: Dados filtrados de SMS.

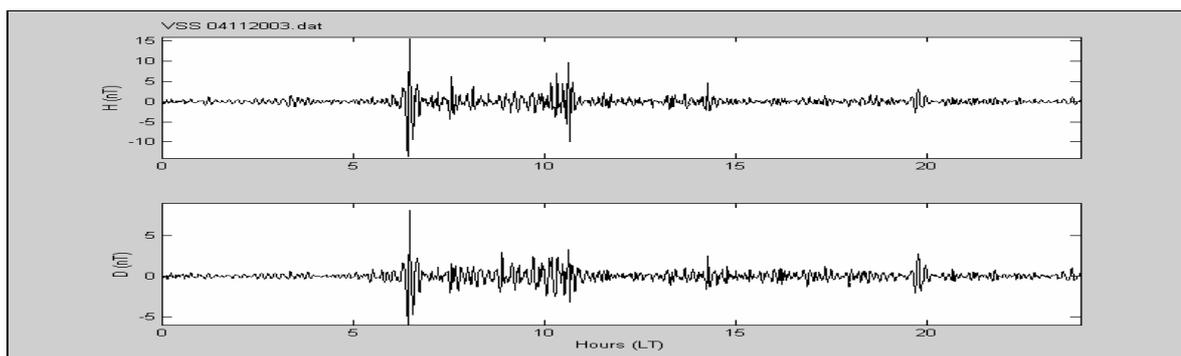


Figura 5.69: Dados filtrados de VSS.

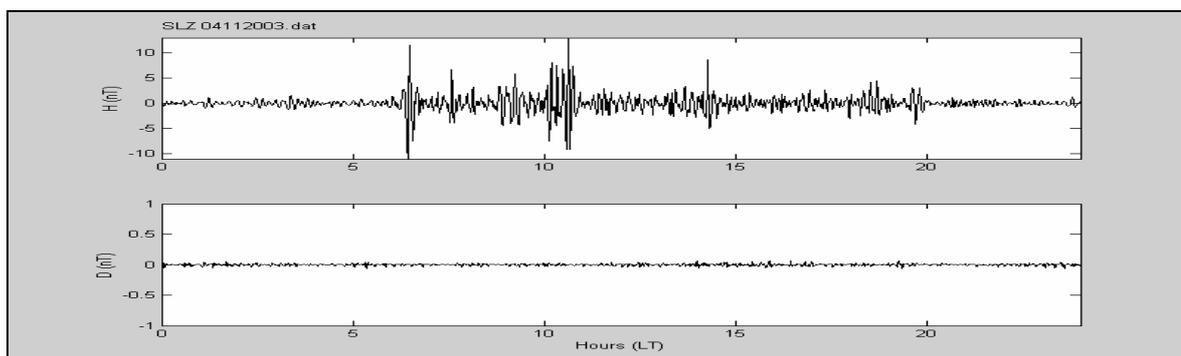


Figura 5.70: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.71, 5.72 e 5.73 mostram os dados geomagnéticos das componentes H e D, respectivamente, filtrados na faixa de período entre 180 e 900 segundos, para as estações geomagnéticas de SMS, VSS e SLZ para o dia 05/11/2003.

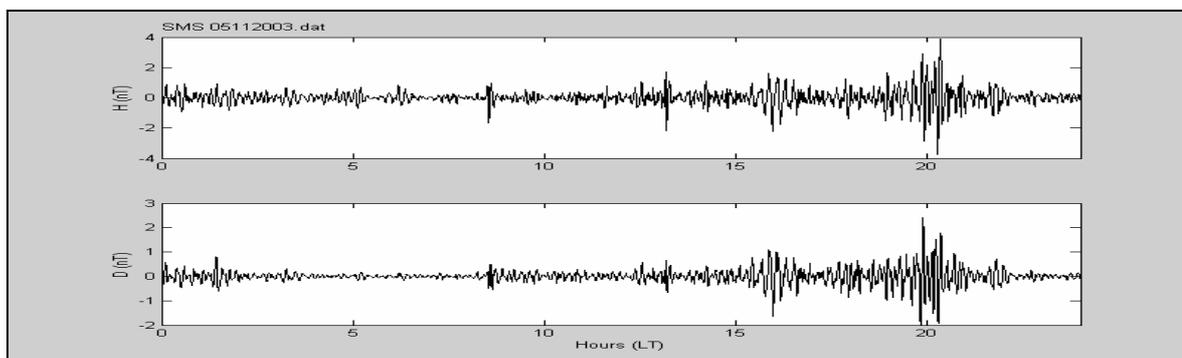


Figura 5.71: Dados filtrados de SMS.

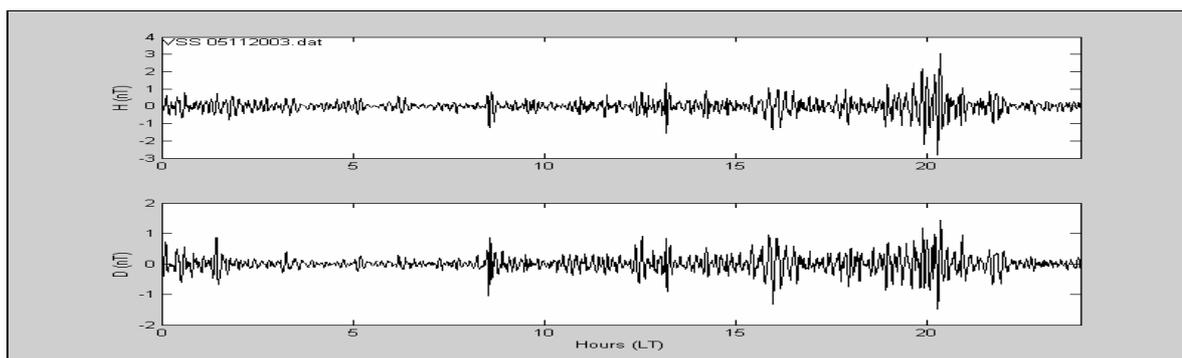


Figura 5.72: Dados filtrados de VSS.

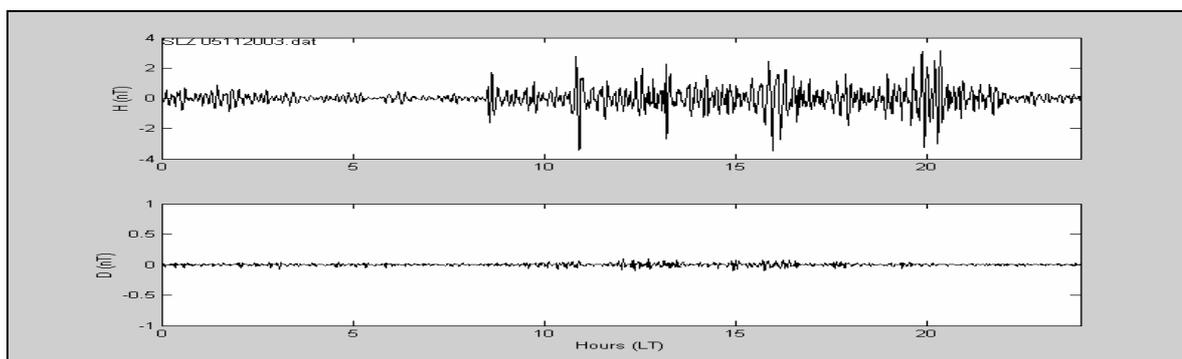


Figura 5.73: Dados filtrados de SLZ.

As Figuras 5.74, 5.75 e 5.76 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 06:00 UT e 12:00 UT no dia 04/11/2003 para SMS, VSS e SLZ.

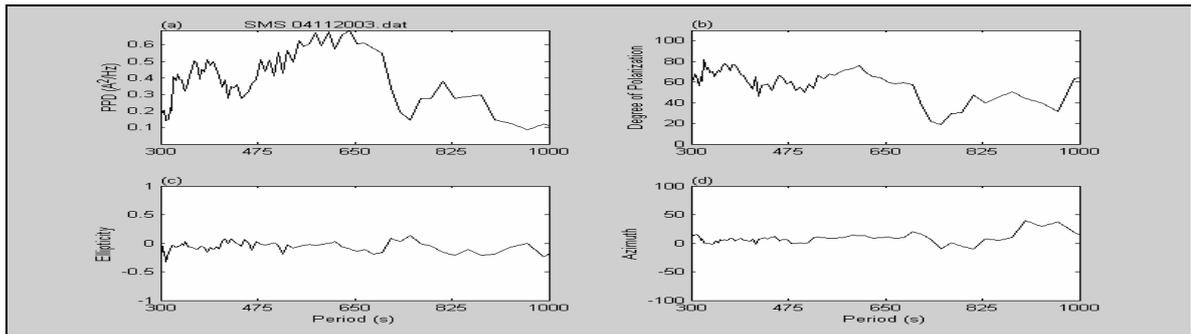


Figura 5.74: Parâmetros de polarização para SMS.

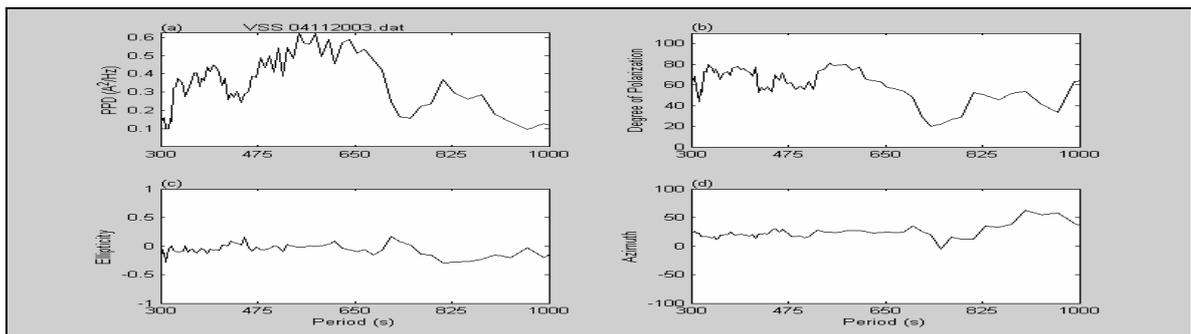


Figura 5.75: Parâmetros de polarização para VSS.

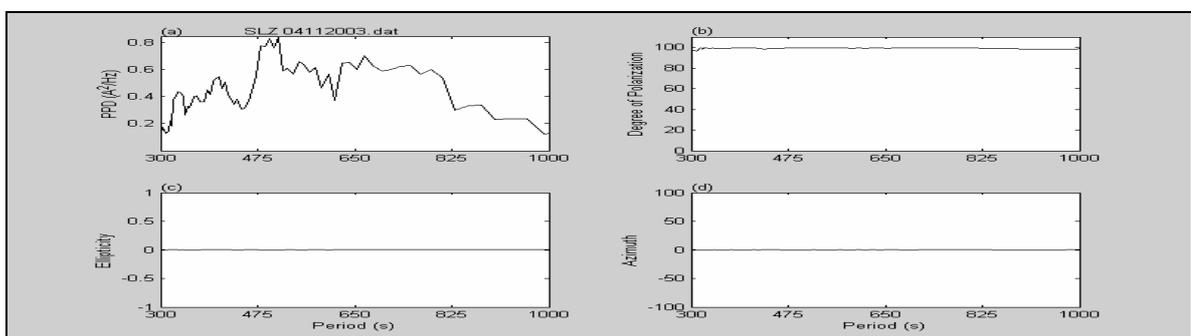


Figura 5.76: Parâmetros de polarização para SLZ.

As Figuras 5.77, 5.78 e 5.79 mostram os parâmetros de polarização das ondas eletromagnéticas, potência (PPD), grau de polarização (Degree of Polarization), elipticidade (Ellipticity) e azimute (Azimuth), para o período de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas, entre 15:00 UT e 23:00 UT, no dia 05/11/2003 para SMS, VSS e SLZ.

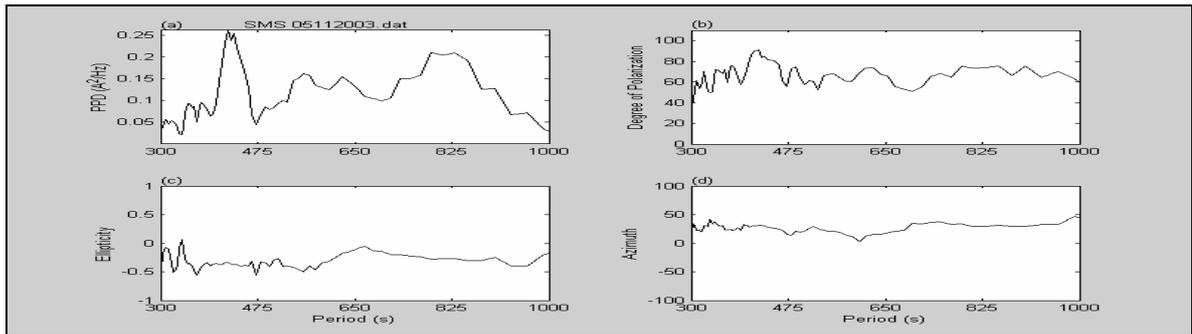


Figura 5.77: Parâmetros de polarização para SMS.

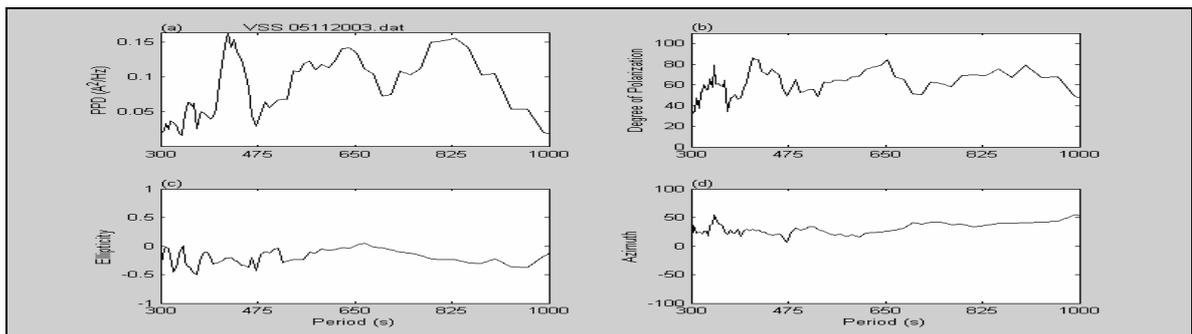


Figura 5.78: Parâmetros de polarização para VSS.

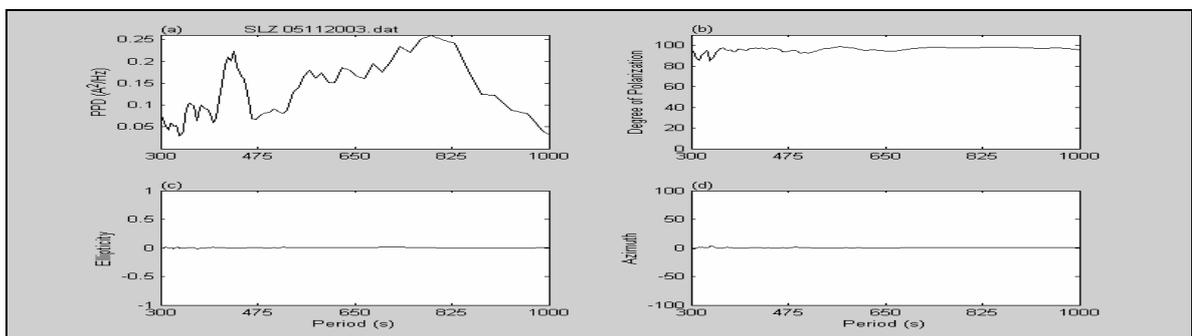


Figura 5.79: Parâmetros de polarização para SLZ.

A seguir estão as interpretações dos resultados obtidos para as quatro tempestades geomagnéticas estudadas.

### 5.5 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 28 E 31 DE MAIO DE 2003

A Figura 5.1 mostra as variações observadas no índice Dst e nos parâmetros do meio interplanetário para o período entre 28 a 31 de Maio de 2003. Observa-se claramente uma relação entre esses parâmetros e o índice Dst. Observa-se que logo após um aumento súbito na velocidade do vento solar e pressão dinâmica, ocorre uma queda no índice Dst. Nesse momento observa-se alterações no campo elétrico interplanetário e na componente Z do campo magnético interplanetário. Enquanto um deles tem uma variação positiva, verifica-se que o outro, simultaneamente tem uma variação negativa e vice-versa.

A figura 5.2 apresenta as variações detectadas na superfície da Terra, nas componentes H e D do campo geomagnético, em SMS, VSS e SLZ. No dia 29/05/2003, observamos uma queda no valor da componente H nas três estações geomagnéticas, o que indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética. A tempestade geomagnética tem seu início após as 12:00 UT do dia 29/05/2003, sua fase principal vai até por volta das 24:00 UT do dia 29/05/2003 e após inicia a fase de recuperação. Com relação a componente H, observa-se que em SLZ as amplitudes das pulsações geomagnéticas detectadas são maiores quando comparadas a SMS e VSS. Quanto a componente D, observamos pulsações com amplitudes maiores em SMS em relação a VSS.

As Figuras 5.3 a 5.14 mostram os dados geomagnéticos filtrados na faixa entre 180 e 900 segundos para o período entre 28 e 31/05/2003, para SMS, VSS e SLZ. Com base nesses resultados são escolhidos os períodos de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas para se estudar os parâmetros de polarização.

As Figuras 5.15 a 5.17 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 11:00 UT e 24:00 UT do dia 29/05/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar em todas as estações, porém a amplitude máxima em SLZ é maior que a observada em SMS e VSS. O parâmetro grau de polarização, apresenta-se com valor próximo de 100% durante todo o período para SLZ. Os parâmetros elipticidade e azimute apresentam valores muito próximos a zero para todo o período em SLZ. Em VSS observa-se variações um pouco maiores que em SMS, para os parâmetros grau de polarização, elipticidade e azimute.

As Figuras 5.18 a 5.20 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 11:00 UT e 24:00 UT do dia 30/05/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar em todas as estações, porém a amplitude máxima em SLZ é 1,6, enquanto em SMS e VSS é 0,6. O parâmetro grau de polarização, apresenta-se com valor próximo de 100% durante todo o período para SLZ. Os parâmetros elipticidade e azimute apresentam valores muito próximos a zero para todo o período em SLZ. Em VSS observa-se variações um pouco

menores que em SMS, para os parâmetros grau de polarização, elipticidade e azimute, diferentemente do observado no dia 29/05/2003.

#### 5.6 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 17 E 20 DE AGOSTO DE 2003.

A Figura 5.21 mostra as variações observadas no índice Dst e nos parâmetros do meio interplanetário para o período entre 17 a 20 de Agosto de 2003. Observa-se claramente uma relação entre esses parâmetros e o índice Dst. Observa-se que logo após um aumento súbito na velocidade do vento solar e pressão dinâmica, ocorre uma queda no índice Dst. Nesse momento observa-se alterações no campo elétrico interplanetário e na componente Z do campo magnético interplanetário. Enquanto um deles tem uma variação positiva, verifica-se que o outro, simultaneamente tem uma variação negativa e vice-versa.

A figura 5.22 apresenta as variações detectadas na superfície da Terra, nas componentes H e D do campo geomagnético, em SMS e VSS. No dia 17/08/2003, observamos uma queda no valor da componente H nas duas estações geomagnéticas, o que indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética. A tempestade geomagnética tem seu início após as 12:00 UT do dia 17/08/2003, sua fase principal vai até por volta das 24:00 UT do dia 18/08/2003 e após inicia a fase de recuperação. Com relação a componente H, observa-se que as amplitudes das pulsações geomagnéticas detectadas em SMS e VSS são muito similares. Quanto a componente D, observamos pulsações com amplitudes maiores em SMS em relação a VSS.

As Figuras 5.23 a 5.30 mostram os dados geomagnéticos filtrados na faixa entre 180 e 900 segundos para o período entre 17 e 20/08/2003, para SMS e VSS. Com base nesses resultados são escolhidos os períodos de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas para se estudar os parâmetros de polarização.

As Figuras 5.31 e 5.32 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 13:00 UT e 24:00 UT do dia 17/08/2003 para as duas estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar em SMS e VSS. O parâmetro grau de polarização apresenta algumas diferenças para SMS e VSS. Para a elipticidade observa-se que em VSS o valor está mais próximo de zero, quando comparado a SMS. Para o azimute, observa-se que o valor fica mais próximo de zero em SMS quando comparado a VSS.

As Figuras 5.33 e 5.34 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 00:00 UT e 08:00 UT do dia 18/08/2003 para as duas estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar em SMS e VSS, sendo que o valor máximo observado em SMS é um pouco maior. O parâmetro grau de polarização apresenta algumas diferenças para SMS e VSS. Os parâmetros elipticidade e azimute são bastante similares para SMS e VSS.

As Figuras 5.35 e 5.36 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 11:00 UT e 18:30 UT do dia 18/08/2003 para as duas

estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta variações similares em SMS e VSS. O parâmetro grau de polarização apresenta variações maiores em SMS. Os parâmetros elipticidade e azimute apresentam diferenças entre SMS e VSS.

#### 5.7 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 27 E 31 DE OUTUBRO DE 2003.

A Figura 5.37 mostra as variações observadas no índice Dst e nos parâmetros do meio interplanetário para o período entre 27 a 31 de Outubro de 2003. Observa-se claramente uma relação entre as quedas nos valores de Bz e o índice Dst.

A figura 5.2 apresenta as variações detectadas na superfície da Terra, nas componentes H e D do campo geomagnético, em SMS, VSS e SLZ. No dia 29/10/2003, observamos uma queda no valor da componente H nas três estações geomagnéticas, e outra no dia 30, o que indica a ocorrência de duas tempestades geomagnéticas. A primeira tempestade geomagnética tem seu início após as 06:00 UT do dia 29/05/2003, sua fase principal vai até por volta das 20:00 UT do dia 29/05/2003 e após inicia a fase de recuperação. A segunda tempestade geomagnética tem seu início após as 16:00 UT do dia 30/10/2003, sua fase principal vai até por volta das 24:00 UT do dia 30/05/2003 e após inicia a fase de recuperação. Com relação a componente H, observa-se que em SLZ as amplitudes das pulsações geomagnéticas detectadas são maiores quando comparadas a SMS e VSS, porém no momento do choque das partículas emitidas pelo Sol, no início da primeira tempestade, observa-se uma variação mais intensa em SMS e VSS. Quanto a componente D, vamos considerar apenas as variações observadas em VSS, pois SMS apresenta ruído.

As Figuras 5.39 a 5.53 mostram os dados geomagnéticos filtrados na faixa entre 180 e 900 segundos para o período entre 27 e 31/10/2003, para SMS, VSS e SLZ. Com base nesses resultados são escolhidos os períodos de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas para se estudar os parâmetros de polarização.

As Figuras 5.54 a 5.56 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 06:00 UT e 21:00 UT do dia 29/10/2003 para as três estações geomagnéticas. A Figura 5.54 será ignorada, pois os dados de SMS apresentam ruídos. Para o parâmetro potência observa-se diferenças entre VSS e SLZ. O parâmetro grau de polarização é de aproximadamente 100% para todo o período em SLZ, enquanto apresenta muitas variações para VSS. Os parâmetros elipticidade e azimute estão próximos a zero em SLZ, enquanto apresentam-se bastante variáveis em VSS.

As Figuras 5.57 e 5.59 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 16:00 UT e 24:00 UT do dia 30/10/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta variações mais intensas em SMS e VSS, quando comparadas a SLZ. O parâmetro grau de polarização apresenta diferenças entre SMS e VSS, enquanto é próximo a 100% em SLZ. O parâmetro elipticidade apresenta variações mais intensas em VSS quando comparado a SMS, e apresenta valor

aproximadamente igual a zero em SLZ. O parâmetro azimute apresenta variações mais intensas em VSS quando comparado a SMS, e apresenta valor aproximadamente igual a zero em SLZ.

As Figuras 5.60 a 5.62 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 10:00 UT e 16:00 UT do dia 31/10/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta variações mais intensas em SLZ, quando comparadas a SMS e VSS. O parâmetro grau de polarização não apresenta grandes diferenças entre SMS e VSS, enquanto é próximo a 100% em SLZ. O parâmetro elipticidade não apresenta grandes diferenças entre VSS e SMS, e apresenta valor aproximadamente igual a zero em SLZ. O parâmetro azimute não apresenta grandes diferenças em VSS e SMS, e apresenta valor aproximadamente igual a zero em SLZ.

#### 5.8 - SOBRE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA OCORRIDA ENTRE 03 E 05 DE NOVEMBRO DE 2003.

A Figura 5.63 mostra as variações observadas no índice Dst e nos parâmetros do meio interplanetário para o período entre 3 a 5 de Novembro de 2003. Observa-se claramente uma relação entre esses parâmetros e o índice Dst. Observa-se que logo após um aumento súbito na velocidade do vento solar e pressão dinâmica, ocorre uma queda no índice Dst. Nesse momento observa-se alterações no campo elétrico interplanetário e na componente Z do campo magnético interplanetário. Enquanto um deles tem uma variação positiva, verifica-se que o outro, simultaneamente tem uma variação negativa e vice-versa.

A figura 5.64 apresenta as variações detectadas na superfície da Terra, nas componentes H e D do campo geomagnético, em SMS, VSS e SLZ. No dia 04/11/2003, observamos um aumento súbito e após uma queda no valor da componente H nas três estações geomagnéticas, o que indica a ocorrência de uma tempestade geomagnética. O aumento súbito detectado na componente H é mais intenso em SMS que em VSS e SLZ. A tempestade geomagnética tem seu início após as 06:00 UT do dia 04/11/2003, sua fase principal vai até por volta das 24:00 UT do dia 04/11/2003 e após inicia a fase de recuperação. Com relação a componente H, observa-se que as amplitudes das pulsações geomagnéticas detectadas em SMS são mais intensas que as pulsações detectadas em VSS e SLZ. Quanto a componente D, observamos pulsações com amplitudes maiores em SMS em relação a VSS.

As Figuras 5.65 a 5.73 mostram os dados geomagnéticos filtrados na faixa entre 180 e 900 segundos para o período entre 03 e 05/08/2003, para SMS, VSS e SLZ. Com base nesses resultados são escolhidos os períodos de atividade mais intensa das pulsações geomagnéticas para se estudar os parâmetros de polarização.

As Figuras 5.74 a 5.76 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 06:00 UT e 12:00 UT do dia 04/11/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar em SMS e VSS, e algumas diferenças quando comparados a SLZ. O parâmetro grau de polarização



apresenta algumas variações mais intensas em VSS, quando comparado com SMS. Para a elipticidade observa-se um comportamento muito similar em VSS e SMS, e tem um valor próximo a zero para SLZ. Para o azimute, igualmente observa-se um comportamento muito similar em VSS e SMS, e um valor próximo a zero para SLZ.

As Figuras 7.77 a 7.79 mostram os parâmetros de polarização das pulsações geomagnéticas para o período entre 15:00 UT e 23:00 UT do dia 05/11/2003 para as três estações geomagnéticas. O parâmetro potência apresenta uma variação similar nas três estações, porém em SMS e SLZ o valor máximo é maior. O parâmetro grau de polarização apresenta algumas variações mais intensas em VSS, quando comparado com SMS. Para SLZ ele é aproximadamente igual a 100%, apenas apresentando uma variação no início do período. Para a elipticidade observa-se um comportamento muito similar em VSS e SMS, e tem um valor próximo a zero para SLZ. Para o azimute, observa-se variações maiores em VSS em relação a SMS, e um valor próximo a zero para SLZ.



## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Através da análise dos dados geomagnéticos relativos ao período em que ocorreram tempestades geomagnéticas e sua comparação com os parâmetros do plasma solar no meio interplanetário, fornecidos pelo satélite ACE, verifica-se uma correlação existente entre eles.

A fase inicial da tempestade geomagnética é caracterizada por um aumento súbito na pressão dinâmica e velocidade do vento solar. A fase principal é caracterizada pelo decréscimo no valor do parâmetro Bz e aumento no valor do parâmetro E, que indica a reconexão do campo magnético interplanetário com o campo magnético terrestre, o que facilita a entrada das partículas emitidas pelo Sol em direção a Terra. A fase de recuperação é caracterizada pelo retorno dos parâmetros do meio interplanetário aos seus valores normais observados antes do início da tempestade.

A análise espectral e dos parâmetros de polarização mostra a ocorrência de pulsações geomagnéticas Pc5 e Pc6 e suas características nas latitudes baixas.

Pretende-se dar continuidade a esse estudo, considerando outros eventos interessantes e utilizando dados geomagnéticos de outras estações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARANTE, J. A. A.;** General Topics on geomagnetism and Studies of the Occurrence of micropulsations in São José dos Campos. Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE), São José dos Campos, SP, Brazil. Relatório Interno CNAE-LAFE-048, 1966.
- BATH, M.;** Spectral analysis in geophysics. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1974.
- CAMPBELL, W. H.;** Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge University Press, 1997.
- FERNANDEZ, J. H.;** Análise da variação temporal de eventos Trimpí e da correlação desses eventos com a atividade geomagnética. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, INPE.
- FOWLER, R. A.; BOSTICK, B. J.; ELLIOTT, R. D.;** Polarization analysis of natural and artificially induced geomagnetic micropulsations. Journal of Geophysical Research, v. 32, n. 11, p. 2871-2883, 1967.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T. AND VASYLIUNAS, V. M.;** What is a magnetic storm? J. Geophys. Res., v. 99, n.A4, p. 5771-5792, Apr. 1994.
- HIBBERD, F. H.;** Journal of Geophysical Research. v. 78, p. 2779, 1981.
- MARPLE, S. L. J.;** Digital spectral analysis with applications. Prentice-Hal, London, 1987.
- PEREIRA, O. J.;** Estudos de polarização de pulsações magnéticas na faixa PC 3 a PC 5 observadas em Santa Maria e Eusébio. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, INPE, 1994.
- PINTO JUNIOR, O. e GONZALEZ, W. D.;** Anomalia Magnética Brasileira. Ciência Hoje, v. 9, n. 52, p. 30-35, 1989.
- PRESS, N. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.;** Numerical Recipes. Cambridge University Press, 1986.
- SANSON, J. C.;** Descriptions of the polarization states of vector process: applications to ULF magnetic field. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, v. 34, p. 403-419, 1973.
- SANSON, J. C.;** Matrix and Stokes vector representations of detectors for polarized waveforms: theory, with some applications to teleseismic waves. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, v. 31, p. 583-603, 1977.
- SANSON, J. C.;** Pure States, polarized waves, and principal components in the spectra of multiple, geophysical time series. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, v. 72, p. 647, 1983a.
- SANSON, J. C.;** The spectral matrix, eigenvalues and principal component in the analysis of multichannel data. Annales Geophysicae, v. 1, n. 2, p. 115-119, 1983b.
- SANSON, J. C.;** The Reduction of sample-bias in polarization estimates for multichannel geophysical data with anisotropic noise. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, v. 75, p. 289, 1983c.



- SAMSON, J. C.;** Geomagnetic pulsations and plasma waves in the Earth's magnetosphere. In: Jacobs, J. A. Ed. Geomagnetism, Vol. 4, Academic Press, London, p. 481-591, 1991.
- SERSON, S. H.;** Instrumentation for induction studies on land. Phys. Earth Planet Int., Vol 7, p. 313-322, 1973.
- SOBRAL, J. H. A.;** Sobre a Importância Estratégica da Ciência Espacial para o Brasil Parcerias Estratégicas, Número 7, p. 87-102, Outubro 1999.
- STEARNS, S. D.;** Digital Signal Analysis. Haydem Book Company, New Jersey, 1975.
- VAN ALLEN, J. A., MCLLWAIN, E. C., LUDWING, G. H.;** Radiation observations with satellite 1958e. Journal of Geophysical Research, n. 64, p. 271, 1959.
- ZANANDREA, A.;** Micropulsações Geomagnéticas em Santa Maria – RS. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, INPE-5553- TDI/537, 1994.
- ZANANDREA, A.;** Estudo de micropulsações geomagnéticas PC 3-5 em latitudes muito baixas, no Brasil. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, INPE-7233- TDI/687, 1999.



## ANEXOS



## **ANEXO 1 - PROGRAMAS EM LINGUAGEM MATLAB**



PROGRAMA CONVNAROD1440.M

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

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

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

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

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

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





```
end
fclose(fid);
%-----

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

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

subplot(ndim,1,nn), plot(t,d,t1,d1);
ylabel('D (nT)');
grid on
set(gca,'XTickLabel','');
nn=nn+1;

subplot(ndim,1,nn), plot(t,z,t1,z1)
ylabel('Z (nT)');
grid on
nn=nn+1;

xlabel('Time in Hours')
a=['!rem grafico00.tif' str_temp1 '.tif']
eval (a)
```





### PROGRAMA FIGMTM5.M

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

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

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

[E,VV]=dpss(N,W);
k=length(E(1,:));
for i=1:k,
    tapsum=0.0;
    tapsq=0.0;
    tapsum=sum(E(:,i));
    tapsq=sum((E(:,i)).^2);
    aa=sqrt(tapsq/N);
    E(:,i)=E(:,i)/aa;
end
[SX,c,wkx,skx]=mtm(x,W,'dap',.95,E,VV);
[SY,c,wky,sky]=mtm(y,W,'dap',.95,E,VV);
[SZ,c,wkz,skz]=mtm(z,W,'dap',.95,E,VV);
for i=1:length(SX)
    freq(i)=(i-1)/(2*(length(SX)-1)*d);
```





```
mx=(skx(i,:));
my=(sky(i,:));
% mz=(skz(i,:));
m=[mx,my];
[U,S,V]=svd(m);
pxy(i)=V(2,1)/V(1,1);
fxy(i)=atan2(imag(pxy(i)),real(pxy(i)))*180/pi;
grau(i)=sqrt((S(1,1)-S(2,2))^2/(S(1,1)+S(2,2))^2)*100;
psp(i)=S(1,1)-S(2,2);
V(3,1)=0+0i;
[elp(i),ang(i)]=polar(V(1,1),V(2,1),V(3,1));
end

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

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

xlim=[300 1000];
xticks=linspace(min(xlim),max(xlim),5);
subplot(2,2,1)
plot(per,psp,'k'),axis([xlim min(psp) max(psp)]),ylabel('PPD (A^2/Hz)')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),1.05*max(psp),'(a)');
text(min(xlim)*1.5,1.05*max(psp),str_temp1);
hold off
subplot(2,2,2)
plot(per,grau,'k'),axis([xlim 0 110]),ylabel('Degree of Polarization')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),116,'(b)');
hold off
```



```
subplot(2,2,3),
plot(per,elp,'k'),axis([xlim -1 1]),xlabel('Period (s)'),ylabel('Ellipticity'),
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),1.1,'(c)');
hold off
subplot(2,2,4)
plot(per,ang,'k'),axis([xlim -100 100]),xlabel('Period (s)'),ylabel('Azimuth')
set(gca,'XTick',xticks);
text(min(xlim),110,'(d)');
hold off

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



## PROGRAMA BANDPASS.M

```
function[y]=bandpass(x,Fs,fl,fh,N)
%passband = [.4 .6];
passband=[fl fh]*2/Fs;
[Bb,Ab] = butter(N, passband);
%[Bb,Aa]=ellip(4,0.1,40,[10 20]*2/Fs);
[H,w] = freqz(Bb,Ab,512);
%plot((w*Fs/(2*pi)),abs(H));

per=round(0.2*length(x));
ini=x(per:-1:1);
fim=x(length(x):-1:(length(x)-per+1));
xx=[ini x fim];
%sf=filter(Bb,Ab,x);
sf=filtfilt(Bb,Ab,xx);
y=sf(per+1:per+length(x));
```



**ANEXO 2 - TITULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS E OU  
SUBMETIDOS**

1 - Artigo Submetido: “**Analysis of the Geomagnetic Storm Variations and the count-rate of Cosmic Ray Muons recorded at the Brazilian Southern Space Observatory**”. Autores: Everton Frigo, Jairo F. Savian, Marlos R. da Silva, Alisson Dal Lago, Nalin B. Trivedi, Nelson J. Schuch. Evento: Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Local: Salvador, BA.

2 - Resumo Publicado: “**Clima Espacial e distúrbios no Geoespaço**”. Autores: Jairo Francisco Savian, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon, Vânia Fátima Andrioli, Marcos Roberto Signori, Everton Frigo, Nelson Jorge Schuch. Evento: XIX Jornada Acadêmica Integrada 2004. Local: Santa Maria, RS

3 - Resumo Publicado: “**Comparação entre variações geomagnéticas observadas em Vassouras – RJ (22.40°S, 43.65°W) e São Martinho da Serra – RS (29.43°S, 53.80°W)**”. Autores: Everton Frigo, Nalin B. Trivedi, Virnei S. Moreira, Eduardo Andrighetto, Jairo F. Savian, Nelson J. Schuch. Evento: XIX Jornada Acadêmica Integrada 2004. Local: Santa Maria, RS.

4 - Resumo Publicado: “**Estudos experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas – magnetômetro de núcleo saturado**”. Autores: Eduardo Andrighetto, Everton Frigo, Virnei S. Moreira, Nelson Jorge Schuch, Nalin Babulal Trivedi. Evento: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica – CRICTE 2004. Local: Curitiba, PR.

5 - Resumo Publicado: “**Estudos geomagnéticos na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul**”. Autores: Virnei S. Moreira, Everton Frigo, Eduardo Andrighetto, Nalin B. Trivedi, Nelson J. Schuch. Evento: XIX Jornada Acadêmica Integrada 2004. Local: Santa Maria, RS.

6 - Resumo Publicado: “**Geomagnetic Storm - time variations in the South Atlantic Anomaly Region**”. Autores: E. F. Berra, E. Frigo, E. Andrighetto, C. E. Antunes, N. B. Trivedi, S. L. G. Dutra, N. J. Schuch. Evento: General Assembly 2005, European Geosciences Union. Local: Viena, Austria.

7 - Resumo Publicado: “**Monitoramento Contínuo do Campo Magnético Terrestre na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul**”. Autores: Everton Frigo, Eduardo Andrighetto, Jairo Francisco Savian, Elias Fernando Berra, Severino Luiz Guimarães Dutra, Nalin Babulal Trivedi, Nelson Jorge Schuch. Evento: 12º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo. Local: São Paulo, SP.



### **ANEXO 3 - CERTIFICADOS**