



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14214-TDI/1115

**ESTUDO DA DINÂMICA DA CORRENTE DE ANEL DURANTE A
FASE PRINCIPAL DE SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS**

Aline de Lucas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon e Ezequiel Echer, aprovada em 31 de maio de 2005.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14214-TDI/1115

**ESTUDO DA DINÂMICA DA CORRENTE DE ANEL DURANTE A
FASE PRINCIPAL DE SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS**

Aline de Lucas

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon e Ezequiel Echer, aprovada em 31 de maio de 2005.

INPE
São José dos Campos
2007

550.385.46

Lucas, A.

Estudo da dinâmica da corrente de anel durante a fase principal de supertempestades magnéticas / Aline de Lucas.

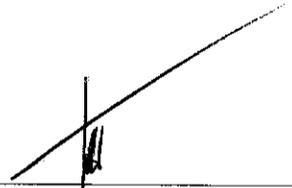
- São José dos Campos: INPE, 2005.

256p. ; – (INPE-14214-TDI/1115)

1. Tempestades magnéticas. 2. Interação vento solar-terra. 3. Energia magnetosférica 4. Parâmetro epsilon de acoplamento. 5. Estruturas interplanetárias geoféticas. I. Título.

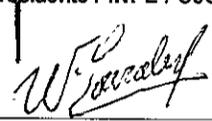
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Geofísica Espacial

Dr. José Humberto Andrade Sobral



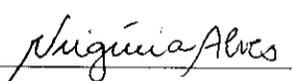
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Walter Demetrio Gonzalez Alarcon



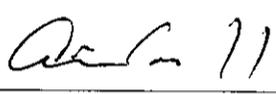
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Maria Virgínia Alves



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Alícia Luiza Clúa de Gonzalez Alarcon



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Jean-Pierre Raulin



Convidado(a) / CRAAM / São Paulo - SP

Aluno (a): Aline de Lucas

São José dos Campos, 31 de maio de 2005

Sempre em tua vida é importante lembrar que:

"Quando falares, cuida para que tuas palavras sejam melhores que o silêncio."

(Provérbio Indiano)

Mas também é preciso lembrar de que o que nos motiva neste mundo, na maioria das vezes, senão sempre, é a fé, seja em ti mesmo, seja na ciência, seja no próximo, seja no Universo, nas teorias da evolução... E, principalmente, àqueles que acreditam que existe uma força maior e que conspira a nosso favor, jamais pode fugir à consciência que:

“... É preciso esquentar o ferro várias vezes e martelá-lo muito tempo, antes que ele possa tornar-se aço temperado. E só então é possível dar-lhe a forma que se deseja e fazer dele uma espada cortante. Da mesma forma, um homem deve passar várias vezes pela fornalha das tribulações do mundo antes de tornar-se humilde, puro e capaz de ascender à presença de Deus...”.

(Ramakrishna)

*A meus pais,
ELIO ANTÔNIO E RENI DE LUCAS
E ÀS MINHAS IRMÃS ANDRÉA E LUÍSA
pelo incentivo e pela confiança em mim depositada.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiríssimo lugar, e com todo o amor e carinho, queria agradecer àquela que é a razão da minha vida: minha família. A vocês, meus amados pai, mãe, vovó, manas Déa e Luvis (ela me ‘pega’ se souber que a chamei assim...) ofereço o resultado do meu esforço em agradecimento a todo o apoio e acolhida. Obrigada por terem me ensinado a cultivar a bondade e a perseverança; isto fez com que eu continuasse minha caminhada mesmo em meio a tantas dificuldades.

Jamais poderia deixar de agradecer aos meus maninhos e maninhas (Rô, Ami, Alê, Jana, Sumu, Bi, Di, Gi, Gil, Rafa, Cá, Kadi, Marlos, Valente, Nado, Jr. Borracho,...). Aos meus amigos santa-marienses o meu muito obrigada pelas farras, pelos risos, pelas cachaças, pelas caipiras, pelo apelido (Mãgraaaaa Véia...ninguém merece!!!!), pelos bailes de formatura, pelas confissões, ... Se eu for listar cada momento da minha vida que passei com eles e que me fizeram sentir muito feliz, eu escrevo um livro. Não!!!! Quem sabe uma tese, analisando cada amostra, cada particularidade, porque são peças únicas e muito valiosas para mim. Foi tão bom lembrar de quem merece meus agradecimentos, e sentir o carinho de quem amamos, daqueles que cultivamos no coração...

Aos meus co-co-orientadores (nossa invenção para aqueles que não foi possível oficializar como orientadores, mas que nos ampararam nesta caminhada) Alisson Dal Lago, Luís Eduardo Vieira e Luís Fernando Guarnieri, meus agradecimentos pela paciência, por todo o apoio e pelas discussões e “puxões de orelha”, sempre válidos, e que aceleraram o processo de amadurecimento das idéias. Ah, e por terem me poupado de ‘surras’ maiores do MatLab também... Alisson, você e o Dr. Nelson Schuch foram e são os responsáveis por eu estar aqui hoje escrevendo. Lembro até hoje do dia em que conversamos no ônibus e eu decidi conhecer o INPE e as linhas de pesquisa que o Instituto oferecia.

Aos meus orientadores, Dr. Ezequiel Echer e Dr. Walter Gonzalez, nem sei como retribuir todo o apoio e os ensinamentos. Ezequiel, admiro-te muito pelo coração grandioso que tens, além da tua capacidade profissional. Ao Dr. Walter, o meu muito obrigada pelo aceite em ser meu orientador quando eu havia descoberto a linha de pesquisa que gostaria de seguir. Além disso, pelo conhecimento transmitido e pelo apoio e colaboração na realização deste trabalho.

Não poderia esquecer do meu mestre Peneireiro, com quem aprendi muito mais do que matemática pura. Foi sempre um exemplo de humildade e de bondade, um verdadeiro pai para seus pupilos.

À galera inpeana, meus amigos e amigas, ao Clube da Luluzinha, que formamos, pelos momentos de alegria e descontração, pela amizade sincera e, principalmente, pelo apoio nos momentos de dificuldade. Somos sempre mais fortes quando podemos contar com alguém como vocês.

Aos professores do INPE, que contribuíram muito para o amadurecimento das idéias e fixação dos conteúdos, principalmente pelo incentivo e apoio.

Às famílias que me acolheram, principalmente às famílias Muralikrishna e Govindaraju, meu carinho e minha admiração pela personalidade e pela pureza de espírito. Aprendi muito com vocês e me senti parte integrante de cada uma. A vocês eu ofereço o resultado do meu trabalho também.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado. Também gostaria de agradecer à Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro e pelas viagens a congressos nacionais.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo da dinâmica da corrente de anel durante eventos de tempestades magnéticas intensas ($-250 < Dst < -100 nT$) e super-intensas ($Dst < -250 nT$). O comportamento dos índices geomagnéticos e dos parâmetros interplanetários (B_s , E_y) foram avaliados durante 15 eventos de cada classe de tempestade. A energia envolvida no acoplamento vento solar-magnetosfera foi avaliada utilizando-se o parâmetro epsilon de Akasofu, com duas correções: a primeira, já existente nas bibliografias, que é a correção do raio da magnetopausa, e a segunda, considerando-se, além da correção da geometria, a eficiência da pressão no processo de reconexão. A origem interplanetária das tempestades intensas e super-intensas foi estudada avaliando-se a geofetividade das estruturas interplanetárias através da energia injetada para dentro da magnetosfera, considerando-se o processo de reconexão na magnetopausa diurna. As estruturas interplanetárias foram classificadas de acordo com a ocorrência de IMF intensos direcionados para o sul como: (a) eventos na bainha, (b) eventos na MC (c) eventos CIR, (d) eventos de CME* (não nuvem magnética) e (e) eventos complexos. A energia é calculada através do epsilon de Akasofu, e, a partir dele, as duas correções mencionadas são feitas: O que se observa é que, durante as supertempestades, os eventos de bainha foram mais geofetivos, enquanto que para as tempestades intensas, os eventos complexos foram mais energéticos. Além disso, com as correções do epsilon foi possível melhorar a estimativa da energia para cada classe de tempestade. Com a correção da geometria do sistema, observou-se que a energia disponível usando-se o epsilon convencional é superestimada para o caso das supertempestades magnéticas, porque a área efetiva da magnetopausa é reduzida. Já no caso das tempestades magnéticas intensas acontece o contrário, uma vez que a dimensão da área da magnetopausa aumenta. Na correção pela pressão, a energia para as tempestades intensas foi superestimada em relação àquela com a correção da geometria. Apesar das supertempestades apresentarem um número reduzido de eventos, o epsilon corrigido pela área e pela pressão parece indicar uma separação clara entre as classes intensa e super, considerando a energia integrada que é transmitida à magnetosfera durante a fase principal das tempestades.

STUDY OF THE RING CURRENT DYNAMICS DURING THE MAIN PHASE OF SUPER INTENSE MAGNETIC STORMS

ABSTRACT

In this work a study on the ring current dynamics during intense ($-250 < Dst < -100 nT$) and super intense ($Dst < -250 nT$) magnetic storms is presented. The geomagnetic indices and interplanetary parameters (B_s , E_y) were assessed during 15 events of each storm class. The solar wind magnetosphere energy coupling was studied using the Akasofu epsilon parameter. Two corrections on this coupling function were used: the first one is an existent alteration in the old bibliographies, where the magnetopause radius is corrected for taking into account the changed solar wind pressure; the second correction accounts for the reconnection efficiency. The interplanetary structures were classified according to the region where the B_z driving structures were observed as: (a) sheath events, (b) magnetic cloud events, (c) corotating interaction regions events, (d) CME (not a magnetic cloud), and (e) complex events. The energy transferred from solar wind into the magnetosphere was calculated using Akasofu's epsilon parameter. It was observed that, for super intense storms the sheath events are more geoeffective, while for the intense magnetic storms the complex events were more energetic. With the epsilon corrections it was possible to improve the estimate of the energy injected into the magnetosphere for each storm class. With the magnetosphere geometry correction, we can observe that the available energy calculated using the conventional parameter is overestimated for magnetic superstorms because the magnetopause effective shape is reduced. For intense magnetic storms the opposite effect is observed, the magnetopause dimension is enhanced. With the pressure correction, the estimate of energy transferred during intense storms was higher than the one with the geometry correction. In despite of the small number of superstorms, it seems that the epsilon parameter corrected by the magnetosphere area and pressure gives a clear distinction between the intense and super intense storm classes, considering with the integrated energy along the storm main phases.

SUMÁRIO

	Pág
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	33
1.1 - Estrutura da Dissertação.....	34
CAPÍTULO 2 - CAUSAS INTERPLANETÁRIAS E TEMPESTADES.....	37
2.1 - Vento Solar.....	37
2.2 - Teorema do Congelamento do Plasma ao Campo Magnético.....	39
2.3 - Características Interplanetárias.....	42
2.4 - Interação Vento Solar-Magnetosfera.....	46
2.5 - Estrutura da Magnetosfera.....	49
2.6 - Índices Geomagnéticos.....	53
2.7 - Tempestades Geomagnéticas.....	55
2.8 - Partículas na Corrente de Anel.....	57
2.9 - Funções de Injeção e Dissipação da Energia do Vento Solar.....	60
2.9.1 - Relação Dessler-Parker-Schopke (DPS).....	63
2.10 - Instrumentação e Dados Interplanetários e Geomagnéticos.....	64
CAPÍTULO 3 - SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS.....	67
3.1 - Tempestade de 12 a 17 de abril de 1981.....	70
3.2 - Tempestade de 12 a 16 de março de 1989.....	76
3.3 - Tempestade de 19 a 23 de outubro de 1989.....	80
3.4 - Tempestade de 16 a 20 de novembro de 1989.....	85
3.5 - Tempestade de 5 a 10 de abril de 2000.....	89
3.6 - Evento de 13 a 18 de julho de 2000.....	94
3.7 - Tempestade de 5 a 10 de novembro de 2001.....	99
CAPÍTULO 4 - TEMPESTADES MAGNÉTICAS INTENSAS.....	105
4.1 - Evento de 8 a 18 de março de 1998.....	109
4.2 - Evento de 2 a 8 de maio de 1998.....	114
4.3 - Evento de 4 a 11 de agosto de 1998.....	118
4.4 - Evento de 15 a 20 de abril de 1999.....	123

4.5 - Evento de 21 a 27 de setembro de 1999.....	128
4.6 - Evento de 20 a 27 de outubro de 1999.....	133
4.7 - Evento de 10 a 16 de fevereiro de 2000.....	138
4.8 - Evento de 23 a 28 de maio de 2000.....	143
CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÕES E COMPARAÇÕES.....	149
5.1 - Correção do Parâmetro Epsilon.....	159
5.2 - Geofetividade das tempestades e parâmetro epsilon.....	165
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177
APÊNDICE A – OUTROS EVENTOS DE TEMPESTADE MAGNÉTICA MUITO INTENSA.....	189
APÊNDICE B – OUTROS EVENTOS DE TEMPESTADE MAGNÉTICA INTENSA.....	223

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 - Representação do fluxo do vento solar a partir do Sol. Nota-se que o formato em espiral de Arquimedes é porque o fluxo acompanha a rotação do Sol. Parte do campo magnético é arrastada com o vento solar, devido ao Teorema do Congelamento do Campo, passando a constituir o que se conhece por campo magnético interplanetário. No detalhe, o encontro com um “obstáculo” interplanetário quebrando a condição do congelamento..... 40
- 2.2 - Representação de uma região de interação corrotante (CIR). O vento solar rápido alcança o vento solar ambiente que se move na direção radial, acompanhando o movimento de rotação. Com isso, duas regiões são formadas: uma região de rarefação e uma região de compressão, devido às topologias de campo diferentes. O plasma é comprimido para onde as linhas de campo convergem..... 46
- 2.3 - Representação esquemática da interação vento solar-magnetosfera, levando à formação de uma cavidade no meio interplanetário, a magnetosfera. Pode-se ver a frente de choque que se forma logo à frente, assim que o vento solar encontra um obstáculo magnetizado..... 47
- 2.4 - Representação da interação entre o vento solar e a magnetosfera. No Sol, uma ejeção de massa coronal é ejetada para o meio interplanetário e o campo magnético interplanetário aparece com direção sul. Na magnetosfera, pode-se observar a linha-X, vista no corte vertical. E representa o campo elétrico interplanetário, que é mapeado para dentro da magnetosfera e J é a corrente da magnetopausa. Os números 1 e 2 representam, respectivamente, as dissipações na região auroral e na corrente de anel..... 48
- 2.5 - Representação esquemática da magnetosfera e suas regiões, que são formadas a partir da interação do vento solar com o campo magnético interplanetário..... 50
- 2.6 - Regiões da magnetosfera e os principais sistemas de corrente formados. Uma das correntes mais importantes é a corrente de anel, com direção para oeste..... 52
- 2.7 - A figura mostra as fases de uma tempestade magnética. Esta tempestade corresponde a um evento de supertempestade que ocorreu 6 de novembro de 2001. O número 1 identifica o início da fase inicial, caracterizada por um aumento no índice Dst. O número 2 corresponde ao fim do impulso súbito e início da fase principal, que se estende até 3, e onde o Dst decresce devido à deflexão do componente horizontal, H. Na seqüência de 3 a 4, a fase de recuperação caracteriza o caminho traçado pelo componente H até voltar a seu estado normal, não-perturbado..... 57
- 3.1 - Número de tempestades por mês no período de 1981 e 2001..... 70

- 3.2 - Os dados do vento solar observados pelo satélite ISEE-3 para a supertempestade magnética do dia 13 de abril de 1981 são representados acima. Do topo para baixo, vê-se que não há dados para a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, aparecem o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF. O β não apresentou medidas para o período, como se observa no último painel. A linha vertical identifica o choque..... 72
- 3.3 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo BS em relação ao campo total é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , obtido do site (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>), possibilita o cálculo da funções de injeção na corrente de anel $F(E)$. O parâmetro ε não tem seus dados avaliados durante a tempestade, por causa dos gaps em V_p . Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 73
- 3.4 - Do topo à base são apresentados o componente B_z e magnitude B do IMF observadas pelo satélite ISEE-3. Índices geomagnéticos K_p , AE, A_{sy} e Sym (os três últimos são dados em nT). Os índices foram obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e A_{sy}) e do SPIDR (K_p e Dst), mostrando a geofetividade das estruturas que causaram a tempestade muito intensa do dia 13 de abril de 1981..... 75
- 3.5 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 14 de março de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por ultimo, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos durante o período avaliado..... 77
- 3.6 - IMF- B_z , campo elétrico E_y e funções de injeção de energia na corrente de anel e na magnetosfera, dadas, respectivamente, por $F(E)$ e ε , para o evento de 14 de março de 1989. Os gaps nos dados não possibilitaram o cálculo de algumas das funções, como se observa na figura. As linhas verticais localizam a fase principal da tempestade..... 78
- 3.7 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e A_{sy}) e do SPIDR (K_p e Dst) para a supertempestade do dia 14 de março de 1989. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE (em nT), o K_p (em escala logarítmica) e o A_{sy} , o Sym e o Dst (em nT)..... 79

- 3.8 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 21 de outubro de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p e a velocidade, V_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . Os gaps nos dados não possibilitam observarem-se as características dos choques..... 81
- 3.9 - Dados do plasma do vento solar e a resposta na corrente de anel para o evento de 21 de outubro de 1989. Para os dados de plasma, aparecem o IMF- B_z e o campo elétrico interplanetário, E_y . A função de injeção na magnetosfera, representada por ε , não pôde ser calculada durante o período, enquanto que a função de injeção na corrente de anel, $F(E)$, apareceu somente quando E_y foi avaliado através do site do OMNI. No último painel, os índices Dst e Sym mostram o comportamento da corrente de anel durante a tempestade..... 83
- 3.10 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (K_p e Dst) para a supertempestade do dia 21 de outubro de 1989. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices K_p , em escala logarítmica, e Asy, Sym e Dst, dados em nT. O eletrojato auroral, medido através do AE, não foi observado para este período..... 84
- 3.11 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 17 de novembro de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF. No último painel, o beta de plasma, β não foi calculado no período. A linha vertical identifica o choque ocorrido durante o período..... 86
- 3.12 - Dados do plasma do vento solar e a resposta na corrente de anel para o evento de 17 de novembro de 1989. Para os dados de plasma, aparecem o IMF- B_z e o campo elétrico interplanetário, E_y . As funções de injeção na magnetosfera e na corrente de anel, representadas por ε e $F(E)$, não puderam ser avaliadas. No último painel, os índices Dst e Sym mostram o comportamento da corrente de anel durante a tempestade..... 87
- 3.13 - Dados do campo IMF observados pelo IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (K_p e Dst) para a supertempestade do dia 17 de novembro de 1989. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, o índice K_p e os índices AE, Asy e Sym/Dst, (dados em nT). As linhas verticais localizam a fase principal da tempestade..... 88

- 3.14 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo ACE caracterizando a tempestade de 6 de abril de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os três choques ocorridos neste período..... 90
- 3.15 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S do campo total é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 6 de abril de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. A fase principal está localizada entre as linhas verticais..... 92
- 3.16 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a supertempestade do dia 6 de abril de 2000. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 93
- 3.17 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 16 de julho de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por ultimo, o beta de plasma, β . As linhas verticais representam os choques S1 e S2, detectados durante o evento..... 95
- 3.18 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante toda a tempestade de 16 de julho de 2000, por causa dos gaps nos dados do vento solar. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal..... 97

- 3.19 - Dados do campo IMF observados pelo ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a supertempestade do dia 16 de julho de 2000. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT, além do Kp, do Asy e do Sym/Dst também dados em nT. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal..... 98
- 3.20 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 6 de novembro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes Bx, By e Bz do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas na vertical identificam os quatro choques ocorridos durante o evento..... 100
- 3.21 - Além do componente Bz do IMF, a porcentagem do campo B_S aparece na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , aparece somente em alguns períodos por causa dos gaps nos dados de V_p e de Bz. As funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante a fase principal da tempestade de 6 de novembro de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 101
- 3.22 - Dados do campo IMF observados pelo ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a supertempestade do dia 6 de novembro de 2001. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT, além do Kp, do Asy e do Sym/Dst também dados em nT. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 103
- 4.1 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 11 de março de 1998. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes Bx, By e Bz do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o início e o fim da estrutura que se estendeu por aproximadamente cinco dias..... 110

- 4.2 - Além do componente Bz do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 11 de março de 1998. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 112
- 4.3 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos para a tempestade do dia 11 de março de 1998. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais. Os índices AU, AL, AE, Asy e Sym são obtidos a partir do WDC-Kyoto, enquanto o Kp e o Dst, através do SPIDR..... 113
- 4.4 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 22 de setembro de 1999. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p e a velocidade, V_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes Bx, By e Bz do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos neste período, além da estrutura interplanetária que causou a tempestade..... 115
- 4.5 - Além do componente Bz do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 22 de setembro de 1999. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 116
- 4.6 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 22 de setembro de 1999. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 117

- 4.7 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 22 de outubro de 1999. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p e a velocidade, V_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o choque e as estruturas que marcaram o período e que causaram a tempestade..... 119
- 4.8 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 22 de outubro de 1999. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 121
- 4.9 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 22 de outubro de 1999. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 122
- 4.10 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 12 de fevereiro de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p e a velocidade, V_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os três choques ocorridos neste período..... 124
- 4.11 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção de energia na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 12 de fevereiro de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 126

- 4.12 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 12 de fevereiro de 2000. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 127
- 4.13 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 24 de maio de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, Tp e a velocidade, Vp, dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes Bx, By e Bz do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o choque que levou à formação de uma região de bainha, além da estrutura de CIR que também contribuiu para a tempestade..... 129
- 4.14- Além do componente Bz do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, Ey e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por F(E) e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 24 de maio de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade..... 131
- 4.15 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 24 de maio de 2000. De cima para baixo, observa-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, em escala logarítmica, e o Asy, o Sym e o Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 132
- 4.16 - Parâmetros do plasma do vento solar observado pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 11 de agosto de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, Tp e a velocidade, Vp, dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes Bx, By e Bz do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos neste período, além da nuvem magnética, que foi a estrutura que causou a tempestade..... 134

- 4.17 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 11 de agosto de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade..... 136
- 4.18 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 11 de agosto de 2000. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 137
- 4.19 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 28 de outubro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além dos três choques identificados durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade..... 139
- 4.20 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 28 de outubro de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade..... 140
- 4.21 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) para a tempestade do dia 28 de outubro de 2001. De cima para baixo, observa-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais..... 142

4.22 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 24 de novembro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além dos três choques durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.....	145
4.23 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , aparece somente em alguns períodos por causa dos gaps nos dados de V_p e de B_z . As funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não tem seus dados avaliados durante a fase principal da tempestade de 24 de novembro de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.....	146
4.24 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (Kp e Dst) a para a tempestade do dia 24 de novembro de 2001. De cima para baixo, observa-se o IMF- B_z , a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.....	147
5.1 - Número de eventos que apresentaram valores de pico nos índices geomagnéticos e nos dados do meio interplanetário num mesmo intervalo de valores. Os parâmetros que não possuem o mesmo número de eventos não apresentaram medidas durante o período de ocorrência da tempestade.....	150
5.2 - Correlação linear entre os valores de pico dos índices geomagnéticos Ap (e então Kp), Dst e AE que foram apresentados nas Tabelas 3.1 e 4.1, nos Capítulos 3 e 4, respectivamente.....	152
5.3 - Correlação linear dos valores de pico dos parâmetros interplanetários E_y , B_s e a função de acoplamento, ε , com o índice Dst.....	154
5.4 - Comparação entre supertempestades e tempestades magnéticas intensas. Do topo para baixo aparecem as integrais do campo elétrico interplanetário, do parâmetro epsilon, do epsilon com a correção do raio da magnetopausa e do epsilon corrigido pela pressão dinâmica, respectivamente. As integrais são calculadas durante a fase principal de cada tempestade.....	164

- 5.5 - Causas interplanetárias das supertempestades e tempestades magnéticas intensas. Dentre elas, pode-se encontrar principalmente estruturas complexas, em que, na sua maioria, ICMEs interagem com outra estrutura e formam uma estrutura B_S complexa..... 166
- 5.6 - Comparação entre supertempestades magnéticas e tempestades magnéticas intensas com relação às estruturas que causaram os eventos e a quantidade de energia transferida para dentro da magnetosfera através do processo de reconexão magnética. As correções do parâmetro epsilon de acoplamento também aparecem..... 168

LISTA DE TABELAS

2.1 - Magnitudes dos picos das ejeções solares.....	44
3.1 - Eventos de supertempestade magnética selecionados ($Dst < -250$ nT) são mostrados acima. O período no qual os quinze eventos são tomados corresponde aos dois últimos ciclos solares e parte do atual (ciclo 23), ou seja, do ano 1981 até 2001. Além do dia da tempestade, também são mostrados o tempo de duração da fase principal (em horas), os picos dos índices Dst (em nT), do AE (em nT) e do Kp em escala logarítmica.....	68
4.1 - Eventos de Tempestade Magnética Intensa selecionados durante os anos de 1998 a 2001. Além do dia da tempestade, também são mostrados o tempo de duração da fase principal (em horas), os picos dos índices Dst (em nT), do AE (em nT) e do Kp em escala logarítmica.....	108
5.1- Integral do parâmetro epsilon calculada para os eventos de supertempestade magnética durante a fase principal das mesmas e durante o intervalo de tempo em que se observou variações no Dst de 50 e 100 nT. Os dados para as três primeiras tempestades foram obtidos do trabalho de Monreal-MacMahon e Gonzalez (1997).....	156
5.2 - Integral do parâmetro epsilon calculada durante a fase principal das tempestades magnéticas intensas e durante o intervalo de tempo em que se observou variações no Dst de 50 e 100 nT.....	157
5.3 - Energia transferida para a corrente de anel, calculada através da relação DPS para as supertempestades e tempestades magnéticas intensas.....	158
5.4 - Cálculo das integrais do epsilon de Perreault e Akasofu (1978) e das integrais das correções desta função de acoplamento durante eventos de supertempestade. Para as três primeiras tempestades, os dados foram obtidos de Monreal-MacMahon e Gonzalez (1997).....	162
5.5 - Cálculo das integrais do epsilon de Perreault e Akasofu (1978) e das integrais das correções desta função de acoplamento durante eventos de tempestade magnética intensa.....	163

LISTA DE SÍMBOLOS

B_s	-	Componente sul do campo magnético interplanetário
B_x	-	Componente na direção-x do campo magnético interplanetário (GSM)
B_y	-	Componente na direção-y do campo magnético interplanetário (GSM)
B_z	-	Componente na direção-z do campo magnético interplanetário (GSM)
B	-	Magnitude do campo magnético interplanetário
v	-	Velocidade do vento solar
K_p	-	Índice geomagnético de médias latitudes
A_p		Índice K_p numa escala linear
AE	-	Índice que mede o eletrojato auroral
AU	-	Auroral Upper
AL	-	Auroral Lower
Dst	-	Disturbance Storm Time Index
Dst^*	-	Índice Dst corrigido
Sym	-	Índice Simétrico – equivalente ao índice Dst , tomado em minutos
Asy	-	Índice Assimétrico
H	-	Componente horizontal do campo geomagnético
J	-	Densidade de corrente
E	-	Campo elétrico interplanetário
E_x	-	Componente de E na direção-x
E_y	-	Componente de E na direção-y
E_z	-	Componente de E na direção-z

A	-	Área efetiva
$F(E)$	-	Função de injeção
$L1$	-	Ponto Lagrangeano interno 1
R_m	-	Número de Reynolds Magnético
N_p	-	Densidade dos prótons
T_p	-	Temperatura dos prótons
V_p	-	Velocidade dos prótons
B_0	-	Campo magnético medido na superfície da Terra
B_E	-	Campo magnético no equador terrestre
W_m	-	Energia total do dipolo magnético da Terra
W	-	Energia cinética das partículas
W_ϵ	-	Energia transferida do vento solar para a magnetosfera interna
W_{ϵ^*}	-	Energia transferida do vento solar para a magnetosfera considerando a correção do raio da magnetopausa
$W_{\epsilon^{**}}$	-	Energia transferida do vento solar para a magnetosfera considerando a eficiência da pressão na ocorrência da reconexão magnética
W_{mag}	-	Energia total do dipolo magnético
W_{part}	-	Energia total das partículas que constituem a corrente de anel
t_0	-	Início da fase principal
t_1	-	Fim da fase principal
U_{VS}	-	Fluxo de energia do vento solar
$U(t)$	-	Taxa de entrada de energia
$E(t)$	-	Energia total

R_c	-	Raio da magnetopausa
R_{cf}	-	Raio corrigido da magnetopausa considerando-se a pressão
F_{ext}	-	Força externa de origem não-eletromagnética
P_{VS}	-	Pressão dinâmica do vento solar
\hat{r}_c	-	Raio unitário na direção radial
r	-	Distância em relação ao centro da Terra dada em raios terrestres
v_{GC}		Velocidade de gradiente e de curvatura das partículas
ΔB^q	-	Perturbação magnética devido à carga q
θ	-	Ângulo azimutal
β	-	Beta de plasma
σ	-	Condutividade Elétrica
η	-	Viscosidade magnética
ρ	-	Densidade de massa do vento solar
μ	-	Permissividade magnética do meio
τ	-	Tempo de “vida” das partículas na corrente de anel
τ_D	-	Tempo de deriva das partículas na corrente de anel
ε	-	Parâmetro epsilon de acoplamento
ε^*	-	Parâmetro epsilon corrigido pelo raio da magnetopausa diurna
ε^{**}	-	Parâmetro epsilon corrigido pela pressão dinâmica do vento solar e pelo raio da magnetopausa
ϕ	-	Ângulo longitudinal
$\hat{\varphi}$	-	Direção azimutal

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACE	-	<i>Advance Composition Explorer</i>
AE	-	<i>Auroral Eletroject</i>
CIR	-	<i>Corotating Interaction Regions</i>
CME	-	<i>Coronal Mass Ejection</i>
DPS	-	<i>Dessler-Parker-Sckopke</i>
EIT	-	<i>Extreme Ultraviolet Imaging Telescope</i>
GSE	-	<i>Geocentric Solar Eliptic</i>
GSM	-	<i>Geocentric Solar Magnetospheric</i>
ICME	-	<i>Interplanetary Coronal Mass Ejection</i>
IMF	-	<i>Interplanetary Magnetic Field</i>
IS	-	Impulso Súbito
IMP-8	-	<i>Interplanetary Monitoring Platform</i>
ISEE-3	-	<i>International Sun-Earth Explorer</i>
LASCO	-	<i>Large Angle and Spectrometric Coronagraph</i>
MAG	-	<i>Magnetic Field Experiment</i>
MC	-	<i>Magnetic Cloud</i>
NOAA	-	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PES	-	Partículas energéticas de origem solar
RA	-	Região Ativa
SOHO	-	<i>Solar & Heliospheric Observatory</i>
SSC	-	<i>Storm Sudden Commencemnt</i>

SWEPAM - *Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*

UA - *Unidade Astronômica*

UT - *Universal Time*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um dos mais antigos aspectos dos estudos do geomagnetismo é a relação existente entre a atividade magnética e a solar. As tempestades magnéticas consistem nas principais manifestações da relação existente entre estas duas atividades e se caracterizam por mudanças no componente- H do campo geomagnético, que varia de uma fase da tempestade para a outra. Geralmente são três as fases que caracterizam uma tempestade: uma fase inicial, onde o componente- H cresce para valores positivos acima de dezenas de nanoteslas (nT), uma fase principal, que é caracterizada por centenas de nT com valores negativos e uma fase de recuperação, onde o campo gradualmente retorna para o seu valor original (Gonzalez et al., 1994; Tsurutani e Gonzalez, 1998).

Muitos modelos foram desenvolvidos a fim de determinar os parâmetros de acoplamento vento solar-magnetosfera que melhor caracterizassem os eventos de tempestade magnética. O tempo de ocorrência do processo de reconexão no lado diurno, responsável pela injeção de partículas e, portanto, de energia para dentro da magnetosfera, também foi determinado como tendo uma duração superior a três horas. Além disso, a magnitude do campo elétrico interplanetário, vB_z , deve ser no mínimo 5 mV/m, correspondendo a um campo magnético B_z de intensidade menor ou igual a -10 nT. Isto caracteriza os eventos de tempestade magnética intensa ($Dst < -100$ nT) (Gonzalez et al., 1987). O campo elétrico interplanetário, vB_z , é o campo elétrico de convecção responsável pelo processo de fusão das linhas dos campos interplanetário e geomagnético, ou seja, é ele quem controla a entrada de energia na magnetosfera, e, como é 'mapeado' para dentro da cavidade magnetosférica acaba sendo responsável pela ocorrência e duração das tempestades magnéticas. E_y está associado à reconexão entre o IMF- B_s e o campo geomagnético na magnetopausa diurna. E_y é responsável pela convecção de plasma magnetosférico no sentido anti-solar em altas latitudes e no sentido Sol-Terra em baixas latitudes.

Quando se observam perturbações no meio interplanetário, seja através da emissão de partículas ou de radiação solar, os equipamentos a bordo dos satélites são afetados com a geração de correntes induzidas e saturação dos sensores dos equipamentos. Com isso, muitas vezes, os dados não ficam disponibilizados durante este período. Alguns dos efeitos mais dramáticos para os seres humanos ocorrem devido às partículas de alta energia que são aceleradas durante a ocorrência das explosões solares (em inglês, *flares*). Nestas situações, apesar da atmosfera e do campo magnético terrestre servirem como escudos, muitas partículas conseguem penetrar, e dependendo do evento, podem causar sérios danos à vida e aos equipamentos terrestres, como redes elétricas e oleodutos. Os registros de eventos antigos e os mais recentes mostraram que a vida humana é muito vulnerável às perturbações Terra-Sol. Quem mais sofre durante a ocorrência de fenômenos de alta energia são os astronautas, que, totalmente desprotegidos, podem ser afetados com uma quantidade letal de radiação. Há ainda muito que se explorar neste sentido, mesmo que já tenha se avançado consideravelmente em termos do entendimento e da prevenção.

O clima espacial envolve uma série de eventos complexos que se originam do interior do Sol e que prolongam seus efeitos através do vento solar, atingindo todo o sistema solar. Eventos com maior intensidade podem causar maiores perturbações, como o deslocamento de satélites, a observação de auroras e até mesmo a danificação de redes de energia elétrica.

1.1 Estrutura da Dissertação

Como objetivo de localizar os leitores ao trabalho que foi desenvolvido, segue um esboço dos principais assuntos a serem tratados em cada capítulo. A busca pela compreensão do ambiente e das ferramentas necessárias e que serão utilizadas na execução dos cálculos e da análise observacional é alcançada no decorrer dos capítulos do trabalho. Foi necessário certo tempo de reflexão e observação para organizar cronologicamente os assuntos aqui tratados e tornar o texto mais compreensível. A seqüência a seguir, em resumo, representa a organização dos cinco (5) capítulos nos quais foi dividido o trabalho:

- *CAPÍTULO 2 - CARACTERÍSTICAS INTERPLANETÁRIAS E TEMPESTADES MAGNÉTICAS*: Este capítulo introduz o leitor ao ambiente que está sendo considerado para análise dos fenômenos que são foco do estudo, e tornar possível a compreensão, mesmo que básica, da morfologia das principais estruturas interplanetárias envolvidas na ocorrência dos eventos. Além disso, a física magnetosférica possui processos de perda de energia, e, desta forma, é necessário um estudo da quantidade total envolvida e a sua conseqüente dissipação devido à conservação da energia (*Stern*, 1984). No mesmo capítulo, segue a descrição das principais funções de energia, envolvendo desde a energia que é carregada pelas partículas que constituem o vento solar, até a energia que é perdida na magnetosfera, na região da corrente de anel.
- *CAPÍTULO 3 - SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS*: Neste capítulo, segue uma descrição das principais características observadas para os eventos de supertempestade magnética ($Dst < -250$ nT) durante o período de 1981 a 2001. Foram quinze (15) eventos observados, e os dados do campo magnético interplanetário e principalmente do plasma do vento solar muitas vezes não puderam ser observados durante a ocorrência das tempestades. Muitas das informações que se tem sobre os eventos antes de 1998 foram encontradas em bibliografias pré-existentes. Como o período de observação da maioria dos eventos de supertempestade corresponde à época de poucos recursos em termos das observações espaciais (plasma e campo magnético), a estimativa da energia para estes eventos ficou comprometida. Para cada tempestade, procura-se identificar a possível estrutura associada, assim como os efeitos magnetosféricos que foram registrados. Os índices Sym, Dst e Asy são observados, com clareza, em todas elas, e, a partir das medidas, pode-se ter uma idéia da evolução da corrente de anel, principalmente durante a fase principal. A energia envolvida na dinâmica magnetosférica nem sempre pôde ser medida por causa da intensidade dos eventos e da saturação dos equipamentos.
- *CAPÍTULO 4 – TEMPESTADES MAGNÉTICAS INTENSAS*: Aqui, usando-se a mesma forma de descrição das supertempestades magnéticas, tenta-se listar as

principais características das tempestades magnéticas intensas ($-250 < Dst < -100$ nT). A idéia aqui envolve a determinação da possível explosão solar associada ao evento até a resposta nos índices geomagnéticos observados. Também foram selecionados quinze (15) eventos, só que estes foram tomados durante os anos de 1998 a 2001, período em que os dados do satélite ACE estão disponíveis. Para aqueles eventos em que a origem solar não pode ser observada a partir das imagens da espaçonave SOHO, o método empírico de *Dal Lago et al.* (2004a) foi usado para prever as possíveis explosões solares que estavam associadas às tempestades.

- *CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES*: Segue a estimativa de energia dos eventos de supertempestade e de tempestade magnética selecionados no período de 1981 a 2001. Uma nova estimativa do epsilon é sugerida neste capítulo, por causa da grande diferença que aparece no balanço da energia. Muitos casos, que serão vistos na seqüência do trabalho, mostram que a dissipação da energia, apenas na região da corrente de anel, superou a energia que entrou a partir da reconexão na magnetopausa diurna.
- *CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS*: Finalmente, aqui, pretende-se expor os resultados do trabalho e ao mesmo tempo direcionar os próximos estudos que podem ser explorados.

CAPÍTULO 2

CAUSAS INTERPLANETÁRIAS E TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Neste capítulo é feita a descrição do cenário que engloba algumas das mais importantes regiões por onde o vento solar se propaga até chegar à Terra. A partir da injeção do plasma para dentro da cavidade magnetosférica, este desloca-se rumo às mais variadas partes da magnetosfera interna. Nesta trajetória, grande parte da energia vai sendo dissipada das mais diversas formas, e por fim, o equilíbrio da energia é restaurado até que uma nova injeção torne a modificar a estrutura e a composição das regiões magnetosféricas.

As equações que estimam a taxa de injeção de energia do vento solar que é depois depositada na cauda magnética, assim como a taxa de injeção na corrente de anel equatorial, são apresentadas neste capítulo. Considerando-se a fase principal da tempestade magnética como o período de maior importância devido às quantidades que estão envolvidas, toma-se este intervalo de tempo como os limites de integração. A partir daí, obtém-se as energias, em Joules.

É importante notar que o sistema de coordenadas adotado aqui é o GSM (do inglês *Geocentric Solar Magnetospheric*). Este sistema de coordenadas considera que a direção-x está sobre a linha Terra-Sol com o lado positivo apontando para o Sol. A direção-z é perpendicular a x e é paralela à projeção do eixo do dipolo em um plano perpendicular ao eixo-x, enquanto que o eixo-y aponta para o lado do anoitecer (*dusk*) completando, através da regra da mão direita, os três eixos ortogonais. Principalmente o IMF é tomado neste sistema a fim de se estudar a sua geofetividade por causa da orientação relativa entre o IMF e o campo geomagnético, que é o fator que controla o acoplamento entre magnetosfera e vento solar.

2.1 Vento Solar

O espaço próximo à Terra, juntamente com o campo geomagnético, funciona como um grande laboratório de estudos do plasma interplanetário e do próprio plasma

magnetosférico. É através dos movimentos das partículas sob a ação do campo magnético que se pode ter uma idéia da intensidade e da concentração do fluxo destas partículas que chegam até a Terra. O vento solar é emitido radialmente pelo Sol e arrasta consigo o campo magnético solar. Devido à rotação do Sol é que temos o efeito *garden-house*, que dá o formato em espiral Arquimedeano para o fluxo do vento solar. A órbita da Terra é tal que o eixo de rotação da Terra tem uma inclinação de $\sim 23^\circ$ com o plano da órbita. Além disso, temos a inclinação em torno de 5° do eixo de rotação solar com relação ao eixo magnético solar.

O fenômeno que é responsável pela expansão contínua do vento solar é o desequilíbrio hidrostático da coroa solar (*Parks, 1991*), ou seja, a alta temperatura da coroa solar e a pressão muito maior encontradas na atmosfera solar do que as do meio interestelar fazem com que o gás ionizado se expanda para o meio interplanetário através das linhas abertas do campo magnético solar (*Hundhausen et al., 1972*). Boa parte do vento solar tem origem nas linhas de campo abertas que saem dos buracos coronais, que são regiões localizadas principalmente nos pólos solares, ou seja, em altas latitudes, durante o máximo da atividade solar, e, já na fase de queda da atividade, em direção ao mínimo, deslocam-se para as regiões de baixa latitude, próximas do equador solar.

A primeira evidência da existência do vento solar data de 1951, quando Biermann, através de observações da cauda de um cometa, percebeu que uma segunda cauda mais tênue se formava radialmente ao Sol. O que se via era que a poeira cometária estava na direção anti-solar, ou seja, tornava-se clara a existência de um fluxo de gás ionizado originado no Sol que causava esta variação (*Goldstein, 1998*). A 1UA¹ (Unidade Astronômica), o vento solar tem uma velocidade característica de ~ 400 km/s – que pode ser bem maior durante a fase ativa do Sol - e uma densidade de ~ 7 partículas/cm³, consistindo de elétrons e prótons de alta temperatura, com uma fração menor ($\sim 4\%$) de íons de He⁺⁺ (*Tsurutani e Gonzalez, 1998*).

¹ Unidade Astronômica (UA) é a distância entre a Terra e o Sol, que equivale a aproximadamente $1,5 \times 10^8$ km.

2.2 Teorema do Congelamento do Plasma ao Campo Magnético

A Figura 2.1 mostra que, juntamente com o plasma que flui da atmosfera solar a partir das linhas abertas do campo magnético do Sol, localizadas em altas latitudes, parte deste campo magnético é arrastada pelo fluxo de partículas, passando a ser denominada de campo magnético interplanetário (IMF, do inglês *Interplanetary Magnetic Field*). A rotação em forma de espiral que aparece na figura é a trajetória descrita pelo vento solar devido à rotação do Sol. Considerando-se que este fluido obedece à Lei de Ohm, segue, de *Bittencourt* (2003) que, ao tomarmos o rotacional em ambos os lados desta lei, tem-se:

$$\nabla \times \vec{J} = \sigma \left[\nabla \times \vec{E} + \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) \right], \quad (2.1)$$

onde \vec{J} é a densidade de corrente associada às partículas, que se movem com velocidade \vec{v} , \vec{u} é a velocidade do fluido ($\vec{u} = \langle \vec{v} \rangle$) em um meio onde existem campos elétrico e magnético, \vec{E} e \vec{B} . Desde que as duas leis de Maxwell $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ e $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ são consideradas, segue que, ao substituir-se na Equação 2.1:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \mu_0 \sigma \left[-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) \right]. \quad (2.2)$$

Usando-se o fato da não-existência de mono pólos magnéticos, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, o lado esquerdo da Equação 2.2 fica:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = -\nabla^2 \vec{B}, \quad (2.3)$$

ou seja, das Equações 2.2 e 2.3, segue que:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}, \quad (2.4)$$

denominada de Equação de Indução, onde $\eta = 1/(\mu_0 \sigma)$ é o termo de viscosidade magnética.

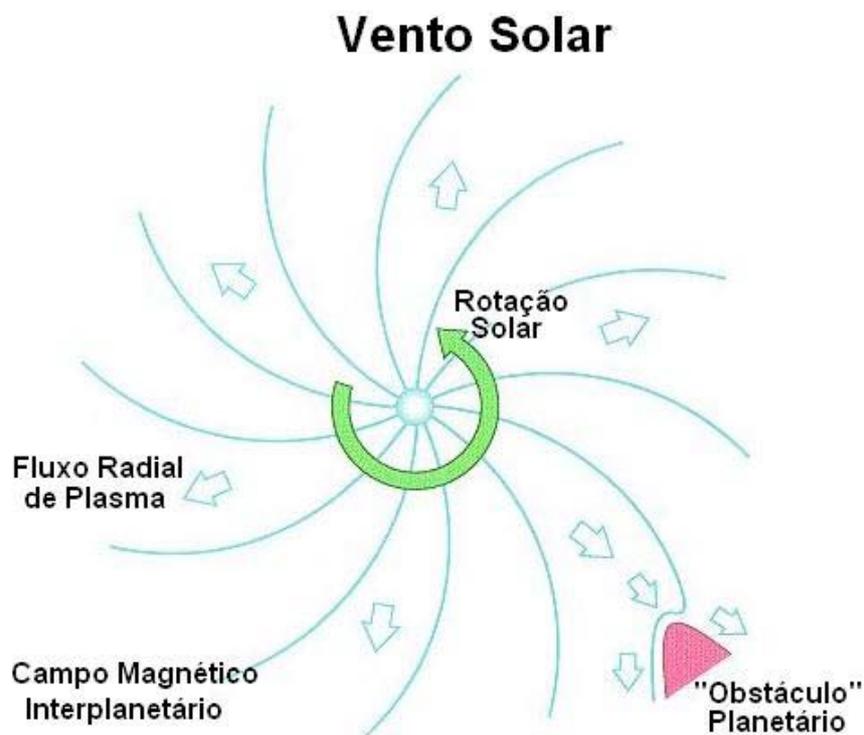


FIGURA 2.1 - Representação do fluxo do vento solar a partir do Sol. Nota-se que o formato em espiral de Arquimedes é porque o fluxo acompanha a rotação do Sol. Parte do campo magnético é arrastada com o vento solar, devido ao Teorema do Congelamento do Campo, passando a constituir o que se conhece por campo magnético interplanetário. No detalhe, o encontro com um “obstáculo” interplanetário quebrando a condição do congelamento.

FONTE: Adaptada de

(<http://www.igpp.ucla.edu/mpg/lectures/mkivelson/faculty97/12solarwind.jpg>).

O primeiro termo no lado direito da Equação 2.4 representa o termo de fluxo, ou seja, de que forma a presença do fluido influencia na convecção (variação espacial do campo magnético devido ao movimento de convecção do fluido), enquanto que o segundo termo é chamado de termo de difusão magnética, que corresponde à difusão das linhas de campo na direção oposta aos gradientes de \vec{B} . Isto acontece de forma a reduzir estes gradientes, ou seja, as densidades de corrente, fazendo com que não haja nenhum acoplamento entre os fluxos de plasma e de campo. E é a partir da análise dimensional de ambos os termos, o de difusão e o de convecção, e da razão entre eles que se pode deduzir a equação do número de *Reynolds*, dada por:

$$R_m = \frac{\mu L}{\eta}, \quad (2.5)$$

onde L é a distância radial do centro da Terra até onde a linha de campo corta o plano do equador geomagnético, no caso de um campo dipolar ideal. O número de *Reynolds* magnético dá uma idéia da predominância de um dos termos da Equação da Indução (Equação 2.4) sobre o outro termo, e é utilizado na resolução de muitos problemas magnetohidrodinâmicos. Quando $R_m \ll 1$, o termo de difusão é quem domina, e a Equação 2.4 é reduzida em um termo apenas, ou seja, o campo magnético passa a variar dentro de um condutor, $\partial \vec{B} / \partial t = \eta \nabla^2 \vec{B}$.

Já no caso em que o número de *Reynolds* é bem maior que a unidade, ou seja, ocorre um efeito totalmente diferente. A Equação 2.4 reduz-se somente ao termo de fluxo, $\partial \vec{B} / \partial t = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B})$, ou seja, a alta condutividade do plasma faz com que o campo magnético se mova exatamente ao longo da direção do fluido (*Bittencourt*, 2003).

Esta última situação descrita é a chamada condição do teorema do congelamento do campo ao fluxo de plasma (*Frozen-in-Field*): as partículas, principalmente elétrons e prótons altamente energéticos, mantêm-se congeladas ao campo. Isto segue como uma consequência da propriedade do plasma, que se comporta como um condutor perfeito, com $\sigma = \infty$ (*Cowley*, 1998). A partir daí, $\eta \rightarrow 0$ e da lei de Ohm, tem-se:

$$\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B} = 0, \quad (2.6)$$

que é a expressão do único campo elétrico que pode ser formado neste meio, o campo elétrico de convecção (*Parks*, 1991).

2.3 Características Interplanetárias

O Sol é a principal fonte de estruturas que levam à ocorrência dos fenômenos magnetosféricos, pois dele continuamente flui o vento solar, que varia em velocidade e carga congelada com ele o IMF com diferentes intensidades e direções. Muitas vezes, regiões extremamente complexas formadas a partir da interação entre o vento solar rápido e o vento solar lento, fazem com que o plasma e o campo magnético sejam comprimidos. A direção e a intensidade do IMF e o grau de distorção e compressão nas regiões de interação é que determinam a ocorrência e a intensidade das tempestades magnéticas. Tais fenômenos são as principais manifestações da força do vento solar na dinâmica da magnetosfera, que responde de diferentes formas, variando conforme a intensidade das estruturas interplanetárias que estão chegando.

As causas primárias das tempestades magnéticas na Terra são campos elétricos intensos de direção amanhecer-anoitecer (*dawn-dusk*) associados com a passagem pela Terra dos IMFs com um componente B_z para o sul (B_S) por intervalos de tempo suficientemente grandes. O campo elétrico é composto por dois fatores: a velocidade do vento solar, \vec{u} , e o IMF. Empiricamente, foi mostrado (*Gonzalez and Tsurutani*, 1987) que tempestades magnéticas intensas com índice $Dst < -100$ nT, são causadas quando $B_S \geq 10$ nT por um intervalo superior a três horas. Tais campos magnéticos altos são consideravelmente maiores que as magnitudes típicas encontradas para este campo no período calmo, em torno de 5 nT. O campo elétrico torna-se importante quando a pressão dinâmica do vento solar muda. Considerando-se que a pressão depende da densidade do vento solar, ρ , tem-se que ela também desempenha um papel importante na intensificação da corrente de anel.

As estruturas interplanetárias que mais aparecem associadas à ocorrência das tempestades magnéticas são as ejeções de massa coronal (CMEs, do inglês *Coronal Mass Ejections*), ou ejeções de massa coronal interplanetárias (ICMEs, do inglês *Interplanetary Coronal Mass Ejections*) e os choques interplanetários, que resultam da interação entre os feixes de plasma de velocidades diferentes. CMEs são emissões de plasma do Sol que podem ter velocidades altas o suficiente para causar choques interplanetários que comprimem o IMF (*Gosling et al.*, 1991). Uma subclasse das CMEs são as estruturas bem organizadas chamadas nuvens magnéticas, que são definidas por intensidade do campo magnético crescente, uma grande e lenta rotação do vetor campo magnético sobre o período de 1 dia, à distância de 1 UA. Além disso, o beta de plasma² e a temperatura dos prótons são baixos - o beta de plasma assume valores menores que a unidade e maiores que 0 (*Burlaga et al.*, 1981; *Klein e Burlaga*, 1982; *Tsurutani et al.*, 1988; *Burlaga*, 1995).

As CMES podem, muitas vezes, estar associadas com a ocorrência de explosões solares (*flares*³) (*Kahler*, 1992). Antes disso, pensava-se que eram os *flares* solares que desencadeavam as CMES, e, portanto, as tempestades magnéticas. Foi demonstrado em vários estudos a relação existente entre CMEs do tipo halo parcial e total, explosões solares e dados interplanetários *in situ* que são os parâmetros do plasma e do campo magnético da CME, que determinam se a interação com a magnetosfera terrestre resulta em uma tempestade (e.g. *Gosling*, 1991; *Webb et al.*, 2000; *Cane e Richardson*, 2003). Os *flares* solares são classificados de acordo com a intensidade do brilho da emissão em raios-X no comprimento de onda de 0.1 a 0.8 nm. As categorias dos *flares* e os intervalos de pico em que eles variam são mostrados na Tabela 2.1. Para as categorias B, C e M tem-se nove subdivisões de 1 a 9. Os prováveis *flares* associados às CMEs, que causaram as tempestades que serão estudadas na seqüência, têm seus dados

² Beta de plasma (β) é a razão entre a pressão dinâmica do vento solar e a pressão magnética. Dá uma idéia de qual dos dois parâmetros está dominando: se é o vento solar com suas partículas ou se o campo magnético. Quando esta razão é muito menor que a unidade, diz-se que o plasma domina sobre o campo magnético, e quando é maior ou igual à unidade, diz-se que o campo magnético é quem domina.

³ A explosão solar (*flare*) é definida como uma variação em intensidade repentina, rápida e intensa, que ocorre quando se libera energia magnética na atmosfera solar. É um sistema complexo que envolve a relaxação do campo magnético e a liberação e radiação de energia (*Sawyer et al.*, 1986)

avaliados durante todo o período de análise através do site do NGDC (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ftpsolarflares.html>) do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

TABELA 2.1 - Magnitudes dos picos das explosões solares.

Classe	Pico (W/m^2)
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} < I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} < I < 10^{-4}$
X	$I > 10^{-4}$

FONTE: Adaptada de *Huttunen* (2005).

Em grande parte dos eventos, percebe-se que as regiões da bainha, que são o espaço entre a frente de choque e a estrutura interplanetária, são muito mais geofetivas que as nuvens magnéticas. Ou seja, a energia dissipada para dentro da magnetosfera durante eventos de nuvem magnética é menor que aquela envolvida nos eventos de regiões de bainha. A região da bainha é caracterizada por possuir uma densidade de prótons e um beta de plasma elevados. Nesta região, o plasma é aquecido devido à compressão e o acúmulo de linhas de campo em torno de um objeto. A alta flutuação do campo observada nestas regiões deve-se às flutuações Alfvénicas comprimidas, que, por fim, levam à injeção de plasma na cauda magnética (*Huttunen*, 2005).

Há numerosos mecanismos que levam a campos B_S na bainha, mas dois dos mais importantes são as compressões do plasma e do campo magnético causada por choques e o acúmulo de linhas de campo à frente de uma ejeção. O acúmulo das linhas de campo indica um aumento na intensidade deste campo e, conseqüentemente, um aumento da pressão magnética, levando a um beta de plasma bem baixo (*Gonzalez et al.*, 1999). A intensidade do campo magnético e a sua projeção na direção norte-sul dependem das propriedades do choque, tais como direção e número de Mach⁴. Normalmente, há uma

⁴ Número de Mach (M) é o resultado da razão entre a velocidade de um objeto e a velocidade do som no meio em que este objeto está se deslocando.

grande quantidade de energia injetada na magnetosfera quando campos magnéticos intensos na bainha tornam-se sul e permanecem nesta direção por mais de três horas.

Outro tipo de estrutura, que está associada à ocorrência de tempestades intensas são as CIRs (do inglês *Corotating Interactions Regions*). Estas regiões são o resultado da interação do vento solar lento e dos feixes rápidos, que se originam principalmente nas altas latitudes solares, mais especificamente, nos buracos coronais. Os buracos coronais são regiões da superfície solar caracterizadas por possuírem linhas de campo abertas que não oferecem resistência ao fluxo do vento solar e, por isso, são fonte de feixes rápidos.

A Figura 2.2 mostra quando um feixe rápido vai ao encontro do vento solar lento – o vento solar lento acompanha a rotação do Sol, fazendo com que o fluxo ganhe a forma de uma espiral – e uma região de compressão é formada entre os dois fluxos de topologias de campo e de velocidades diferentes. Tal região é responsável pela aceleração do fluxo à frente desta interface de interação e desaceleração do fluxo atrás da interface. As CIRs são normalmente caracterizadas por campos magnéticos intensos e elevados valores da densidade e pressão. Sua presença é sempre observada à frente de feixes corrotantes, sendo que aparecem também associadas com ejeções transientes e choques (e.g., *Tsurutani et al.*, 1997; *Gonzalez et al.*, 2002).

Os eventos complexos, em que mais de uma estrutura interplanetária estão envolvidas, são os mais comuns, principalmente para a ocorrência de supertempestades. Estes eventos tornam-se importantes porque muitas vezes o choque causado pela chegada das outras estruturas intensifica a estrutura B_S pré-existente, levando-a a atingir valores negativos ainda maiores. *Burlaga et al.* (2001) analisaram feixes rápidos a partir dos dados do satélite ACE e descobriram que era possível distinguir claramente a topologia de nuvens magnéticas e eventos complexos. *Fenrich e Luhman* (1998), analisando 29 eventos de nuvem magnética encontraram que a compressão da cauda da parte de trás da nuvem estava associada com feixes rápidos que ocorreram em aproximadamente 40-50% de todos os casos de nuvens. *Gonzalez et al* (2002) sugeriram que estes feixes poderiam estar associados com diferentes origens, sendo que os feixes corrotantes eram os mais observados. *Cargill et al.* (1996) mostrou, usando modelos

magnetohidrodinâmicos, que a compressão na parte de trás da nuvem poderia ser resultado da interação de um vórtice formado atrás da nuvem.

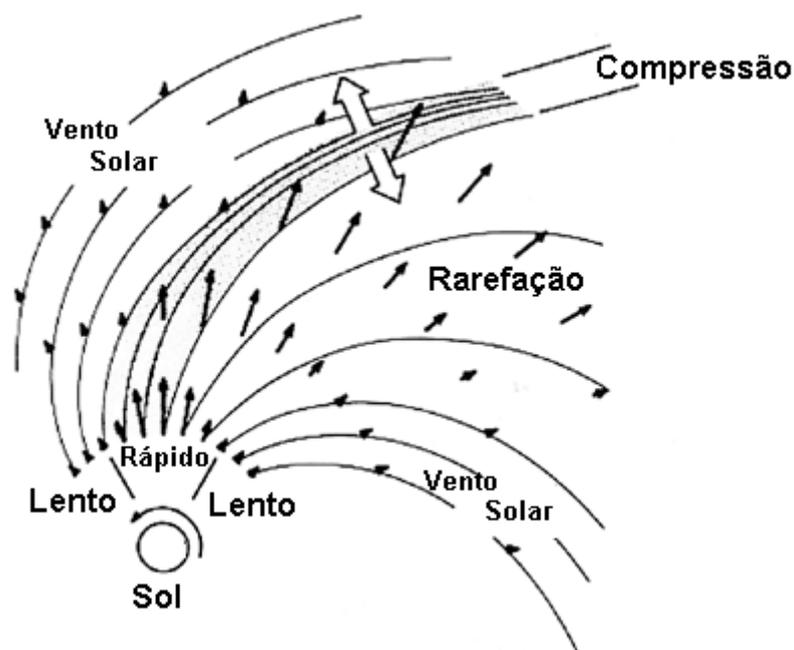


FIGURA 2.2 – Representação de uma região de interação co-rotante (CIR). O vento solar rápido alcança o vento solar ambiente que se move na direção radial, acompanhando o movimento de rotação. Com isso, duas regiões são formadas: uma região de rarefação e uma região de compressão, devido às topologias de campo diferentes. O plasma é comprimido para onde as linhas de campo convergem.

FONTE: Adaptada de *Pizzo et al.* (1978).

2.4 Interação Vento Solar-Magnetosfera

Por possuir uma velocidade supersônica (~400 km/s), o vento solar, ao aproximar-se da Terra, encontra um obstáculo em seu percurso, o campo geomagnético, produzindo uma onda de choque (*bow shock*) em frente à magnetosfera. Esta região representa um equilíbrio de pressão entre as estruturas do vento solar e da magnetosfera e também a fronteira da região magnetosférica, que normalmente fica localizada a uma distância,

medida em raios terrestres (R_E)⁵, de 14-16 R_E . Como a definição anterior já disse, se é necessário equilíbrio, percebe-se a dependência clara da velocidade do vento solar. Já a frente de choque, que aparece no formato de um arco na Figura 2.3, em tom mais claro que o resto da representação artística, é o resultado da propagação de um fluido cuja velocidade é bem maior que a velocidade característica do meio e, por este motivo, causa uma determinada turbulência no meio interplanetário. Esta estrutura representa bem o que o vento solar causa no meio interplanetário por causa da sua velocidade supersônica. Logo atrás da onda de choque, ainda fora da magnetosfera, uma região denominada de bainha é formada, caracterizada por uma alta temperatura e densidade dos prótons, além do IMF cuja direção muda irregularmente.

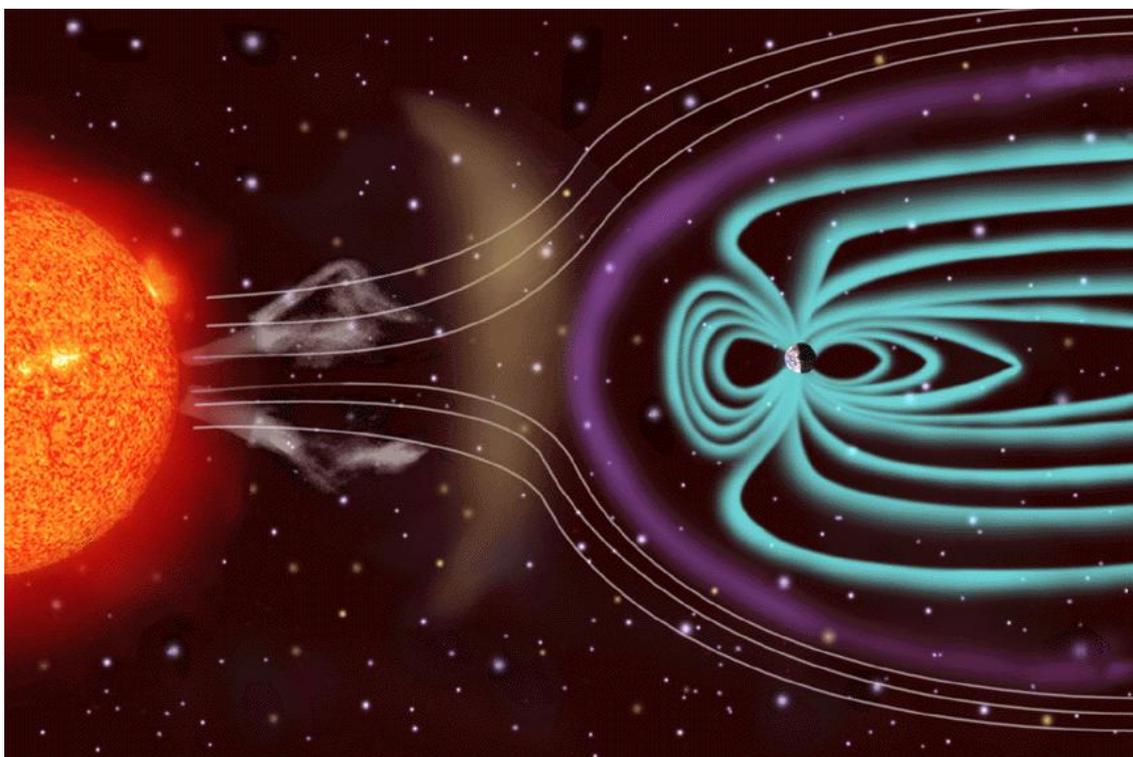


FIGURA 2.3 - Representação artística da interação vento solar-magnetosfera, levando à formação de uma cavidade no meio interplanetário, a magnetosfera. Pode-se ver a frente de choque que se forma logo à frente, assim que o vento solar encontra um obstáculo magnetizado.

FONTE: (<http://faculty.rmwc.edu/tmichalik/images/solarwind.jpg>).

⁵ $1R_E$ equivale a um raio terrestre e mede aproximadamente 6.350 km.

A direção do IMF, juntamente com a velocidade do vento solar, é um dos fatores controladores da entrada de energia na magnetosfera, que é responsável pela ocorrência de tempestades e subtempestades magnéticas. Quando o IMF tem a mesma direção ao campo geomagnético, na fronteira entre os dois, pouco plasma ou energia do vento solar entra na magnetosfera. Por outro lado, quando os dois campos têm direções opostas, segue uma fusão magnética destes campos, e a energia e o plasma passam através da fronteira. Tal fenômeno é denominado de reconexão magnética (*Dungey, 1961; Gonzalez et al., 1994; Kamide et al., 1998a*). A Figura 2.4 é uma representação artística do fenômeno. Durante a ocorrência da reconexão magnética, a condição do teorema do congelamento do plasma ao campo magnético é violada e, com isso, os termos dissipativos, como a resistividade, que normalmente são desconsiderados nos sistemas de grande escala (plasma do vento solar) tornam-se localmente dominantes e produzem grandes mudanças no fluxo e na topologia do campo magnético (*Lakhina, 2000*).

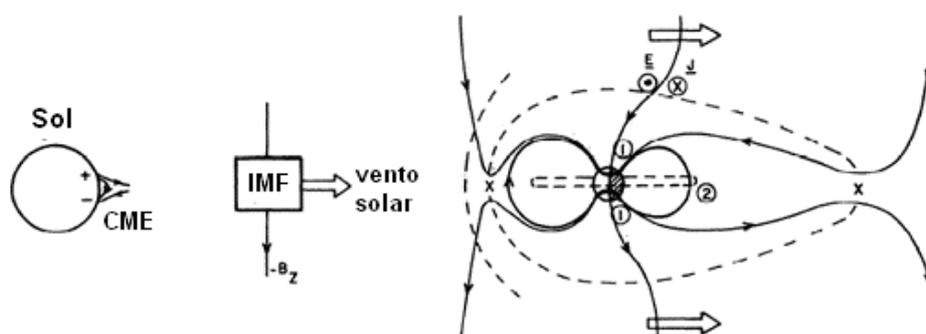


FIGURA 2.4 - Representação da interação entre o vento solar e a magnetosfera. No Sol, uma ejeção de massa coronal é ejetada para o meio interplanetário e o campo magnético interplanetário aparece com direção sul. Na magnetosfera, pode-se observar a linha-X, vista no corte vertical. E representa o campo elétrico interplanetário, que é mapeado para dentro da magnetosfera e J é a corrente da magnetopausa. Os números 1 e 2 representam, respectivamente, as dissipações na região auroral e na corrente de anel.

FONTE: Adaptada de *Gonzalez et al. (1994)*.

A reconexão entre as linhas de campos magnéticos é um processo no qual os fluxos de plasma atravessam uma superfície que separa dois tipos de campos magnéticos topologicamente diferentes. A topologia do campo magnético é mudada à medida que as linhas são reconectadas e devido a uma força de tensão magnética a energia magnética passa a ser transferida para o interior da magnetosfera na forma de energia cinética. Parte do fluido entra na magnetosfera, e boa parte dele é desviada para as laterais, sem entrar. Tal processo requer a existência de um campo elétrico ao longo da linha-X, que é o resultado da intersecção entre duas superfícies que separam os dois diferentes tipos de plasma (*Lakhina, 2000*).

2.5 A Estrutura da Magnetosfera

O campo magnético da Terra atua como um escudo para a forte pressão exercida pelo vento solar. Apesar de não se ter certeza sobre a verdadeira origem deste campo, as teorias mais recentes dizem que sua natureza deve-se às correntes elétricas que fluem no núcleo metálico fundido do planeta, que tem uma extensão radial de aproximadamente metade do raio terrestre. Tais correntes são atribuídas ao mecanismo de dínamo que opera dentro do núcleo planetário, segundo *Papagiannis (1972)*.

A magnetosfera é a região onde os processos físicos são dominados pelo campo magnético da Terra. A Figura 2.5 apresenta algumas das regiões mais importantes que compõem a magnetosfera e que possuem, cada uma, características próprias e geralmente distintas uma da outra. Como se observa, logo atrás da magnetopausa, já na região interna da magnetosfera, aparece a bainha magnética (*magnetosheath*), onde o vento solar torna-se subsônico devido ao choque que se forma na interação entre o vento solar e o campo geomagnético. Além disso, esta região tem forte influência na ocorrência e na intensificação dos efeitos magnetosféricos dinâmicos, uma vez que é uma região bastante turbulenta devido à compressão e aquecimento do plasma (*Hill, 1983*).

A magnetopausa é a interface entre os dois tipos de plasma: o magnetosférico e o do vento solar e ela surge devido às propriedades do plasma e ao Teorema do congelamento do campo, pela lei de Ampère, separando os dois tipos de plasma. Assim,

uma corrente flui sobre esta interface, a chamada corrente de Chapman-Ferraro – também conhecida como corrente na magnetopausa -, causando uma abrupta mudança no campo magnético e na configuração do plasma (Roederer, 1979).

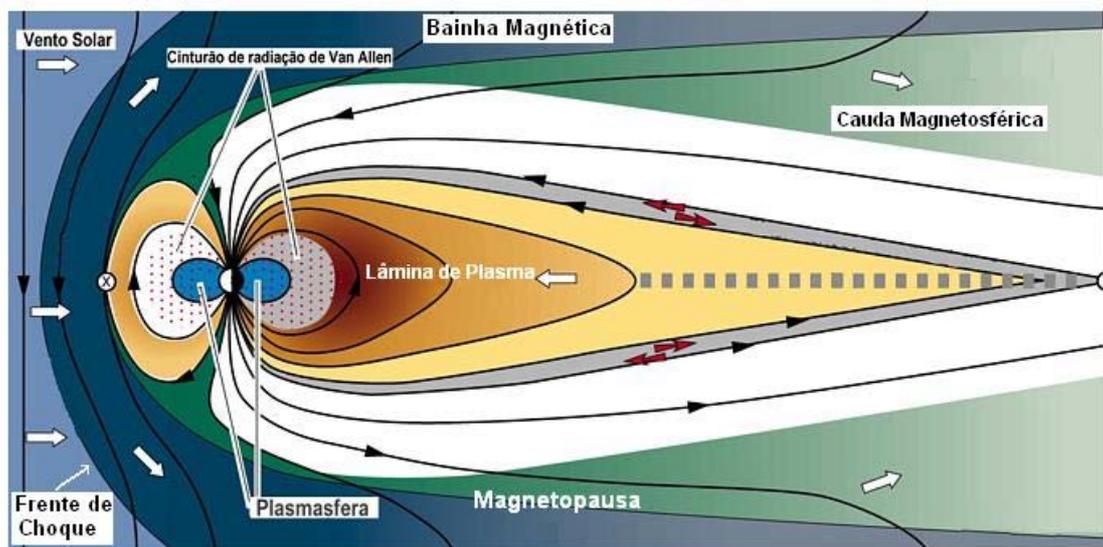


FIGURA 2.5 - Representação esquemática da magnetosfera e suas regiões, que são formadas a partir da interação do vento solar com o campo magnético interplanetário.

FONTE: Adaptada de

(http://space.rice.edu/image/livefrom/5_magnetosphere.jpg).

Na direção anti-solar, a magnetosfera fica mais alongada, e as linhas de campo geomagnético esticadas formam o que se chama cauda magnética (*magnetotail*). Esta região, que se estende até distâncias maiores do que $200 R_E$, serve como um reservatório de energia do vento solar, que depois é dissipada na região auroral e na magnetosfera interna (Parks, 1991). A lâmina de plasma (*plasmasheth*), representada na região mais central da Figura 2.3, funciona como um reservatório de partículas de plasma aquecido na região da cauda magnetosférica. A lâmina de plasma é constituída principalmente de íons H^+ com origem principalmente solar e da alta ionosfera, e os íons O^+ cuja origem é principalmente ionosférica. É ela quem divide a cauda em dois lóbulos – lóbulo sul e lóbulo norte, com direções de campo magnético opostas – uma

vez que é responsável pela intensidade da corrente que atravessa a cauda. Tal geometria deve-se às próprias derivas de corrente das partículas. Suas fronteiras e sua estabilidade devem-se basicamente aos mecanismos de injeção e perda de partículas e à densidade da corrente na cauda (Roederer, 1979).

Na cauda, a existência de partículas com diferentes cargas dá origem a um campo elétrico chamado campo elétrico anoitecer-amanhecer (*dawn-dusk*). Ele se forma sobre a lâmina de plasma, e é responsável pela deriva de campo elétrico $\vec{E} \times \vec{B}$, cujo módulo varia com o inverso da magnitude do campo magnético ao quadrado através desta lâmina carregada. Se a partícula é capturada por este campo elétrico, dá-se início a uma deriva para leste com velocidade $\vec{v} = \vec{E} \times \vec{B}_z / B_z^2$. A partir daí, as partículas que constituem a lâmina de plasma são direcionadas para a Terra sofrendo, com a influência do campo geomagnético, mais dois tipos de deriva dependentes do sinal da carga. Todo este processo, por fim, forma, na região equatorial, a estrutura conhecida por corrente de anel.

A corrente de anel consiste de uma corrente equatorial, localizada a distância entre $L^6 = 2$ a 8, composta de íons e elétrons, que, com a existência do campo geomagnético, sofrem a ação das derivas de gradiente e de curvatura. Em conjunto, as duas derivas dão uma corrente resultante para oeste, mesmo sentido da deriva das partículas positivas - a energia dos íons varia de 20-200 keV (Daglis et al., 1999). Já os elétrons que constituem esta corrente derivam em direção oposta em torno da Terra e geralmente têm energias bem menores que as dos íons - normalmente abaixo dos 30 keV. A Figura 2.6 dá uma idéia da corrente que é formada na região equatorial terrestre, além de mostrar outros sistemas de corrente que são importantes no estudo da dinâmica magnetosférica. Durante tempestades magnéticas, a intensidade da corrente de anel é fortemente aumentada e a energia total conta com a contribuição de íons de oxigênio (Daglis et al., 1999), sendo que normalmente os íons de hidrogênio é que dominam a corrente de anel.

⁶ L é a distância radial do centro da Terra até onde a linha de campo corta o plano do equador geomagnético para um campo dipolar ideal.

O comportamento da corrente de anel é o que determina as características de uma tempestade magnética. É por isso que uma tempestade é avaliada através do estudo da injeção, do transporte e da perda das partículas carregadas que a constituem. A injeção dá-se através do processo de reconexão e o transporte através da convecção magnetosférica conforme já foi discutido anteriormente. Recentemente, *O'Brien e McPherron* (2000) mostraram estatisticamente que existe uma correlação entre o campo elétrico interplanetário (E_y) e o tempo de decaimento das partículas que constituem a corrente de anel. O principal mecanismo de perda das partículas durante a fase principal da tempestade e início da fase de recuperação foi sugerido como sendo a deriva dos íons da corrente de anel em direção à magnetopausa diurna em órbitas abertas (*Liemohn et al.*, 1999; *Liemohn et al.*, 2000, *Ebihara e Ejiri*, 2000).

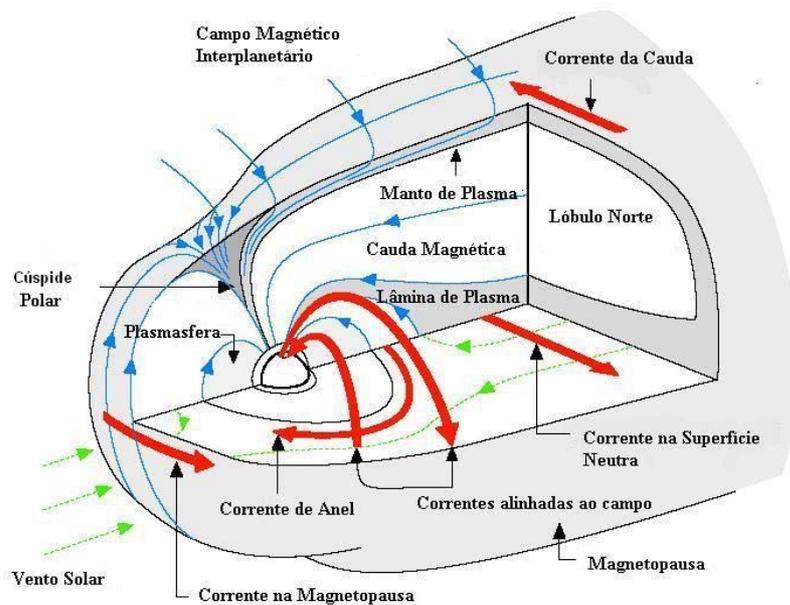


FIGURA 2.6 - Regiões da magnetosfera e os principais sistemas de corrente formados.

Uma das correntes mais importantes é a corrente de anel, com direção para oeste.

FONTE: Adaptada de (http://www-spc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/solwind_interact_magsphere_tutorial.pdf).

Ainda para as regiões da magnetosfera, observando-se as Figuras 2.3 e 2.4, pode-se ver tanto bi quanto tridimensionalmente a região da plasmasfera na região bem interna já nas proximidades da Terra. Esta região possui linhas de campo fechadas, o que faz com que ela tenda a corrotacionar com a Terra. Seu tamanho não é constante, pois varia com a convecção magnetosférica: durante períodos de intensa convecção, é contraída, enquanto que, em períodos de baixa convecção, alonga-se em distância. Devido à corrotação com a Terra, o plasma que é acumulado na região externa, é levado para o lado diurno da magnetopausa, sendo trocado pelo proveniente da cauda.

2.6 Índices Geomagnéticos

Uma variedade de índices especifica a intensidade de um distúrbio geomagnético. São as diferenças entre a característica e a intensidade das variações magnéticas com a latitude que influenciam a escolha e a derivação dos índices geomagnéticos (*Tascione, 1994*). Por exemplo, enquanto em latitudes médias, os índices para intervalos de 3 horas (K_p e A_p) em um dia são mais apropriados, na zona auroral, as escalas de tempo de uma hora ou menos é que são importantes e são encontradas nos índices do eletrojato auroral (AU, AL e AE). Já no Equador, consideram-se intervalos de uma hora e de 1 minuto, como se pode ver nas medidas dos índices Dst, Sym e Asy.

Um dos índices através dos quais se pode medir a atividade magnética na região sub-auroral é o índice K, com um intervalo de medida das variações irregulares de 3 horas. Ele é usado como indicador do nível geral da atividade magnética causada pelo vento solar e é dado em uma escala quase-logarítmica, variando com os inteiros de 0 a 9. Avaliado desde 1932, o índice K_p representa a intensidade da atividade magnética planetária observada nas regiões sub-aurorais e é dado em intervalos de 3 horas. O índice individual K, que é medido para cada um dos observatórios, contribui para as medidas em médias latitudes, aproximadamente entre 48° e 63° , e reflete a variação média de um componente do campo sobre intervalos de 3 horas, para cada estação. Através de uma escala de conversão é que o índice K_p quase-logarítmico é transformado para o índice linear A_p , que varia de 0 a 400 nT. Uma revisão de como o índice K é derivado é dada por *Menvielle e Berthelier (1991)*.

O índice AE (Eletrojato Auroral) foi definido em 1966 por *Davis e Sugiura* de modo que media no princípio as variações nos eletrojatos aurorais. Seu valor é obtido com base nas medidas de 1 minuto do componente horizontal (H) a partir dos observatórios na zona auroral em todo o mundo. A partir daí, plota-se estes dados obtidos em função da hora universal. Os envelopes superior e inferior são definidos como os índices AU e AL, respectivamente, ou seja, para cada estação, o valor máximo positivo do deslocamento de H define o índice AU, enquanto que o máximo deslocamento negativo define o AL. A diferença entre o envelope superior e o inferior é que define a medida do índice AE ($AE = AU - AL$). O índice AE global é determinado usando os maiores valores de AU e AL de todas as estações reportadas. Desta forma, AU normalmente é derivado da estação abaixo do Eletrojato a leste, enquanto que AL, de uma estação abaixo do eletrojato a oeste. Neste sentido, os índices AU e AL são os índices locais, porque eles são somente a amplitude das perturbações em H nos dois locais.

Um dos grandes problemas com o índice AE é a distribuição das estações aurorais que são selecionadas, pois durante tempestades magnéticas intensas, a zona auroral expande-se para o equador e, às vezes, o eletrojato auroral pode deslocar-se em direção ao equador, afastando-se de algumas estações onde é medido. Outro problema é que os valores aumentados dos índices AU e AL podem resultar de movimento do eletrojato relativo à estação de superfície, e desta forma, pode ser interpretada como um aumento no eletrojato.

O índice Dst é o índice que melhor identifica a ocorrência de uma tempestade. É derivado de quatro estações de magnetômetros de baixa latitude distribuídas em torno do mundo (Hermanus, Honolulu, Kakioka e San Juan). Os cinco dias mais calmos do mês são usados para calcular os valores médios anuais do componente H para formar a base para cada estação e levar em conta as variações seculares. São as suas variações que identificam as fases em que uma tempestade é dividida. Medido em intervalos de 1 hora, conta com a contribuição de quatro grandes sistemas de corrente que estão presentes na magnetosfera: sistema de corrente na magnetopausa, a chamada corrente de Chapman-Ferraro, sistemas de corrente na cauda, as correntes de anel parciais e simétricas (*Maltsev, 2003*).

Um índice, que mede o campo perturbado H , da mesma forma como o Dst , mas com resolução de 1 minuto de diferentes estações e com diferentes sistemas de coordenadas, é o índice simétrico (Sym). Assim como o Dst , mede as perturbações causadas pela presença de uma corrente na região equatorial, a corrente de anel. Para a corrente de anel assimétrica, existe um índice, chamado de assimétrico (Asy), que é a medida de quanto as perturbações do componente H se distanciam da simetria axial, ou seja, mede a assimetria da corrente de anel, em um intervalo de 1 minuto. Tais dados, assim como as medidas dos índices geomagnéticos AE, AU, AL são tomados do *World Data Center for Geomagnetism from Kyoto* (WDC-Kyoto), enquanto que K_p e Dst são obtidos do *Space Physics Interactive Data Resource* (SPIDR).

2.7 Tempestades Geomagnéticas

Durante muitos anos estudou-se a forma como as características do meio-interplanetário controlavam o desenvolvimento das tempestades magnéticas, com o objetivo de buscar critérios e formas de se prever, com um período maior de antecedência, a ocorrência das mesmas, a fim de que seus efeitos pudessem ser amenizados. Mas para isso é preciso primeiramente entender o fenômeno e principalmente aquilo que leva a sua ocorrência.

Uma tempestade magnética é entendida como um aumento na densidade de energia das partículas que compõem a corrente de anel equatorial, levando a uma deflexão global de baixa latitude no componente horizontal do campo geomagnético por várias horas (*Kamide et al.*, 1997). Esta deflexão é medida na superfície da Terra por um sistema de magnetômetros localizados em posições preferencialmente distantes da zona auroral e do eletrojato equatorial.

A intensidade de uma tempestade é geralmente definida pelo índice Dst (*Disturbance Storm Time*) através do seu valor mínimo, e a classificação das tempestades quanto à intensidade dos seus efeitos na corrente de anel, também é feita através deste índice. Para eventos com $Dst < -50$ nT, diz-se que as tempestades magnéticas são de intensidade moderada, enquanto que aquelas em que o mínimo do Dst é inferior a -100 nT são classificadas como tempestades magnéticas intensas (*Gonzalez et al.*, 1994). No

grupo das intensas, considera-se ainda um grupo caracterizado por valores extremamente negativos do *Dst*, as supertempestades magnéticas ou tempestades magnéticas muito intensas.

Para o cálculo do *Dst*, quatro estações de magnetômetros de baixa latitude medem de hora em hora a perturbação causada no componente *H* do campo geomagnético. As medidas do *Dst* não são apenas resultantes da corrente de anel simétrica, pois muitos outros sistemas de corrente influenciam na criação de campos que causam a deflexão no componente-*H*. Tanto observacionalmente como através de modelos teóricos (*e.g.*, Greenspan e Hamilton, 2000; Liemohn et al., 2001) foi documentado que a corrente de anel, principalmente durante a fase principal e no início da fase de recuperação, é altamente assimétrica. Isto se deve aos íons que derivam em direção ao lado do anoitecer (*dusk*) da magnetosfera, com trajetórias abertas, desaparecendo na magnetosfera diurna. Também os sistemas de corrente na região da cauda e na magnetopausa contribuem nas medidas do *Dst*, mas o efeito causado por elas varia de tempestade para tempestade, principalmente por causa das diferentes estruturas interplanetárias que interagem com a magnetosfera (Huttunen e Koskinen, 2004).

A Figura 2.7 mostra as fases nas quais a tempestade magnética está dividida. Geralmente, há um início súbito (IS), quando da presença de um choque, acumulando campo magnético e plasma na frente da magnetosfera e contribuindo para o sistema de correntes da magnetopausa. A partir daí, devido ao aumento da pressão dinâmica do vento solar, o campo que é gerado aumenta pela intensificação das correntes, e os magnetômetros medem a contribuição destes campos, identificando o impulso súbito (IS) assim que a magnetosfera é comprimida. Esta fase é chamada de fase inicial da tempestade e é seguida pela fase principal. A fase principal de uma tempestade é caracterizada por um grande decréscimo no componente *H* cuja magnitude é bem maior que aquela observada na fase inicial (Perreault e Akasofu, 1978). É caracterizada pela maior injeção de energia na corrente de anel, causada pela inflexão da componente B_z para valores negativos, e conseqüente intensificação do processo de reconexão na magnetosfera diurna. Logo em seguida, surge a fase de recuperação, onde cessa o fluxo do vento solar para dentro da magnetosfera (Tascione, 1994).

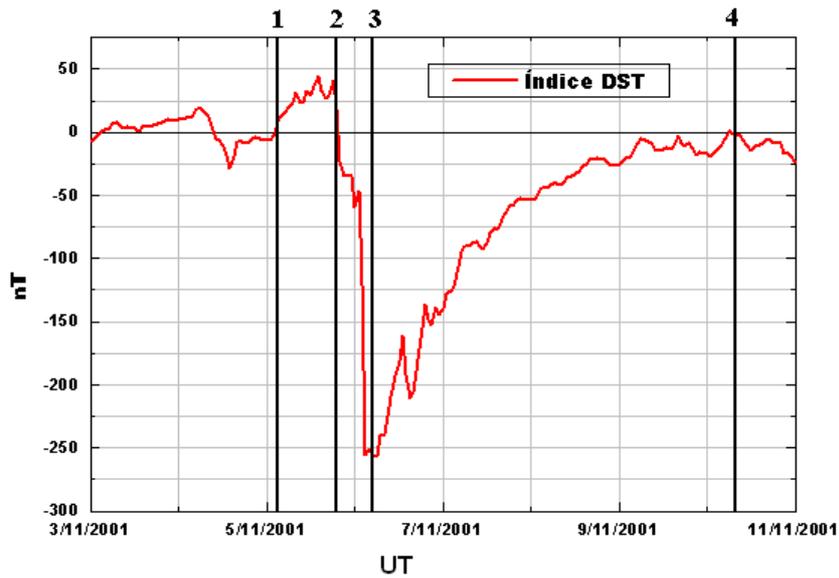


FIGURA 2.7 - A figura mostra as fases de uma tempestade magnética. Esta tempestade corresponde a um evento de supertempestade que ocorreu 6 de novembro de 2001. O número 1 identifica o início da fase inicial, caracterizada por um aumento no índice Dst. O número 2 corresponde ao fim do impulso súbito e início da fase principal, que se estende até 3, e onde o Dst decresce devido à deflexão do componente horizontal, H. Na seqüência de 3 a 4, a fase de recuperação caracteriza o caminho traçado pelo componente H até voltar a seu estado normal, não-perturbado.

2.8 Partículas na Corrente de Anel

Para se estudar a dinâmica da corrente de anel, deve-se fazer uma análise do índice Dst. Além de ser uma medida do campo magnético da corrente toroidal, o Dst também mede a energia total, $E(t)$, das partículas que formam esta corrente, e, portanto a intensidade da tempestade. Mas a energia que domina a corrente de anel é a energia cinética, e, assim, ela representa a energia total, W_{RC} . Isto é expresso através da relação de Dessler-Parker-Schopke (DPS) (Dessler e Parker, 1959; Schopke, 1966):

$$\frac{Dst^*(t)}{B_0} = \frac{2W_{RC}}{3W_m}, \quad (2.7)$$

onde B_0 é o campo magnético na superfície, W_m é a energia magnética do dipolo da Terra, e Dst^* é o índice Dst corrigido devido à contribuição das correntes da magnetopausa. Esta correção do Dst é dada por:

$$Dst^* = Dst - b\sqrt{P_{VS}} + c, \quad (2.8)$$

onde P_{VS} é a pressão dinâmica do vento solar, obtida como nmv^2 - n , m e v são, respectivamente, a densidade, a massa e a velocidade dos prótons (*Burton et al.*, 1975; *Gonzalez et al.*, 1989; *Feldstein*, 1992). As constantes b e c são dadas por $7,26nT/\sqrt{nPa}$ e $11nT$, respectivamente, que são derivadas usando-se de dados do vento solar e do Dst tomados em intervalos de 1 hora durante 30 anos. A constante c não contém somente um ajuste para a magnetopausa durante o tempo calmo, mas também pode conter uma contribuição para o cálculo do próprio Dst (*O'Brien e McPherron*, 2000).

Considera-se uma partícula que tem o primeiro invariante adiabático, $\mu = W/B$, não-nulo, onde B é a intensidade do campo magnético. Além disso, considera-se que o segundo invariante, J , é igual a zero. Assim, esta partícula pode ter deriva de gradiente, mas não pode ter deriva de curvatura, e, por isso, fica aprisionada em um campo magnético de intensidade mínima.

A velocidade de deriva da partícula, na presença do campo geomagnético, é dada por *Wolf* (1995):

$$\vec{v}_D = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} + \frac{\vec{F}_{ext} \times \vec{B}}{qB^2} + \frac{W_{\perp} \vec{B} \times (\nabla B)}{qB^3} + \frac{2W_{\parallel} \hat{r}_C \times \vec{B}}{qR_c B^2}, \quad (2.9)$$

onde \vec{F}_{ext} representa uma força não-eletromagnética, R_C é o raio de curvatura da linha de campo magnético, \hat{r}_C é o raio unitário que aponta para fora do centro de curvatura e $W_{//}$ e W_{\perp} são, respectivamente, as energias das partículas nas direções paralela e perpendicular ao campo magnético \vec{B} . Considerando-se uma partícula com um ângulo de arremesso (*pitch angle*) de $\sim 45^\circ$, segue que as magnitudes das derivas de gradiente e curvatura são comparáveis. Além disso, em um campo dipolar, ∇B e \hat{r}_C estão em direções opostas de modo que as derivas de gradiente e curvatura estão na mesma direção. Assim, pode-se somente estimar a soma dos dois termos de deriva somando-se duas vezes um deles (Wolf, 1995). Aqui, considera-se apenas o termo de deriva de gradiente, ou seja, a velocidade de deriva resultante é dada por:

$$\vec{v}_{GC} = -\frac{1}{2} \frac{mv_{\perp}^2}{qB^3} (\nabla B) \times \vec{B}. \quad (2.10)$$

Como visto anteriormente, sabe-se que as derivas de gradiente e curvatura do campo geomagnético é que definem a trajetória das partículas e que levam à formação da corrente de anel. São estas derivas que levam as partículas positivas a derivar para oeste do campo dipolar da Terra, e as partículas negativas a derivar para leste do campo. Considera-se o campo no plano equatorial como sendo dado por

$$B_E \approx B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3. \quad (2.11)$$

Considerando-se que o plano da trajetória das partículas é o equatorial, segue que (2.10) escreve-se como:

$$\vec{v}_{GC} = -\frac{1}{2} \frac{mv_{\perp}^2}{qB^3} \frac{\partial B}{\partial r} \hat{B} \varphi. \quad (2.12)$$

A partir da magnitude desta velocidade, pode-se determinar o tempo necessário para que uma partícula energética, proveniente da lâmina de plasma, complete uma volta, e simetrize a corrente de anel. Este tempo é dado por:

$$\tau_D = \frac{2\pi r}{v_{GC}} \approx \frac{2qBr^2}{W_{RC}}, \quad (2.13)$$

onde W_{RC} é a energia total das partículas que constituem a corrente de anel.

2.9 Funções de Injeção e Dissipação da Energia do Vento Solar

Quando encontra o obstáculo da magnetosfera terrestre no meio interplanetário, parte da energia do vento solar entra na magnetosfera na forma de energia cinética – a energia eletromagnética é muito menor - devido ao movimento das partículas que estão sendo carregadas. A estimativa da taxa de energia do vento solar é feita através do fluxo de energia cinética das partículas por unidade de tempo no meio-interplanetário (*Monreal-MacMahon e Gonzalez, 1997*), ou seja,

$$U_{vs} = \frac{1}{2} \rho v^3 A, \quad (2.14)$$

onde v e ρ são a velocidade e a densidade de massa do vento solar; A é a seção transversal da magnetopausa diurna dada por R_{CF}^2 , com

$$R_{CF} = \left(\frac{B_0^2}{4\pi\rho v^2} \right)^{1/6} R_E, \quad (2.15)$$

sendo $B_0 \approx 0,3G$, o valor do campo geomagnético na superfície da Terra. A partir do momento que se considera a Equação (2.15) definindo a variação da posição da magnetopausa diurna em termos de dois parâmetros do vento solar, a saber v e ρ , está levando-se em conta a influência exercida pela pressão dinâmica na posição da fronteira entre os dois plasmas: geomagnético e do vento solar.

Como o objetivo do presente trabalho é estudar a dinâmica da corrente de anel durante os eventos de tempestade, apesar de se saber que, além da dissipação na corrente de anel, há outros mecanismos de perda de energia dentro da magnetosfera, o que se procura considerar aqui é somente a energia injetada na corrente toroidal.

Enquanto a teoria da reconexão não fornece ainda uma estimativa da quantidade de energia que entra na magnetosfera durante a sua ocorrência, a função fenomenológica dada por *Perreault e Akasofu* (1978) atua como um indicador da quantidade de energia num determinado intervalo de tempo que está sendo injetada e é expressa por:

$$\varepsilon = 10^7 u B^2 l_0^2 \text{sen}^4\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2.16)$$

onde u é a velocidade do vento solar, B é a intensidade do IMF, $l_0 = 7 R_E$ (uma escala de comprimento), $\theta = \text{tg}^{-1}(B_y/B_z)$ é a projeção do IMF no plano perpendicular à linha Terra-Sol. Pode-se notar que a função ε varia apenas com as condições do vento solar e do IMF. Além disso, o ângulo θ tem importante papel, pois a partir dele pode-se ver que a taxa de injeção de energia diminui à medida que os campos tendem a ser paralelos ($\theta \approx 0^\circ$) e torna-se máxima quando os campos são antiparalelos ($\theta = 180^\circ$) (*Pulkkinen et al.*, 2002). Vê-se claramente que a ocorrência do processo de reconexão é que torna possível a estimativa da taxa de energia que está entrando na magnetosfera.

Segundo *Perreault e Akasofu* (1978), para se calcular tal energia que entra na magnetosfera, durante um determinado período de tempo, é feita a seguinte integração:

$$W_\varepsilon = \int_{t_0}^{t_1} \varepsilon dt . \quad (2.17)$$

Consideram-se os limites de integração, t_0 e t_1 , como sendo os instantes de tempo que representam, respectivamente, o início e o fim da fase principal da tempestade.

Depois de ser depositada na cauda magnética, a energia que foi injetada na magnetosfera, sofre a ação do campo elétrico de convecção, que faz com que as

partículas sejam direcionadas à Terra e formem a corrente para oeste. A taxa com que esta energia é injetada na magnetosfera satisfaz a equação do balanço de energia dada por:

$$\frac{dE(t)}{dt} = U(t) - \frac{E(t)}{\tau} \quad (2.18)$$

onde $U(t)$ é a taxa de entrada de energia, ou seja, a fonte, e τ é o tempo necessário para que a energia volte a assumir os valores iniciais. Da relação DPS (Equação (2.7)) e da Equação (2.18), segue que:

$$\frac{dDst^*(t)}{dt} = F(E_y) - \frac{Dst^*(t)}{\tau}, \quad (2.19)$$

onde $F(E_y)$ é a função de injeção de energia para dentro da corrente de anel, dada em nT/h , e representada por *Burton et al.* (1975) como:

$$F(E_y) = \begin{cases} 0, & \text{se } E_y < 0.5 \text{ mV/m} \\ -1.5 \times 10^{-3} (E_y - 0.5), & \text{se } E_y > 0.5 \text{ mV/m} \end{cases} \quad (2.20)$$

e τ (Equação (2.19)) é o tempo de decaimento da energia na corrente de anel. Assim como $F(E_y)$ é dependente do campo elétrico E_y , conforme se observa na Equação (2.20), o τ também é uma função do campo elétrico de direção do amanhecer-entardecer (*dawn-dusk*). Segundo o modelo de (*O'Brien e McPherron, 2000*) tem-se que:

$$\tau = 2,4 \exp \left[\frac{9,74}{(4,69 + E_y)} \right]. \quad (2.21)$$

Nas Equações (2.20) e (2.21), o campo elétrico E_y é dado por:

$$E_y = \begin{cases} |vB_z|, & B_z < 0 \\ 0, & B_z \geq 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

2.9.1 Relação Dessler-Parker-Sckopke (DPS)

Supondo que a partícula move-se no equador geomagnético sob a influência das derivas de gradiente e de curvatura, dependendo do sinal de sua carga, esta irá derivar para oeste (para partículas positivas) ou para leste (partículas negativas), formando a corrente de anel de direção para oeste. O surgimento e a intensificação desta corrente causam uma deflexão no componente horizontal, H , do campo geomagnético que é observada nas baixas latitudes da superfície terrestre, deixando clara a existência de uma relação entre a intensidade do campo geomagnético e a energia que é carregada pelas partículas que constituem a corrente de anel.

Considerando-se uma partícula qualquer, com energia cinética W , que sofre espelhamento no plano equatorial, e deriva em um círculo à distância geocêntrica de LR_E , seu campo é dado por *Wolf* (1995) na forma:

$$\vec{\Delta B}_{gc} = -\frac{3}{4\pi} \frac{\mu_0 W}{R_E B_0} \hat{e}_z. \quad (2.23)$$

Devido ao seu movimento de giro sob a influência do campo magnético, a partícula tem um momento magnético dado por:

$$\vec{\mu} = -e_z \frac{W}{B_E(L)}, \quad (2.24)$$

onde B_E é dado pela Equação (2.11). Este dipolo produz um campo na direção norte, representado por:

$$\vec{\Delta B}_{dip}^q = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu}{(LR_E)^3} \hat{e}_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{W}{R_E^3 B_0} \hat{e}_z, \quad (2.25)$$

no centro da Terra. Assim, a perturbação magnética total no centro da Terra, devido à carga q é:

$$\vec{\Delta B}^q = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{W}{R_E^3 B_0} \hat{e}_z. \quad (2.26)$$

Como ΔB não depende de L , mas somente da energia da partícula, a perturbação magnética total no centro da Terra é dada por:

$$\vec{\Delta B}_{particulas} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{W_{particulas}}{R_E^3 B_0} \hat{e}_z, \quad (2.27)$$

onde $W_{particulas}$ é a energia total das partículas que constituem a corrente de anel.

Desde que a energia total do dipolo magnético da Terra é dada por:

$$W_{mag} = \frac{4\pi}{3\mu_0} B_0^2 R_E^3. \quad (2.28)$$

Ao se relacionar as Equações (2.27) e (2.28), tem-se que:

$$\frac{\vec{\Delta B}_{particulas}}{B_0} = -\frac{2}{3} \frac{W_{particulas}}{W_{mag}} \hat{e}_z. \quad (2.29)$$

A Equação (2.29) é a derivação da relação DPS feita por *Wolf* (1995) e proposta por *Dessler*, já mencionada acima (Equação (2.7)). É importante lembrar que as Equações (2.27) e (2.29) são válidas em um campo dipolar para distribuições de ângulo de arremesso arbitrário, na região equatorial.

2.10 Instrumentação e Dados Interplanetários e Geomagnéticos

Para a análise dos eventos foram usados os parâmetros de plasma (temperatura, densidade e velocidade) e os dados do campo magnético interplanetário (componentes B_x , B_y e B_z e a magnitude, B) obtidos a partir dos satélites *International Sun-Earth Explorer* (ISEE-3), *Interplanetary Monitoring Platform* (IMP-8) e *Advance Composition Explorer* (ACE).

O satélite ISEE-3 foi lançado em 1978, e teve seus dados disponibilizados para o período de 16 de agosto de 1978 até 31 de dezembro de 1987. Podem-se obter estes dados do site (<http://www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/isee/>) com intervalos de tempo de 5 minutos. Para os eventos nos anos de 1981 e 1982, período em que o satélite estava operando, os dados do plasma e do IMF foram considerados, uma vez que a órbita dá-se em torno do ponto L1⁷, onde se pode ter uma idéia da estrutura e da composição do plasma que está se aproximando da magnetosfera. Muitas falhas nos dados, em determinados períodos de tempo, dificultaram a análise das características interplanetárias dos eventos de supertempestade. Isso ocorreu possivelmente devido a algum dos seguintes fatores: ocorrência de ejeções que saturam os equipamentos por causa a alta energia das partículas e das correntes induzidas ali, também pelas manobras e/ou reprogramação do satélite para direcionar sua órbita.

As tempestades no intervalo de 1989 a 1992 são estudadas a partir dos dados do meio interplanetário medidos pelo satélite IMP-8. A posição do satélite, durante os dias da tempestade, pode ser localizada através do site (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/helios/imp.html>), sendo que varia da frente da magnetopausa diurna, no vento solar, até as regiões internas à magnetosfera, como bainha e cauda magnéticas. Os dados estão disponibilizados desde o seu lançamento, em outubro de 1973 até dezembro de 1993 pelo site (http://www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/imp8_form.html). Eles não são favoráveis para uma boa análise das condições interplanetárias que levaram à tempestade, uma vez que, em grande parte da sua órbita, o satélite encontra-se dentro da magnetosfera. Como não há outro satélite operando neste período que possa auxiliar no estudo das supertempestades ocorridas, os dados foram considerados tendo-se consciência da não-permanência no vento solar durante todo o tempo.

Lançado em 25 de agosto de 1997, o satélite ACE orbita em torno de L1 e fornece dados do IMF e do plasma em intervalos de 64s ou mesmo de 1h. Os dados usados na confecção dos gráficos dos eventos de 1998 a 2001 são considerados em intervalos de

⁷ O ponto Lagrangeano interno L1 é o ponto na linha Terra-Sol onde as atrações gravitacionais de ambos se anulam. Está localizado a uma distância de aproximadamente 240 raios terrestres da Terra.

64s. Todas as tempestades magnéticas intensas encontram-se no período operacional do satélite e, portanto, são estudadas com os dados medidos pelo satélite ACE, a fim de se observar com clareza as estruturas geoféticas para cada evento.

As medidas do campo magnético interplanetário foram realizadas pelo instrumento ACE/MAG (*Magnetic Field Experiment*); já as medidas dos parâmetros de plasma foram realizadas pelo instrumento ACE/SWEPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*). O site disponível para consulta e obtenção destes dados desde o ano de 1997 é (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>).

Para as observações na coroa solar, as imagens do SOHO (*Solar & Heliospheric Observatory*) foram utilizadas durante os eventos de 1998 a 2001, período em que suas imagens foram disponibilizadas. A espaçonave foi lançada em dezembro de 1995 e é composta de vários instrumentos que fazem desde a detecção dos choques até o imageamento das explosões que ocorrem no Sol. Para os eventos mais antigos, muitos dos dados das explosões associadas à ocorrência das tempestades foram encontrados na bibliografia.

CAPÍTULO 3

SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS

Desde o início da era espacial entre os anos 1960 e 1970, medidas feitas dentro da magnetosfera terrestre têm mostrado que há uma profunda influência das tempestades magnéticas muito intensas na população de partículas e de plasmas. Tais tempestades, chamadas de supertempestades magnéticas, são importantes para a comunidade científica por dois motivos: (1) elas levam a magnetosfera a um estado extremo em que os processos dinâmicos podem ser claramente identificados e analisados e (2) elas geram campos elétricos extremamente grandes, além de meios onde as partículas comportam-se completamente diferente da forma prevista pela teoria convencional (*Bell et al.*, 1997).

A Tabela 3.1 apresenta os 15 eventos de supertempestades selecionados a partir do índice *Dst* (*Disturbance Storm Time*). O critério aqui usado para a classificação considera que, para $Dst < -250$ nT, tem-se um evento super intenso. Além das datas de ocorrência de cada evento, pode-se observar o tempo de duração da fase principal da tempestade, em horas, além dos valores de pico para os índices *Dst* (em nT), AE (também em nT) e do K_p .

TABELA 3.1 - Eventos de supertempestade magnética selecionados ($Dst < -250$ nT) são mostrados acima. O período no qual os quinze eventos são tomados corresponde aos dois últimos ciclos solares e parte do atual (ciclo 23), ou seja, do ano 1981 até 2001. Além do dia da tempestade, também são mostrados o tempo de duração da fase principal (em horas), os picos dos índices Dst (em nT), do AE (em nT) e do K_p em escala logarítmica.

Tempestades Magnéticas	t (h)	Dst (nT)	AE (nT)	K_p
13/04/1981	7	-311	1235	8 ₀
13/07/1982	9	-325	1877	9 ₀
5/09/1982	12	-289	1590	9.
13/03/1989	23	-600	-	9 ₀
21/10/1989	42	-268	-	8 ₀
17/11/1989	13	-266	-	8 ₀
10/04/1990	18	-281	1555	8 ₀
25/03/1991	20	-298	3195	9.
29/10/1991	20	-254	1731	9 ₀
10/05/1992	15	-288	1421	9.
6/04/2000	6	-288	2483	9.
15/07/2000	10	-301	3321	9 ₀
31/03/2001	5	-358	2508	9.
11/04/2001	8	-256	2558	8 ₀
6/11/2001	11	-277	2842	9.

Os eventos de tempestades magnéticas intensas geralmente aparecem associados com estruturas interplanetárias complexas (*Gonzalez et al.*, 2002). Nos casos onde há inúmeras explosões solares, aparecem múltiplas CMEs e, devido a sua propagação, causam múltiplos choques, observando-se, assim, um grande número de compressões de campo e de plasma, que resultam em tempestades com mais de duas fases principais (*Tsurutani et al.*, 2003). *Bell et al.*(1997) encontraram que a maioria das supertempestades é marcada por aumentos súbitos (SSC – *storm sudden commencement*) do nível do *Dst*, também chamados de ISs devido a inúmeros choques no vento solar que passam pela Terra, observando-se que os índices geomagnéticos respondem a todos estes choques seguindo os IS.

As principais estruturas interplanetárias envolvidas nestes eventos de grande energia são os campos na bainha, devido ao mecanismo de compressão de choques, e os das nuvens magnéticas, que apresentam uma rotação grande e lenta do campo magnético B_z (*Tsurutani et al.*, 1988). Nestes casos, os parâmetros mais importantes, e que definem a ocorrência dos eventos de grande amplitude, são a velocidade do vento solar e a intensidade do campo B_s , pois altos valores destes componentes implicam em altos valores do campo elétrico interplanetário - sendo que este último parâmetro é o dominante na ocorrência das supertempestades (*Tsurutani et al.*, 1992b). Os altos valores de B_s podem tanto ser os da bainha, formados pelas fortes ICMEs, ou os encontrados dentro das próprias ICMEs. Segundo *Burlaga et al.* (1981), no caso das ICMEs, a intensidade de B_s é grande quando se trata de uma nuvem magnética.

É importante também para o estudo entender em que fase do período solar as tempestades magnéticas ocorrem a fim de se determinar se há alguma dependência visível em relação ao ciclo solar de 11 anos. *Bell et al.* (1997) fizeram uma análise com supertempestades durante os anos de 1932 a 1995 e encontraram que a ocorrência destas tempestades dá-se principalmente na fase descendente do ciclo solar. Os períodos de ocorrência dos quinze eventos de supertempestade selecionados para este trabalho, englobando os anos de 1981 a 2001, coincidem com os períodos próximos aos máximos dos três ciclos solares envolvidos. Alguns dos eventos ocorreram próximo ao auge da

atividade, outros no pico e ainda alguns na fase descendente, conforme observado pelo trabalho mencionado anteriormente. Em relação aos meses de ocorrência, o que se observou foi que há mais eventos nos meses de março e abril, conforme se observa na Figura 3.1. No entanto, o número de eventos (15) é muito pequeno para estabelecer qualquer conclusão.

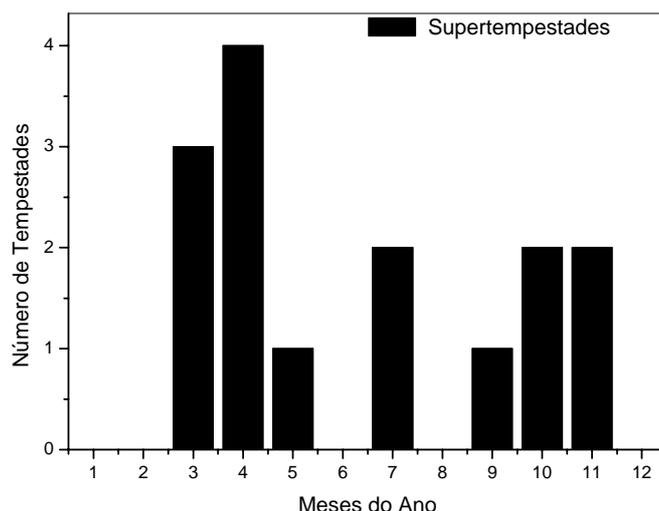


FIGURA 3.1 - Número de tempestades por mês no período de 1981 a 2001.

Na seqüência do texto, aparecem as descrições de algumas das tempestades apresentadas na Tabela 3.1. A análise dos eventos solares que foram responsáveis pela ocorrência de cada tempestade, assim como a verificação das estruturas e da configuração do campo das mesmas no meio interplanetário, são especificadas. A dinâmica magnetosférica, que pode ser vista a partir dos índices geomagnéticos (AE, *Dst*, *Sym*, *K_p*, *Asy*,...) e a partir das funções de injeção de energia, também é descrita a fim de se ter uma idéia das mudanças causadas durante grandes injeções de energia do vento solar. As demais tempestades cujas descrições não seguem neste capítulo serão vistas no Apêndice A.

3.1 Tempestade de 12 a 17 de abril de 1981

No dia 10 de abril de 1981, observaram-se explosões solares (*flares*, em inglês) dos tipos 1/X1.1, às 11h17min UT e 3/X2.5, às 16h55min UT. Uma CME associada com

estas explosões provavelmente lançou no espaço interplanetário uma estrutura de plasma, identificada como sendo uma nuvem magnética, que foi a causa da supertempestade do dia 13 de abril. Um choque foi detectado no dia 12 de abril, conforme *Mac-Mahon Monreal e Gonzalez (1997)*, e está indicado na Figura 3.2 pela linha vertical (S).

A Figura 3.2, é similar às figuras que aparecerão na seqüência do capítulo descrevendo os dados do plasma do vento solar e do campo magnético interplanetário. Do topo à base da Figura 3.2, são apresentadas as variações da temperatura dos prótons, T_p (Kelvin), da velocidade dos prótons, V_p (km/s), da densidade dos prótons, N_p (cm^{-3}), do ângulo longitudinal, ϕ , do ângulo latitudinal, θ , da magnitude de \vec{B} , das componentes B_x , B_y e B_z e do beta de plasma, β . Observa-se na figura que o componente- B_z sofreu um decréscimo considerável, chegando a valores negativos inferiores a -30 nT. Devido à rotação do IMF- B_z , durante a fase principal da tempestade, o campo apontou quase que totalmente para o sul. Note que para este período não se tem disponibilizados os dados dos sensores de plasma do ISEE-3 (T_p , V_p e N_p).

Da mesma forma como seguirão as outras figuras para os diferentes eventos de supertempestades, na Figura 3.3 aparecem, do topo à base, a componente B_z do IMF, a porcentagem de campo B_s , B_s/B , o componente E_y do campo elétrico interplanetário, a função de injeção de energia na corrente de anel, $F(E_y)$, calculada a partir da equação de Burton (Equação (2.20)), o parâmetro epsilon de Akasofu, ε , cuja fórmula será apresentada no capítulo 5 e os índices que medem o nível de perturbação, principalmente na região da corrente de anel, Dst (com resolução de 1 hora) e Sym (com resolução de 1 minuto). Na Figura 3.3, observa-se que, devido as falhas nos dados de plasma do vento solar, não foi possível calcular a taxa de injeção de energia para a magnetosfera e, em conseqüência, não se tem uma estimativa da parcela da energia do vento solar que foi injetada através do processo de reconexão utilizando dados do ISEE-3 apenas. Se, no entanto, utilizar-se dados do satélite IMP-8, pode-se calcular o campo elétrico, E_y e verificar que a dissipação de energia para dentro da corrente de anel atingiu um pico de -80 nT/h.

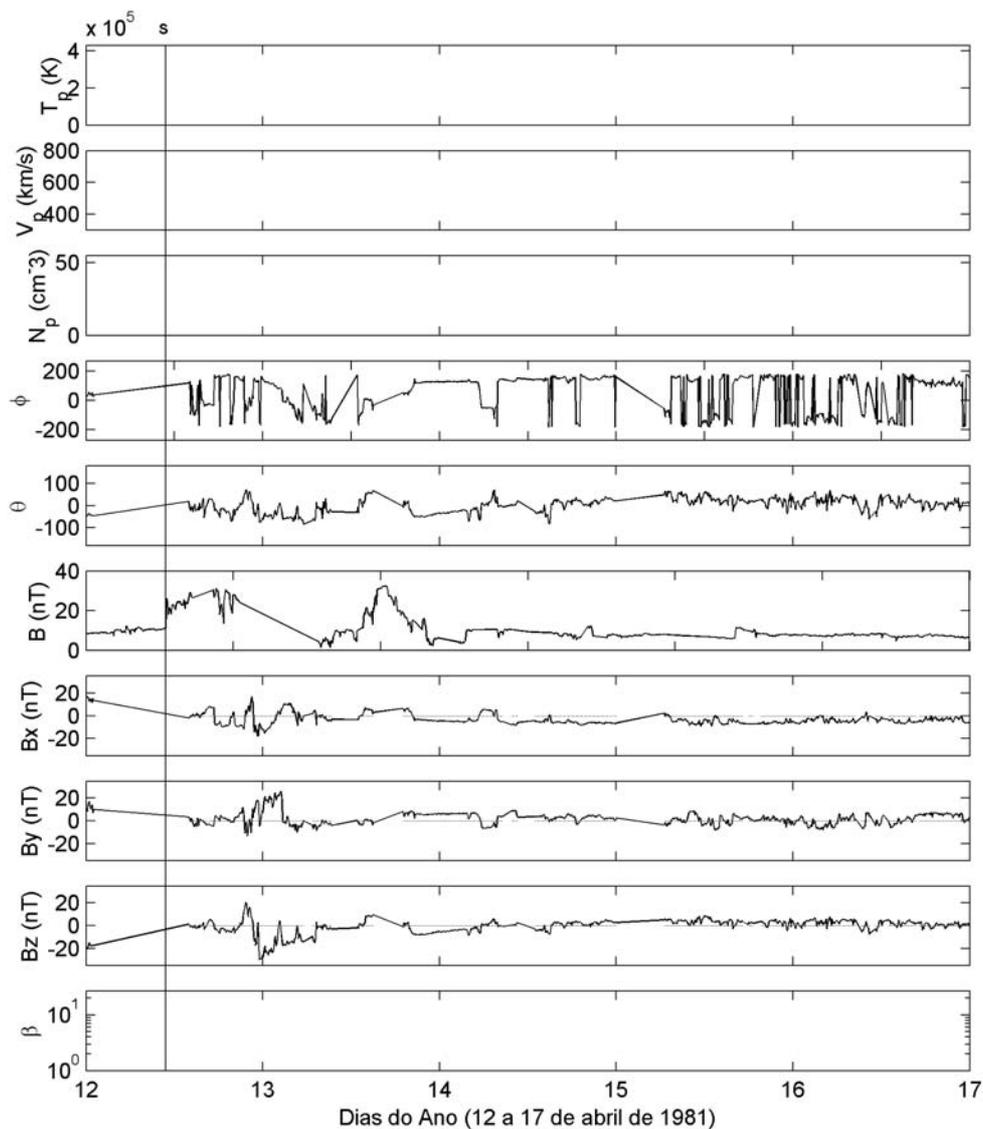


FIGURA 3.2 - Os dados do vento solar observados pelo satélite ISEE-3 para a supertempestade magnética do dia 13 de abril de 1981 são representados acima. Do topo para baixo, vê-se que não há dados para a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, aparecem o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , a magnitude do IMF, B , assim como os componentes B_x , B_y e B_z do mesmo. O β não apresentou medidas para o período, como se observa no último painel. A linha vertical identifica o choque.

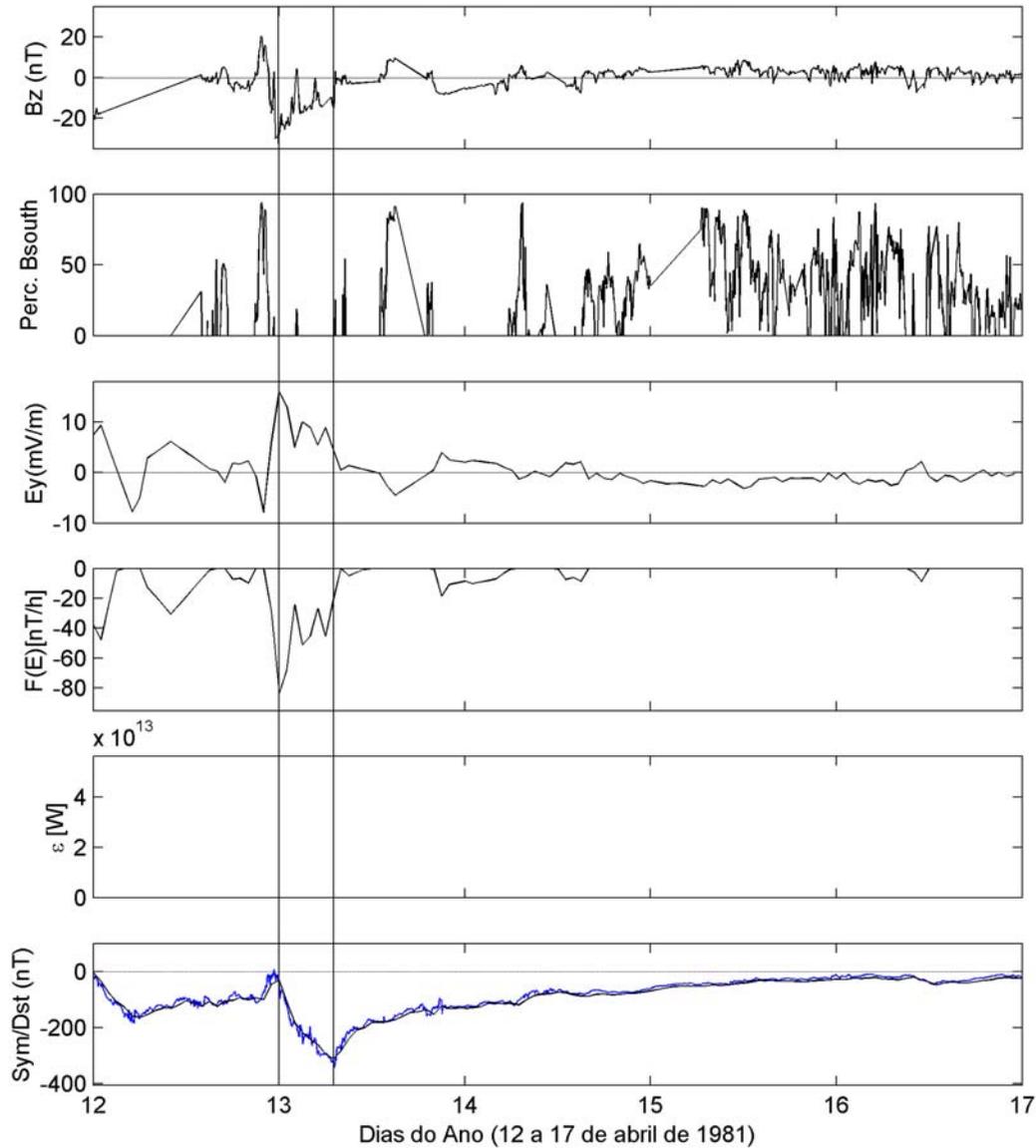


FIGURA 3.3 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S em relação ao campo total é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , obtido do site (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>), possibilita o cálculo da funções de injeção na corrente de anel $F(E)$. O parâmetro ε não tem seus dados avaliados durante a tempestade, por causa da ausência de medidas em V_p . Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

Na Figura 3.3, observa-se que a tempestade de 13 de abril de 1981 foi precedida por uma outra tempestade (pico do $Dst = -163 \text{ nT}$), e uma nova injeção de energia na corrente de anel levou o Dst a atingir um valor de -311 nT . A fase principal foi rápida (em torno de 7 horas), mas, em compensação, a fase de recuperação durou aproximadamente 4 dias. Nas duas tempestades, o Dst apresentou poucas flutuações, sendo que ambas foram constituídas de etapas únicas, e foram caracterizadas por SSCs.

Do topo à base da Figura 3.4 são apresentados o componente B_z e a magnitude B do IMF, seguidos dos índices geomagnéticos do eletrojato auroral, AE (nT), do K_p , da corrente de anel assimétrica, Asy (nT), e da corrente simétrica (Dst e Sym). A mesma seqüência de dados é mostrada nas figuras que descrevem as supertempestades apresentadas neste capítulo. Para a tempestade do dia 13, houve uma resposta intensa do índice Asy somente na fase de recuperação, conforme se pode ver pela Figura 3.4. É interessante notar que durante a fase principal da tempestade esta resposta não tenha sido mais intensa, porque é justamente neste período que se espera que a corrente de anel se torne mais assimétrica, devido a uma maior energização no lado do anoitecer (*dusk*). O fluxo de energia só é considerável quando $B_z < 0$, o que coincide com a fase principal da tempestade. O índice AE também mostrado na Figura 3.4, durante a fase principal, variou entre 500 e 1000 nT (Sobral et al., 2001).

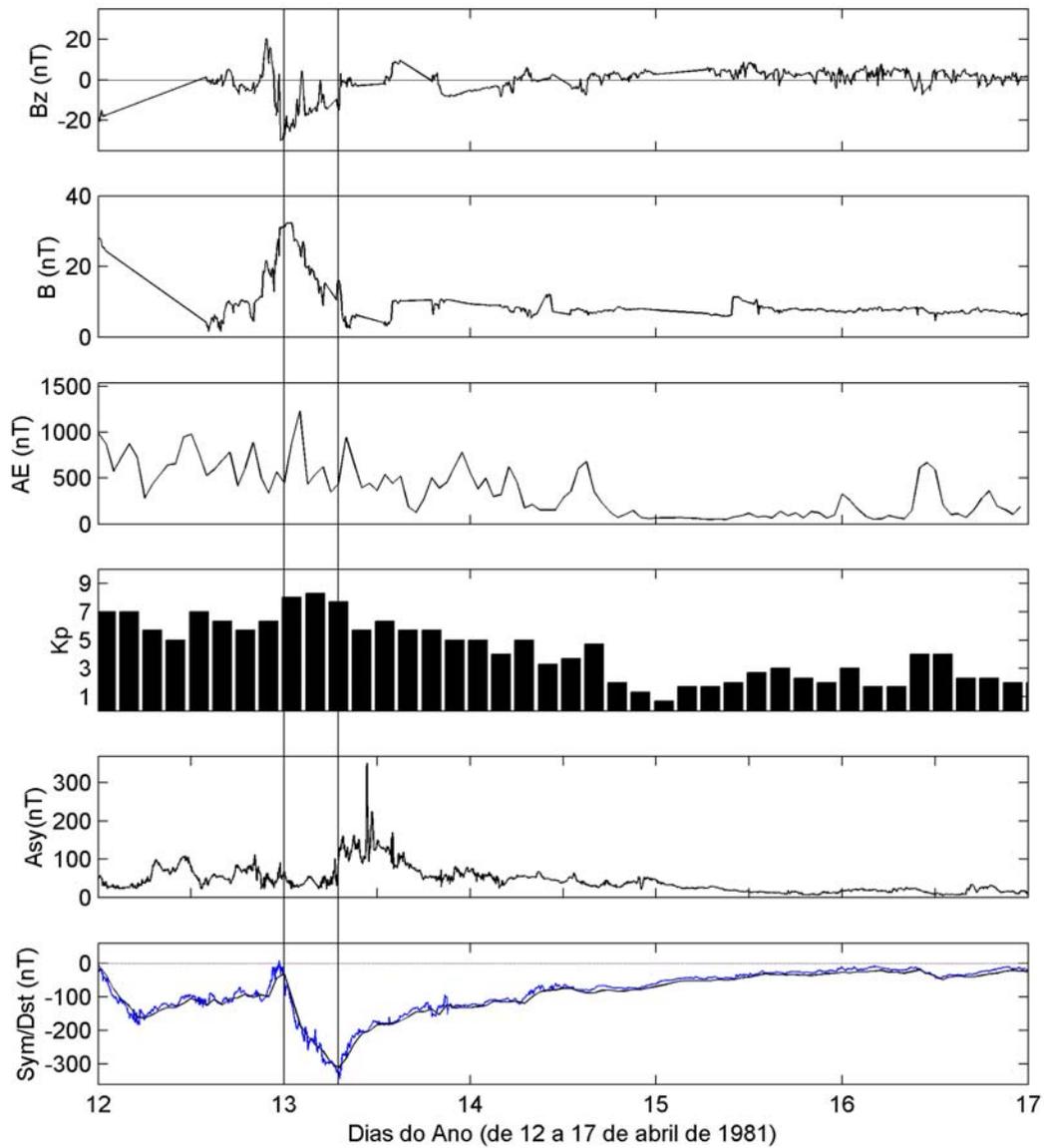


FIGURA 3.4 – Do topo à base são apresentados o componente B_z e magnitude B do IMF observadas pelo satélite ISEE-3. Índices geomagnéticos K_p , AE, Asy e Sym (os três últimos são dados em nT). Os índices foram obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (K_p e Dst), mostrando a geofetividade das estruturas que causaram a tempestade muito intensa do dia 13 de abril de 1981.

3.2 Tempestade de 12 a 16 de março de 1989

Foi observada uma explosão solar do tipo X4.5/3B, na latitude 32° Norte e 22° Sul da superfície solar, no dia 10 de março, e a esta explosão, provavelmente, estava associada uma CME, que causou a atividade magnética que se seguiu. Nas proximidades da Terra, conforme se visualiza na Figura 3.5, dois choques foram identificados no dia 13 de março, marcados pelo aumento de B . Foi o maior evento registrado no ciclo solar 22, com um índice Dst não-corrigido pela pressão de $-600 nT$ como valor de pico negativo. Ocorreu durante um longo período de intensa atividade solar que se prolongou por mais de duas semanas (de 6 a 19 de março), tendo importantes conseqüências na Terra. Segundo *Tsurutani et al.* (1999c), a região da bainha bem complexa que se formou à frente de uma nuvem magnética, resultou em uma tempestade de três etapas. *Vieira et al.* (2001) mostraram que há uma considerável porcentagem de eventos com três etapas causados por nuvens magnéticas.

Devido à alta intensidade da tempestade, os instrumentos foram saturados e não se pôde ter uma idéia das características interplanetárias, principalmente do componente B_z , que foi responsável pelas três injeções de energia, e nas conseqüentes três etapas durante a fase principal da tempestade. Por isso os gráficos não estão tão visíveis e não se pode fazer uma comparação minuciosa da causa das estruturas B_S . Da mesma forma, a Figura 3.6 mostra que não foi possível avaliar a entrada e a conseqüente dissipação de energia, por causa da saturação dos equipamentos na decorrência do evento.

Observando-se a Figura 3.7, é possível perceber que o índice K_p , nas primeiras horas do dia 13, cresceu rapidamente de valores próximos de 3 para valores entre 8 e 9. Da mesma forma, o AE cresceu após o IS do dia 13 até um máximo superior a $1000 nT$ em poucas horas. Mas tanto AE quanto K_p parecem ter saturado durante a fase principal, que foi lenta e duradoura – aproximadamente 24 horas de injeção de energia na corrente de anel.

Durante o dia 13 de março, grandes flutuações foram observadas no componente H do campo geomagnético, sendo que algumas destas flutuações coincidem com a extrema compressão observada pelo satélite GOES-7, mostrando que durante alguns períodos do

dia 13 a magnetopausa, tipicamente localizada à distância de $10 R_E$, foi comprimida até $6.6 R_E$ (Allen *et al.*, 1989).

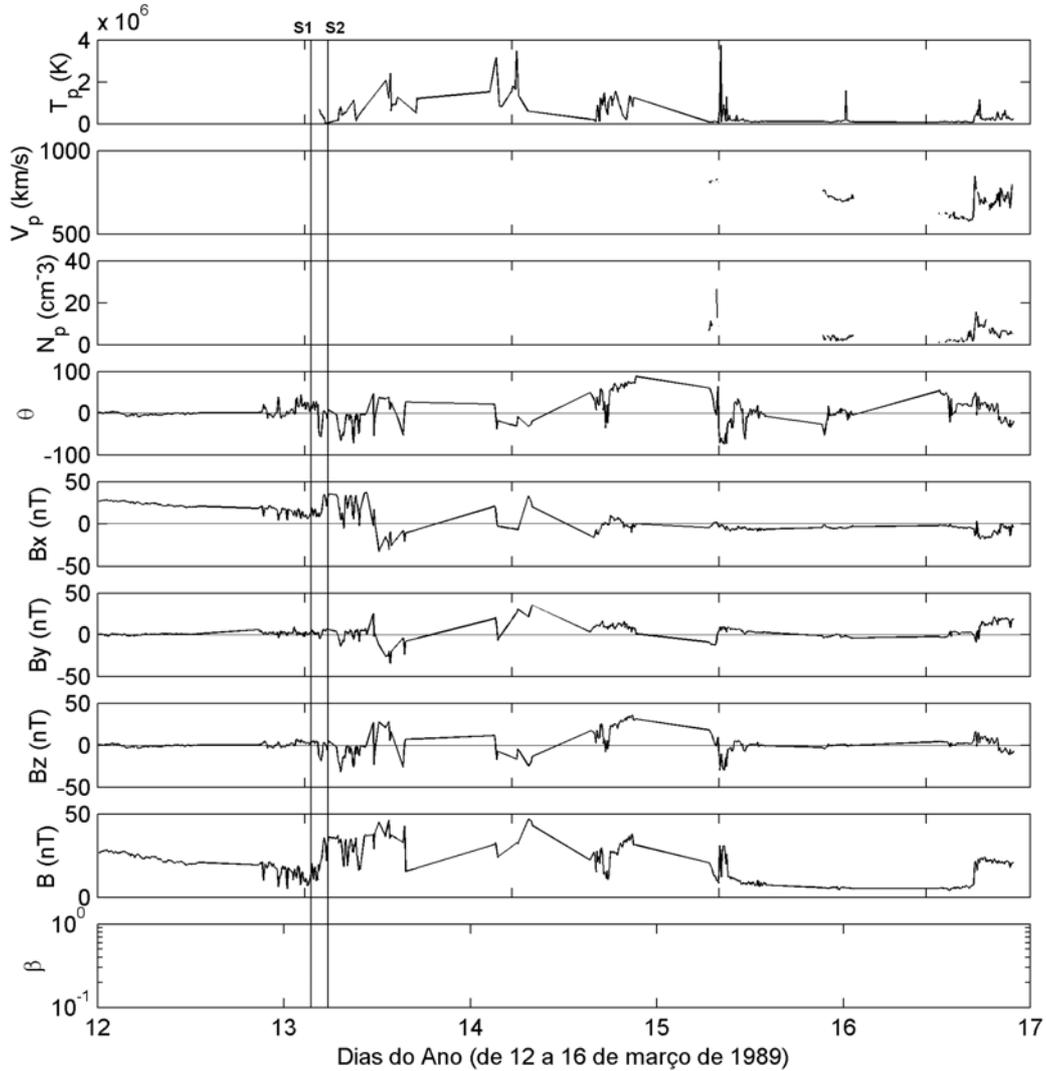


FIGURA 3.5 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 14 de março de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos durante o período avaliado.

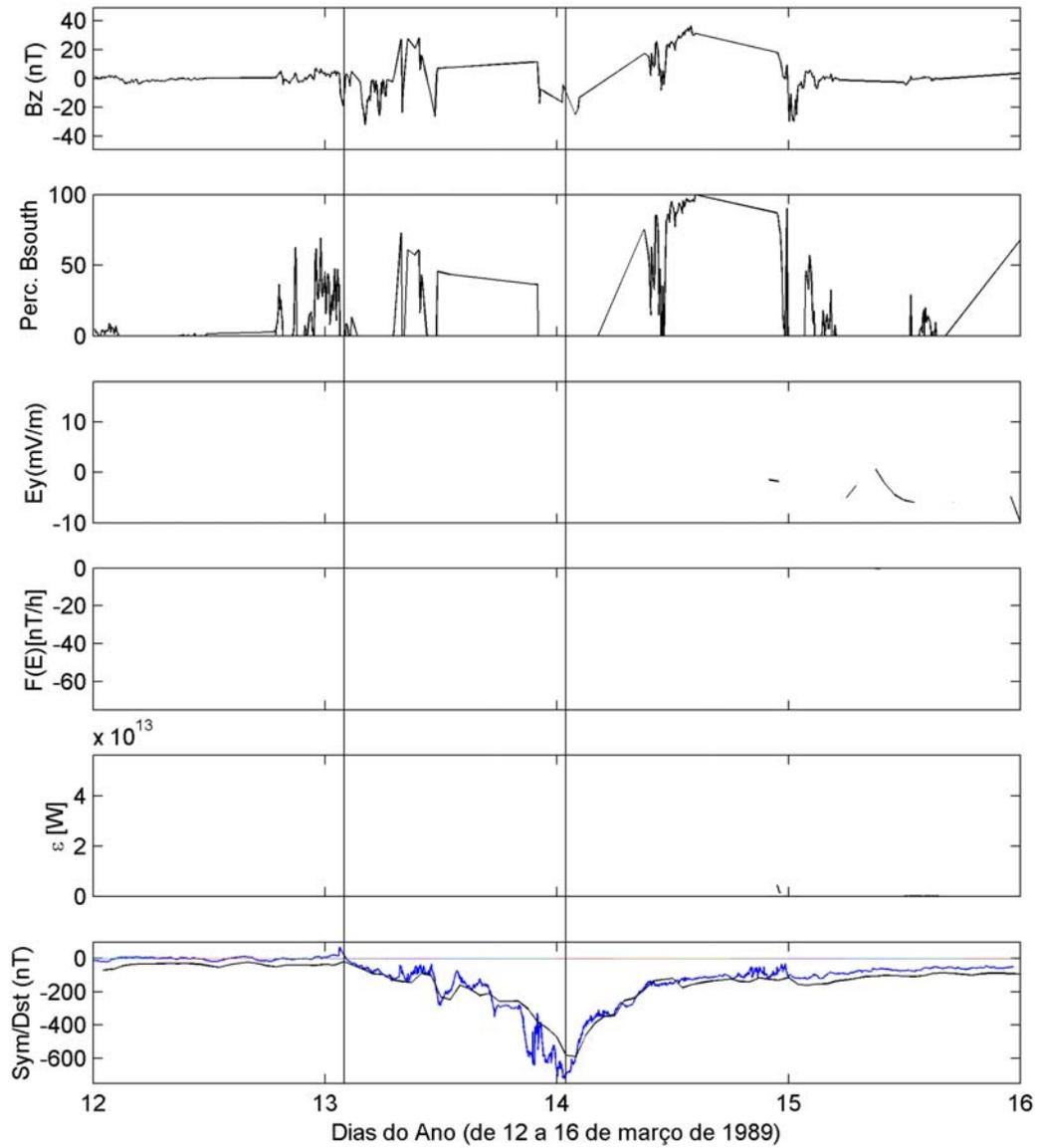


FIGURA 3.6 - IMF- B_z , campo elétrico E_y e funções de injeção de energia na corrente de anel e na magnetosfera, dadas, respectivamente, por $F(E)$ e ε , para o evento de 14 de julho de 1982. As falhas nos dados não possibilitaram o cálculo de algumas das funções, como se observa acima. As linhas verticais localizam a fase principal da tempestade.

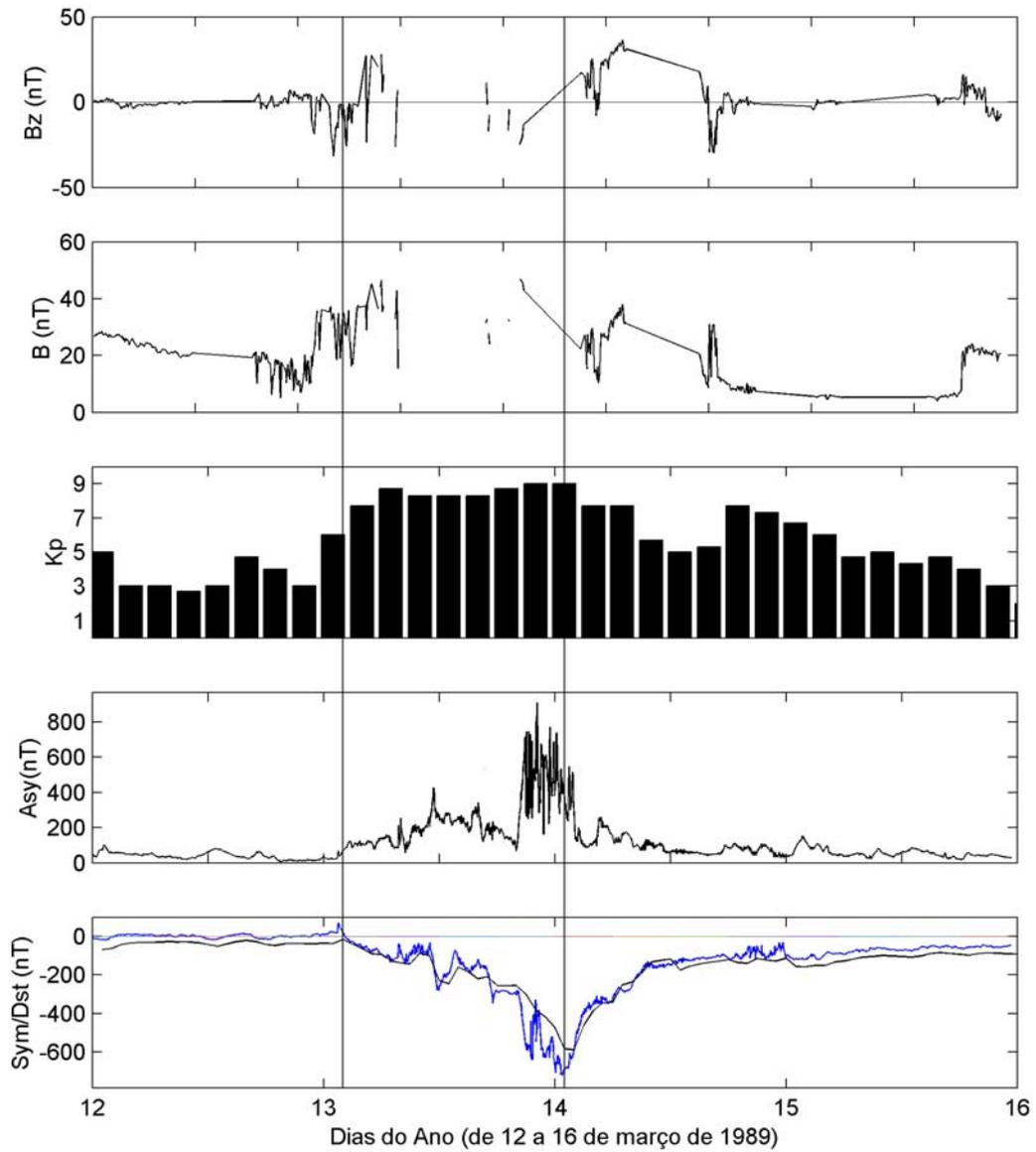


FIGURA 3.7 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 14 de março de 1989. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE (em nT), o K_p (em escala logarítmica) e o *Asy*, o *Sym* e o *Dst* (em nT).

3.3 Tempestade de 19 a 23 de outubro de 1989

Esta tempestade foi principalmente marcada por uma fase principal de várias etapas, além de ter sido precedida por uma tempestade moderada (~ 70 nT) no dia 19 de outubro, que se recuperou monotonicamente em 3 dias. A liberação de energia para a aceleração de prótons altamente energéticos – em torno de 500 MeV – foi causada pelas explosões solares que se seguiram durante o período estudado para a tempestade, caracterizando o evento de partículas energéticas de origem solar (PES).

Três eventos solares tiveram origem na região ativa¹ (RA) 5747, localizada na parte frontal do Sol, a $\sim 25^\circ$ Sul: um deles ocorreu no dia 19 de outubro, às 12h29min UT, $\sim 9^\circ$ Leste; o segundo, no dia 22 de outubro, às 17h08min UT (32° Oeste), e, por fim, o do dia 24 de outubro, às 17h38min UT, localizado em 57° Oeste.

A Figura 3.8 mostra que, na região atrás do primeiro choque, identificado às 9h16min UT do dia 20 de outubro, observou-se um aumento na magnitude do IMF, que ficou em torno de 35 nT, às 17h UT do dia 20 do mesmo mês (*Cane e Richardson, 1995*). A ordem da magnitude da energia das partículas mostra que o segundo choque foi mais energético do que o primeiro. A configuração do IMF foi bastante complexa depois do segundo choque que se formou, sendo responsável pela primeira injeção de energia na magnetosfera. Entre os dias 21 e 22 seguindo o primeiro par de choques, a temperatura dos prótons esteve bem abaixo do que seria normal esperar do vento solar em condições de expansão normal. Devido às falhas nos dados para o período avaliado, não se pode afirmar que se trata de uma nuvem magnética, porque não está visível a rotação lenta do campo magnético B_z .

¹ Região ativa (RA) é uma área na cromosfera solar de intenso calor e brilho. Aparecem no cinturão equatorial dentro das latitudes de $\pm 30^\circ$. Representam regiões de fluxo magnético moderado com campos médios de 10^7 nT (*Priest, 1943*).

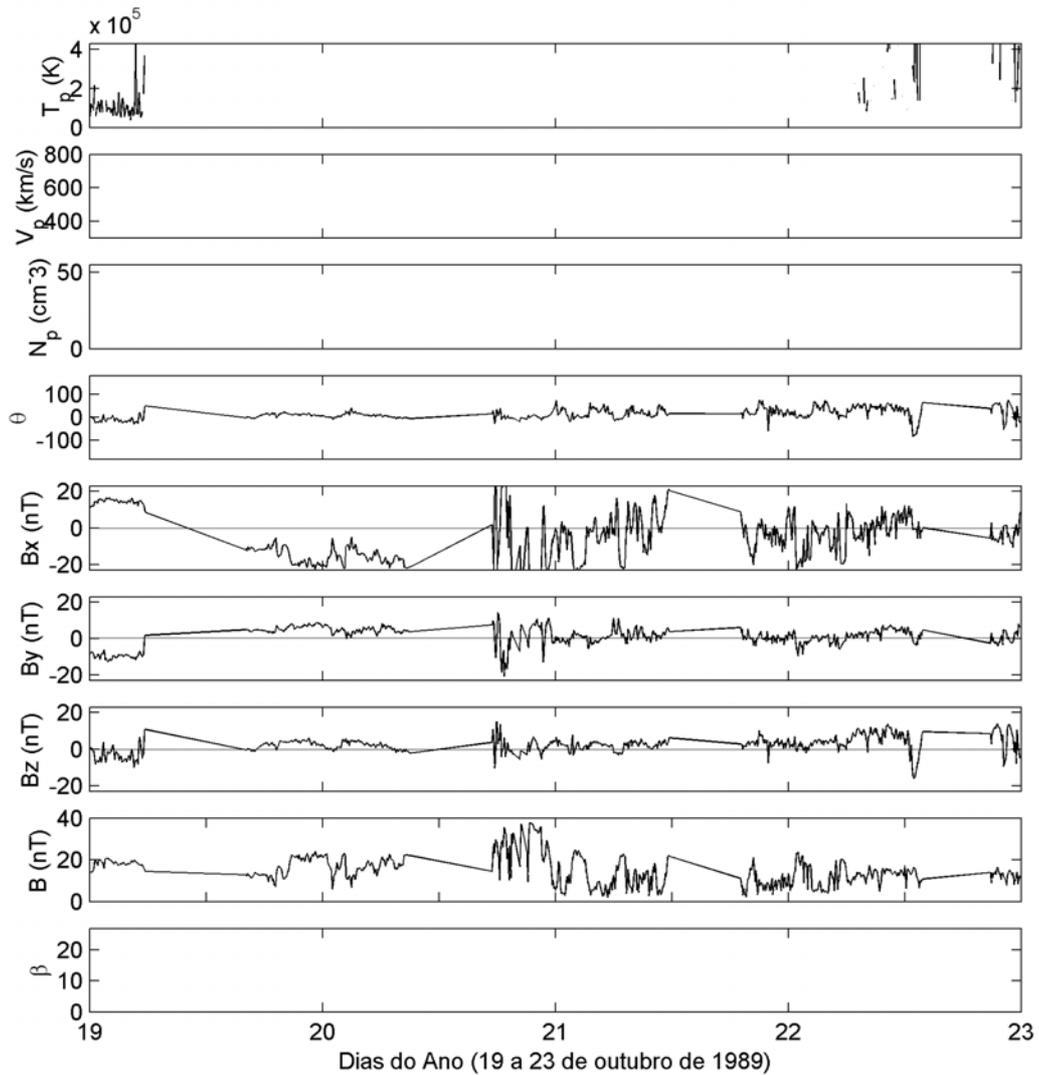


FIGURA 3.8 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 21 de outubro de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p e a velocidade, V_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As falhas nos dados não possibilitam observarem-se as características dos choques.

Na Figura 3.9, os dados do satélite IMP-8 apresentaram falhas, percebendo-se que estes ocorreram justamente durante as principais injeções de energia na corrente de anel, o

que representa que os valores alcançados tanto para o campo B_z quanto para a velocidade e os demais parâmetros do meio interplanetário foram altos o suficiente para saturar os equipamentos, ou seja, a intensidade da tempestade foi grande. Para o parâmetro ε , não se pôde ter uma medida da quantidade de energia do vento solar que entrou na magnetosfera, porque os dados do vento solar não estão disponíveis para o período. Durante o intervalo em que há dados do campo elétrico E_y , no OMNI, foi possível prever o quanto de energia estava sendo dissipada na corrente de anel. Na primeira etapa da fase principal as medidas foram obtidas, mas durante a maior injeção, que levou à queda do Dst , característico desta tempestade, não se obteve dados.

Apesar dos dados do meio interplanetário não terem sido obtidos devido à saturação dos equipamentos, acredita-se que os valores atingidos, principalmente atrás do choque, tenham sido grandes, pois a tempestade foi caracterizada por um pico de Dst de -268 nT – o índice simétrico, Sym , chegou até -337 nT - e a duração da fase principal foi de quase dois dias. Na Figura 3.10, está claro que, durante esta última fase, o índice assimétrico, Asy , foi bastante intensificado, sendo que, entre as etapas nas quais a fase principal foi dividida, os valores foram substancialmente baixos. No dia 20, um fraco IS ocorreu, causado pelo primeiro choque, e, com ele, a resposta no índice K_p em torno de 5 e acima de 6 por um período superior a 45 horas; já no primeiro pico do Dst , o K_p ao valor 8, mesma quantidade alcançada durante o segundo pico. O índice do eletrojato auroral, AE, não pôde ser medido durante este período, provavelmente pela intensidade da tempestade que deslocou o eletrojato para regiões distantes das estações geomagnéticas das quais o AE é derivado.

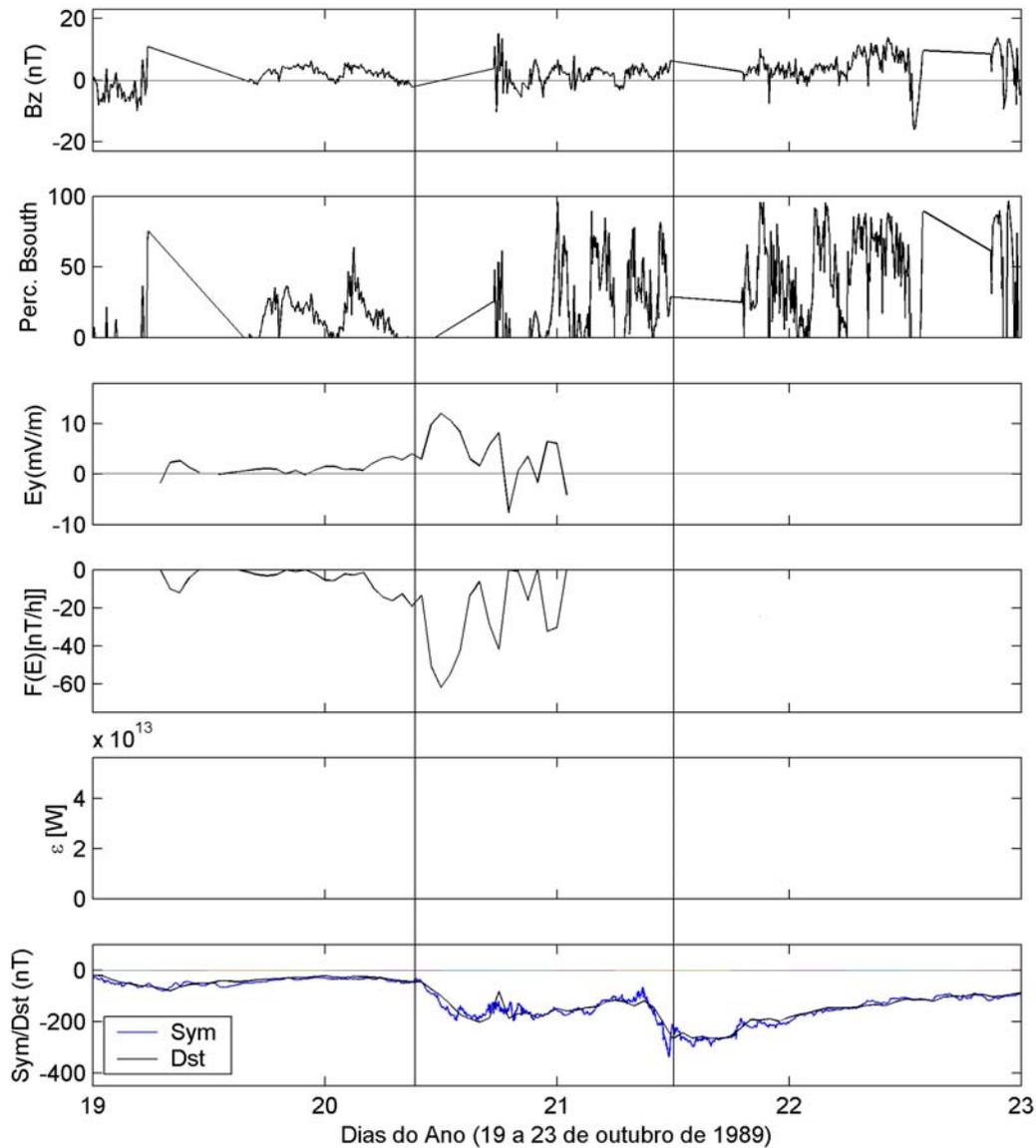


FIGURA 3.9 - Dados do plasma do vento solar e a resposta na corrente de anel para o evento de 21 de outubro de 1989. Para os dados de plasma, aparecem o IMF- B_z e o campo elétrico interplanetário, E_y . A função de injeção na magnetosfera, representada por ε , não pôde ser calculada durante o período, enquanto que a função de injeção na corrente de anel, $F(E)$, apareceu somente quando E_y foi avaliado através do site do OMNI. No último painel, os índices Dst e Sym mostram o comportamento da corrente de anel durante a tempestade. As linhas verticais identificam o início e o fim da fase principal da tempestade.

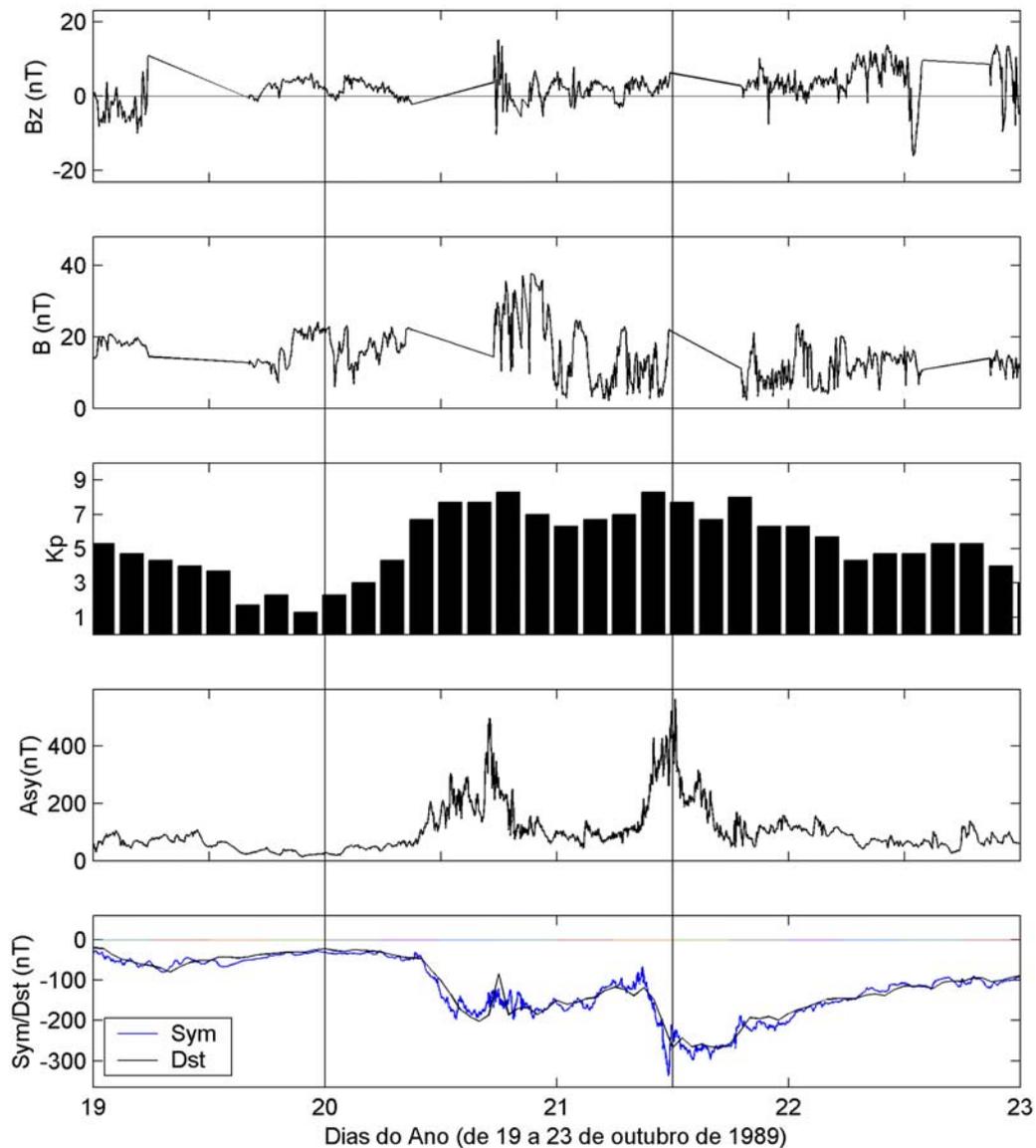


FIGURA 3.10 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 21 de outubro de 1989. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude B do IMF, e os índices K_p , em escala logarítmica, e *Asy*, *Sym* e *Dst*, dados em nT. O eletrojato auroral, medido através do AE, não foi observado para este período.

3.4 Tempestade de 16 a 20 de novembro de 1989

Os dados do campo magnético apareceram com muitas falhas, não sendo possível identificar a estrutura B_z que se formou atrás do choque. Ao observar-se a Figura 3.11 nota-se que o choque é somente visível a partir do aumento abrupto na magnitude de B . Como se observa na Figura 3.12, a não-observação dos dados do dia 17, impossibilitou o cálculo da injeção de energia e mesmo da perda de energia na corrente de anel, uma vez que o campo elétrico também não pôde ser medido.

A Figura 3.13 mostra que, com uma duração de mais de 13 horas, a fase principal foi precedida por um IS no dia 17, às 17h UT aproximadamente. Esta fase da tempestade foi identificada através do índice Sym , que se mostrou bastante oscilante. Na seqüência, a recuperação durou 2,5 dias. O índice K_p ficou acima de 7 por um período de mais de 21 horas, alcançando, no pico da tempestade, o valor 8. O índice Asy variou intensamente no período de maior intensidade da tempestade, caindo durante a fase principal e voltando a crescer novamente.

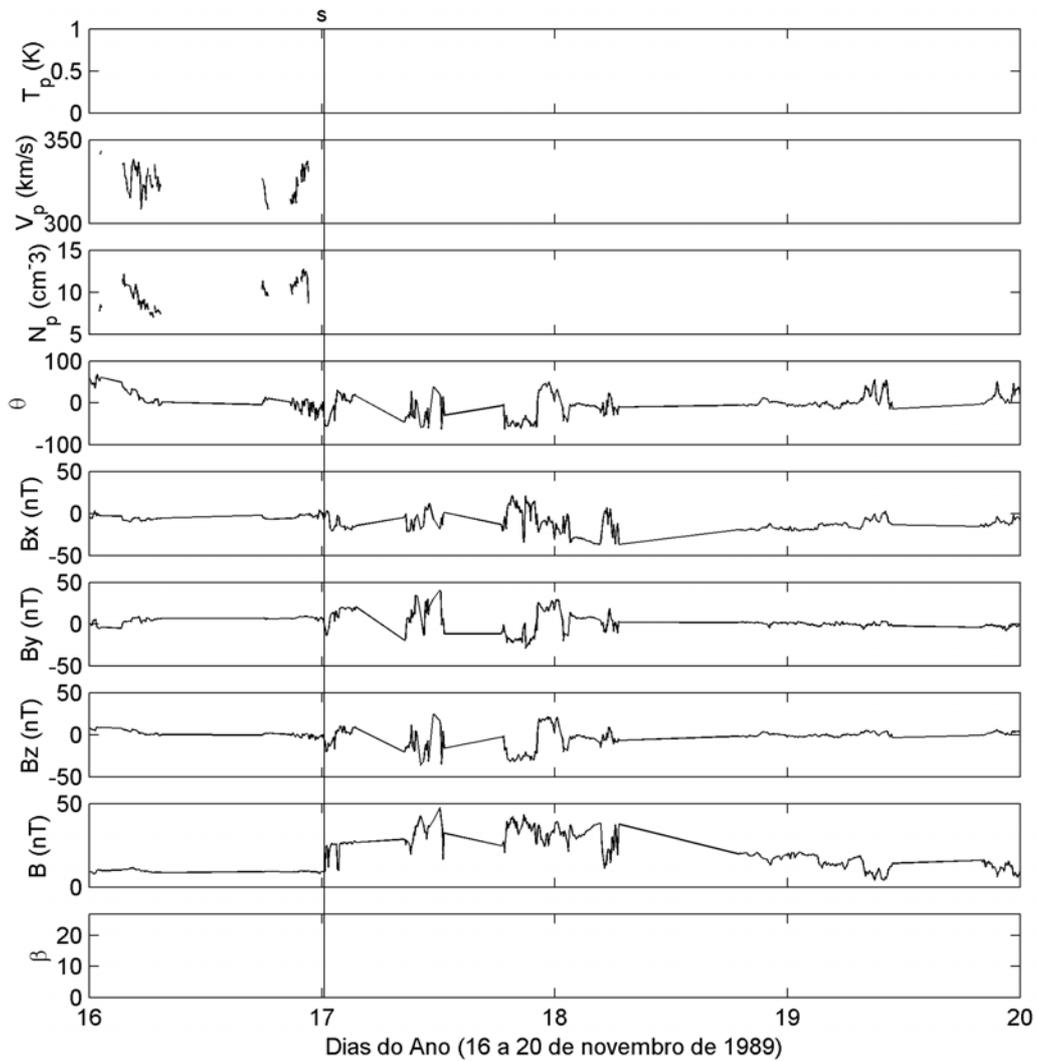


FIGURA 3.11 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 17 de novembro de 1989. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF. No último painel, o beta de plasma, β não foi calculado no período. A linha vertical identifica o choque ocorrido durante o período.

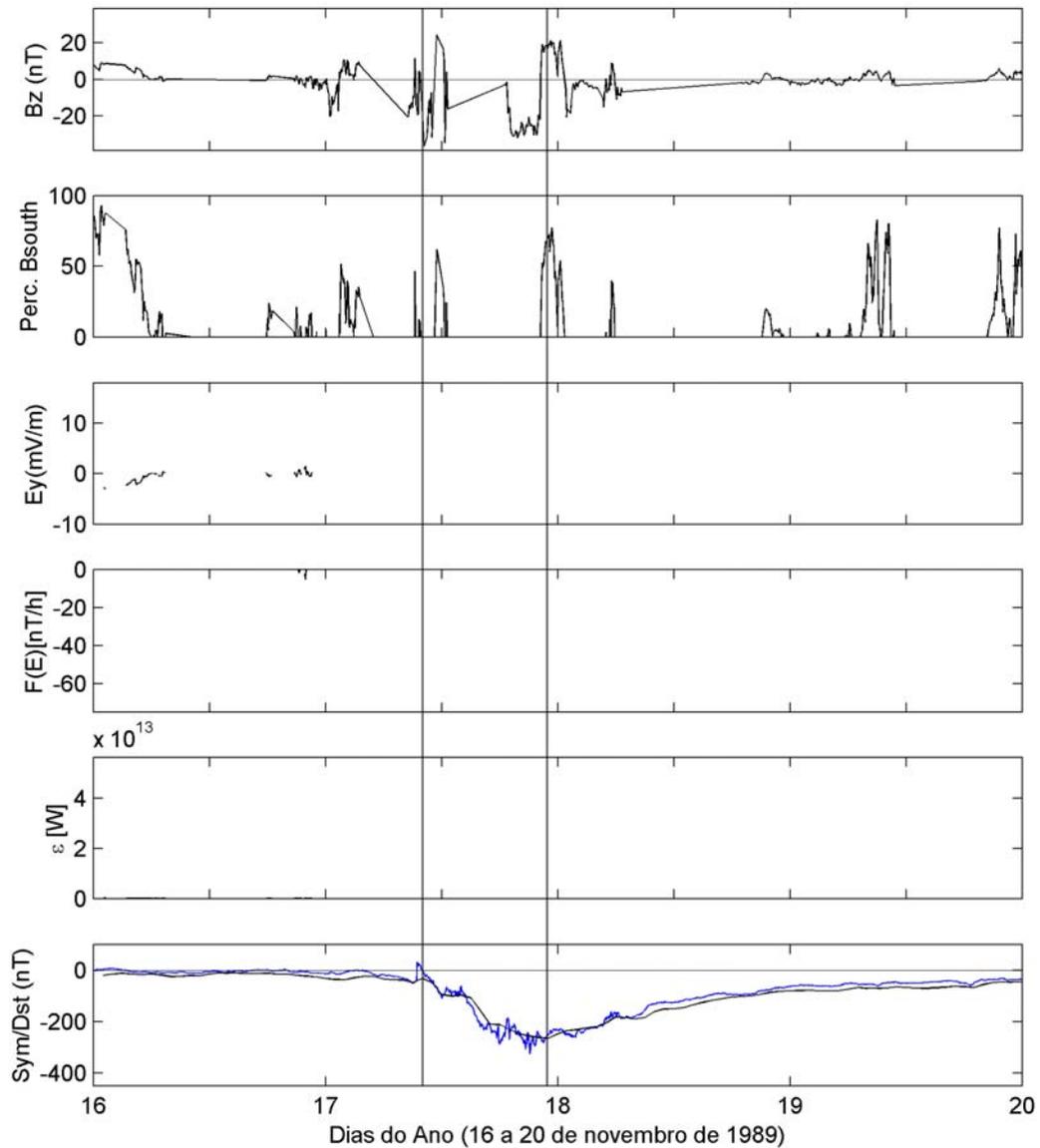


FIGURA 3.12 - Dados do plasma do vento solar e a resposta na corrente de anel para o evento de 17 de novembro de 1989. Para os dados de plasma, aparecem o IMF- B_z e o campo elétrico interplanetário, E_y . As funções de injeção na magnetosfera e na corrente de anel, representadas por ε e $F(E)$, não puderam ser avaliadas. No último painel, os índices Dst e Sym mostram o comportamento da corrente de anel durante a tempestade.

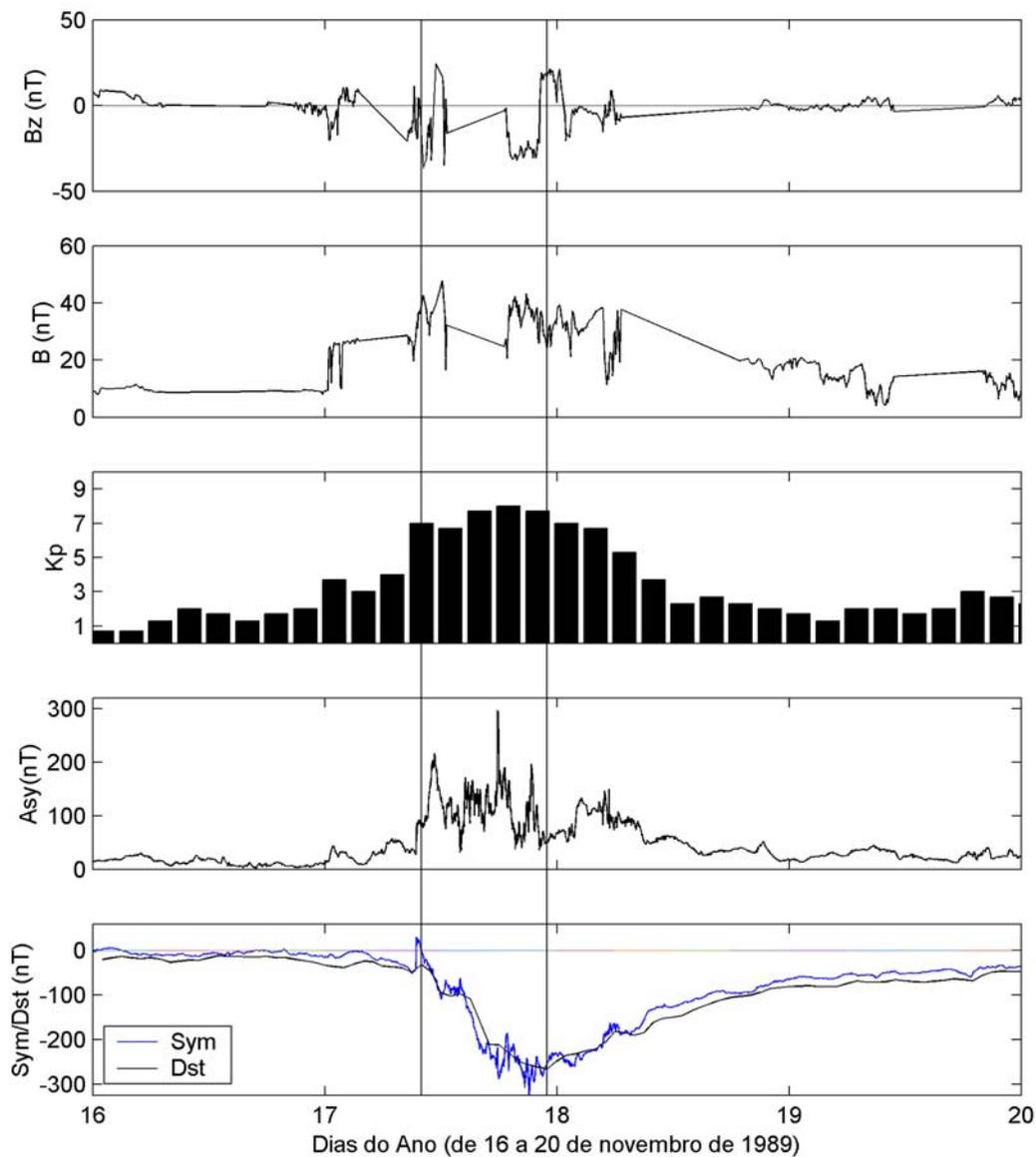


FIGURA 3.13 - Dados do campo IMF observados pelo IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 17 de novembro de 1989. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, o índice K_p e os índices AE, *Asy* e *Sym/Dst*, (dados em nT). As linhas verticais localizam a fase principal da tempestade.

3.5 Tempestade de 5 a 10 de abril de 2000

Conforme os gráficos mostrados na Figura 3.14, depois do choque, detectado no dia 6 de abril, às 16h04min UT, o componente B_z direcionou-se para o sul, e foi intensificado por causa de uma compressão na região da bainha - a principal causa da tempestade foi justamente os campos da bainha que foram comprimidos devido à alta pressão do vento solar - permanecendo com valores inferiores a -20 nT por um período de mais de 6 horas, aumentando o tempo de injeção de plasma para dentro da magnetosfera. Com isso, a energia da corrente de anel foi intensificada e respondeu com um Dst com valores grandes e negativos até atingir um pico em -321 nT. A magnitude do campo magnético aumentou de 7 para 25 nT através do choque (*Huttunen et al.*, 2002; *Watari et al.*, 2004).

De acordo com as observações solares, feitas a partir do LASCO e do EIT, ocorreram quatro eventos no Sol que foram precursores ao evento geomagnético. O primeiro foi o desaparecimento de um filamento – os filamentos 25° Norte e 55° Oeste desapareceram durante o período de 14h41min às 15h35min UT do dia 4 de abril. Logo após, uma explosão solar foi detectada, entre 15h11min e 17h24min UT, e, em seguida, outra explosão solar em raios X, entre 15h12min e 16h05min UT. O início estimado para a CME, que surgiu no limbo oeste do Sol, expandindo-se a uma velocidade de 1927 km/s, foi às 16h32min UT. O choque causado pela propagação desta estrutura comprimiu a magnetosfera terrestre no dia 6 de abril (*Huttunen et al.*, 2002). Esta pode ser a justificativa para que nenhuma ejeção fosse observada depois do choque, nem mesmo a presença de feixes interagindo com a CME (*Balmaceda et. al.*, 2003; *Dal Lago et al.*, 2004b).

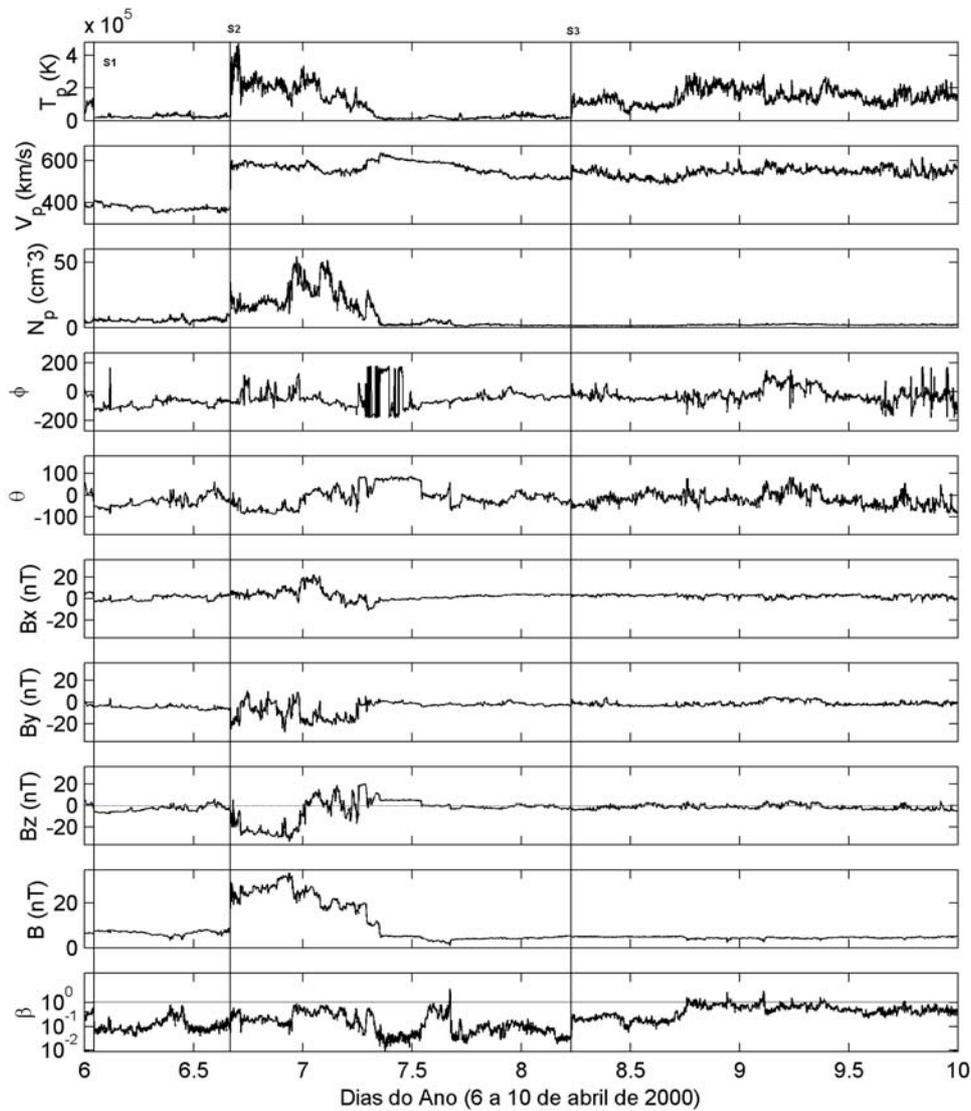


FIGURA 3.14 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo ACE caracterizando a tempestade de 6 de abril de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os três choques ocorridos neste período.

De acordo com o que se observa na Figura 3.15, durante os principais períodos de injeção de energia na corrente de anel para o evento de supertempestade magnética

pôde-se constatar que o máximo valor obtido para a taxa de energia do vento solar, obtida pelo parâmetro de acoplamento de *Perreault e Akasofu* (1978), foi de $2,12 \times 10^{13} W$, resultando, ao integrar-se sobre o tempo de duração da fase principal, em uma energia total de $1,9 \times 10^{17} J$, da qual $4,2 \times 10^{16} J$ foi direcionada para a corrente de anel, com uma taxa de dissipação calculada pela função de injeção, $F(E)$, com um máximo de $-98,38 nT/h$. Os gráficos das funções de injeção estão representados na figura, e a partir deles pode-se ter uma idéia do comportamento destas funções que influenciaram na dinâmica da corrente de anel durante a ocorrência do evento.

Durante a fase principal desta tempestade, tanto a magnetosfera como a ionosfera ficaram altamente perturbadas, com atividade em toda a região auroral. A maior parte desta atividade não foi de subtempestade, no sentido de que ela não estava associada com evolução do eletrojato auroral na região polar e a Oeste, mas, sim, foram guiando perturbações devido às variações nas características do vento solar. A fase principal desta tempestade teve uma duração de aproximadamente 6 horas, durante a qual se observou uma evolução da corrente de anel, guiada pelo forte aumento da convecção, levando a um pico no índice *Dst* de $-288 nT$.

As correntes geomagneticamente induzidas foram fortemente intensificadas durante vários períodos. Enquanto algumas das atividades estavam associadas com somente subtempestade ou com a evolução do eletrojato, outras foram causadas por atividades de eletrojato de curta duração (*Huttunen et al.*, 2002). Pode-se visualizar pela Figura 3.16, que, durante a tempestade, o índice AE que alcançou um pico de aproximadamente $2.500 nT$, ou seja, a resposta foi bem representativa; o índice K_p ficou em torno de 8, mas teve um pico de 9. fora da fase principal da tempestade. O índice A_{sy} também apresentou maior presença durante a fase de recuperação. Todas estas características em termos da atividade geomagnética, para o evento de 6 de abril de 2000.

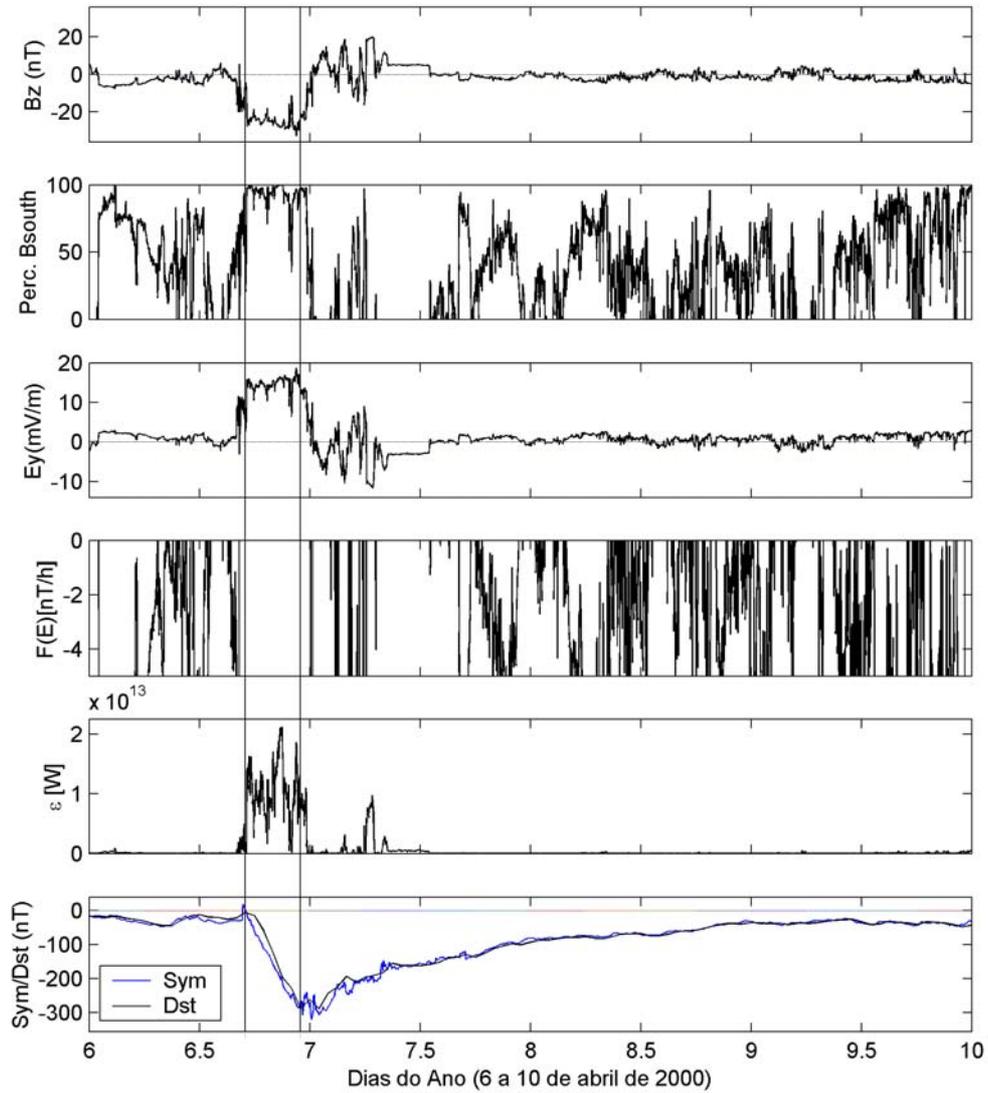


FIGURA 3.15 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S do campo total é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 6 de abril de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. A fase principal está localizada entre as linhas verticais.

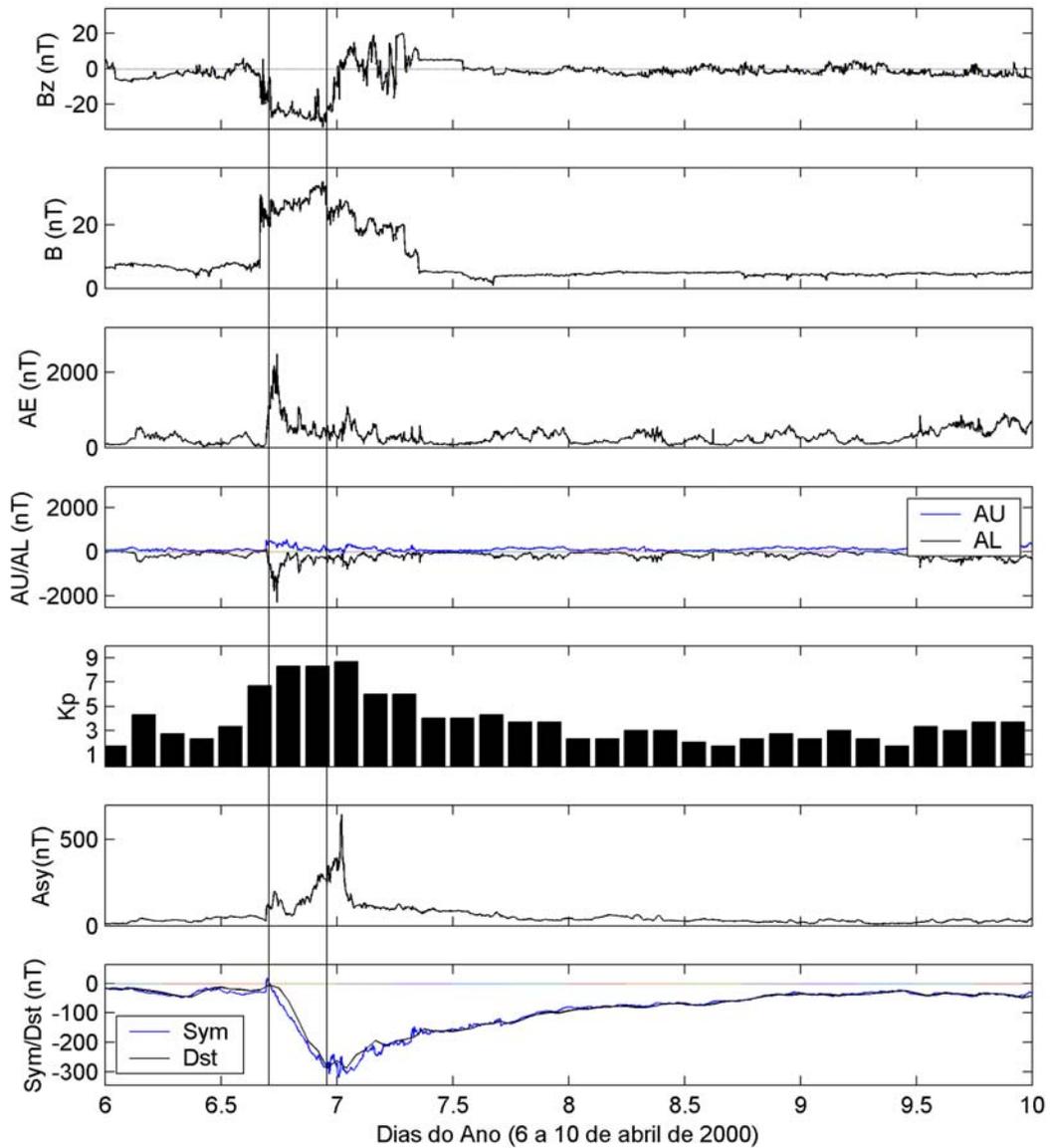


FIGURA 3.16 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 6 de abril de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

3.6 Evento de 13 a 18 de julho de 2000

Este evento é bem conhecido devido ao período em que a atividade solar atingiu seu pico, o que o tornou conhecido como o ‘evento do Dia da Bastilha’. Vários choques foram observados nestes dias em consequência da propagação de ICMEs no espaço interplanetário. No total, foram três choques, três nuvens e quatro ICMEs observadas pelo ACE nos seis dias de intervalo (*Smith et al.*, 2001). Em particular, uma CME foi observada pelo SOHO/LASCO no dia 14 de julho, estando relacionada à explosão solar detectada pelo instrumento EIT, no mesmo dia, às 10h24min UT, na posição heliográfica 17° Norte e 1° Leste da RA 9077 (*Dal Lago et al.*, 2004b).

Na Figura 3.17, pode-se observar o momento em que alguns dos choques do período foram detectados, além das variações causadas nos parâmetros do plasma do vento solar. O primeiro choque ocorreu às 11h23min UT do dia 11 de julho, e, logo atrás, a nuvem iniciou às 0h0min UT do dia posterior, e terminou às 0h do dia 13. Depois disso, a ICME iniciou às 2h UT do dia 12 e terminou às 4h UT do dia 13. Causando abruptas alterações nos dados do vento solar, o segundo choque começou às 9h19min UT do dia 13, e foi somente precedido de uma ICME, que começou às 13h UT do mesmo dia, e terminou às 11h UT do dia posterior. O terceiro choque interplanetário veio em anúncio a duas estruturas: duas ICMEs, sendo que uma delas era uma nuvem magnética. As estruturas iniciaram, respectivamente, às 17h UT do dia 14 e às 14h UT, e terminaram, nos respectivos tempos, medidos em UT, de 6h e 14h. O último choque novamente trouxe uma ICME/nuvem magnética e uma ICME/não-nuvem magnética, que coincidiram no tempo inicial – ambas começaram às 19h UT do dia 15 – e terminaram às 19h UT do dia 15 e às 12h UT do dia 16, respectivamente (*Smith et al.*, 2001). É importante notar que os choques aqui identificados estão visíveis somente nos dados do campo magnético uma vez que o detector de plasma a bordo do satélite ACE sofreu uma saturação devido às partículas aceleradas pela explosão solar.

As estruturas que levaram à ocorrência da tempestade foram, principalmente a região da bainha, formada atrás do terceiro choque, que levou a flutuações de B_z da ordem de -35 nT em conjunto com a ICME, que durou aproximadamente um dia. B_z variou de

positivo para negativo, sendo que a fase negativa foi de aproximadamente 6 horas e o mínimo de B_z neste tempo, de aproximadamente -55 nT .

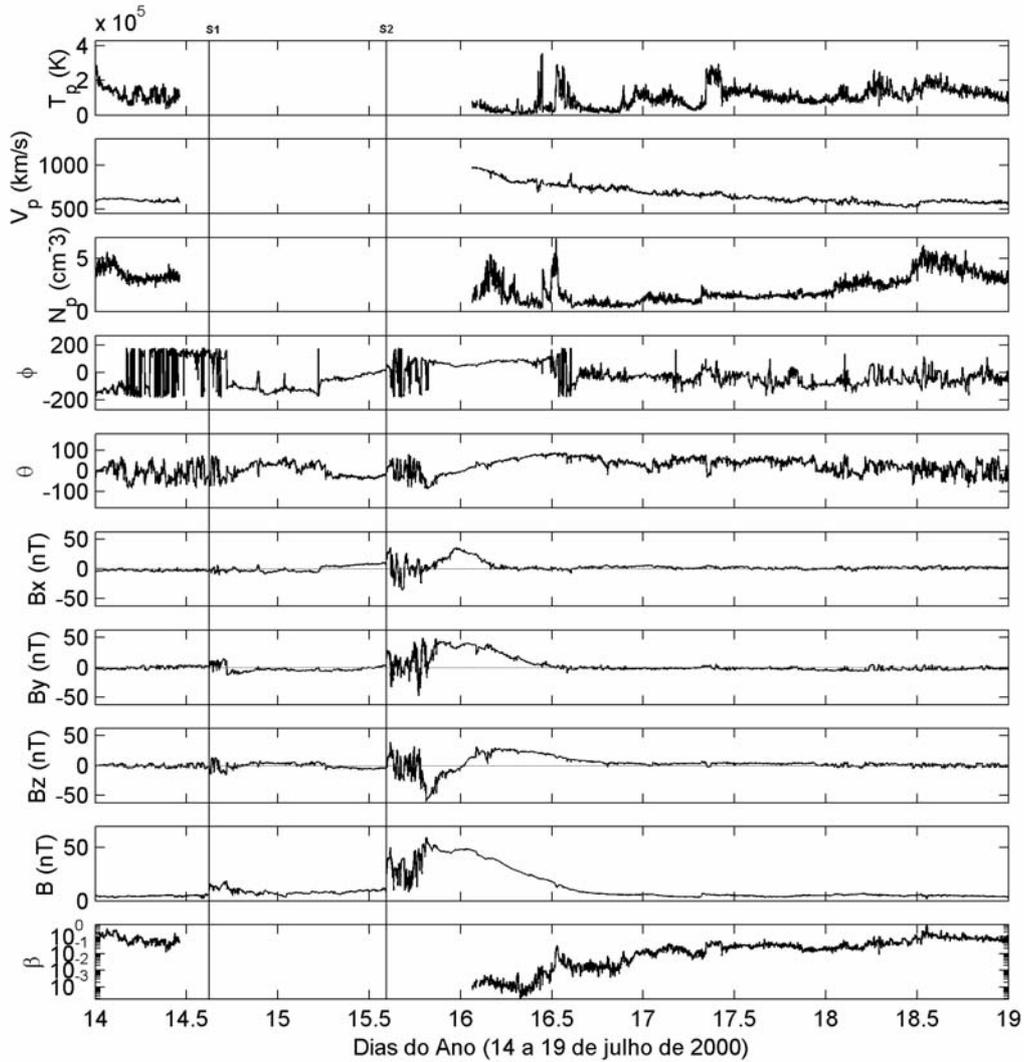


FIGURA 3.17 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 16 de julho de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por ultimo, o beta de plasma, β . As linhas verticais representam os choques S1 e S2, detectados durante o evento.

Observa-se, pela Figura 3.18, que o parâmetro epsilon não pôde ser calculado com precisão durante a fase principal da tempestade por causa das falhas nos dados, e, assim, não se tem uma estimativa da energia do vento solar que entrou na magnetosfera, nem ao menos da energia que foi dissipada para a corrente de anel. A saturação dos equipamentos foi causada pela alta intensidade dos parâmetros de plasma do vento solar, característicos do evento muito intenso.

Ao mesmo tempo em que a magnitude do IMF, B , alcança valores elevados, o campo magnético torna-se sul, atingindo um pico negativo de -59 nT , e, por um longo período de tempo, supera os -30 nT . Com isso, o processo de reconexão e a posterior atividade geomagnética foram favorecidos, resultando em um valor de -300 nT de pico do índice Dst . A temperatura de prótons também foi caracteristicamente baixa dentro da estrutura, e a velocidade dos prótons chegou a valores maiores que 1100 km/s , como se pôde ver na Figura 3.17 (Jordanova et al., 2001).

A compressão magnetosférica causada pelos choques resultou em uma variação no índice K_p bem como no índice AE, que teve uma alta atividade de subtempestade, conforme se observa na Figura 3.19. O que se observa é que a atividade na região auroral mostrou-se mais intensa na fase principal e em torno desta. O índice AE alcançou seus máximos valores em torno dos 3000 nT , um valor muito alto para o eletrojato auroral. Mais ou menos um dia antes da supertempestade, a figura mostra que o índice AE ficou pouco abaixo dos 2000 nT por um determinado período. A mesma resposta foi observada na região sub-auroral, onde o índice K_p apresentou valores em torno de 6 e 7 por volta do dia 15 de julho, e valores mais altos (entre 7 e 9) durante a fase principal da tempestade. Depois disso, na fase de recuperação, o índice K_p diminuiu consideravelmente, assumindo valores abaixo de 5.

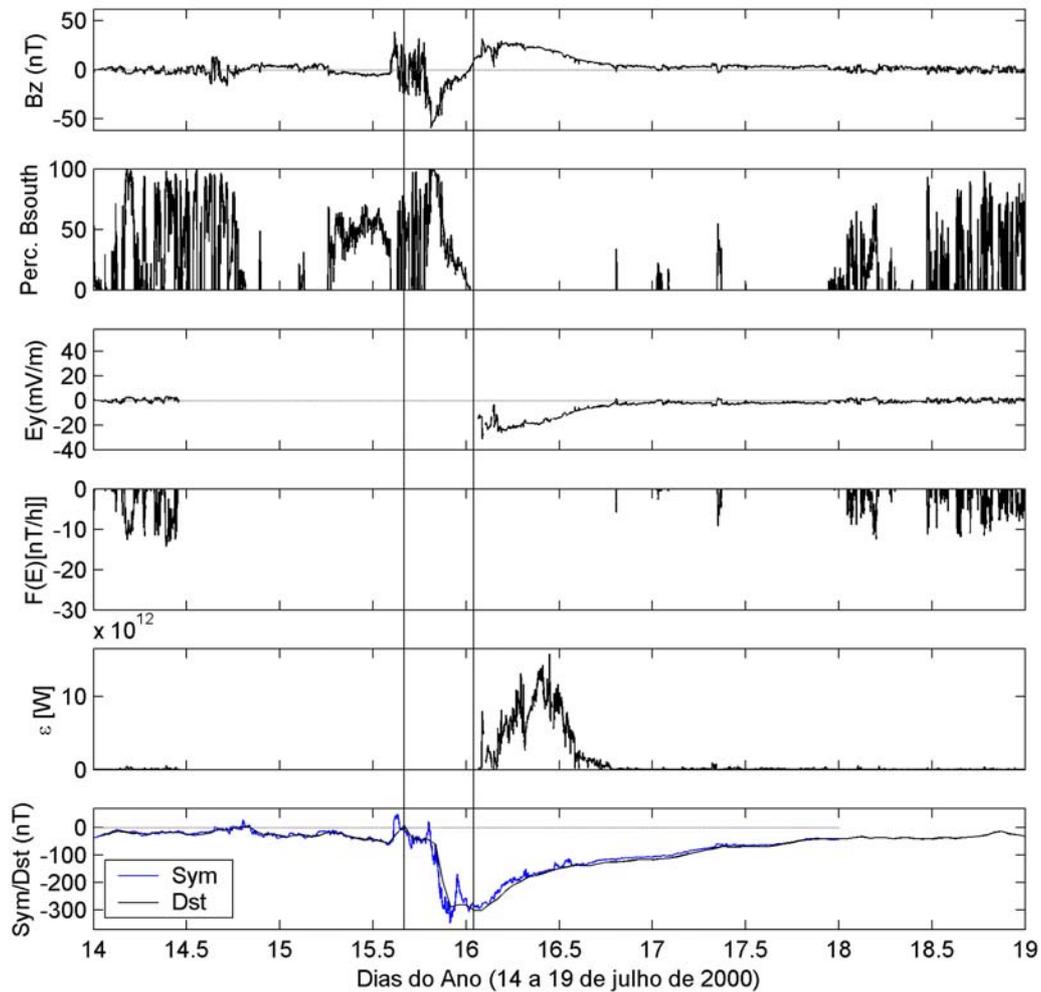


FIGURA 3.18 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante toda a tempestade de 15 de julho de 2000, por causa das falhas nos dados do vento solar. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal.

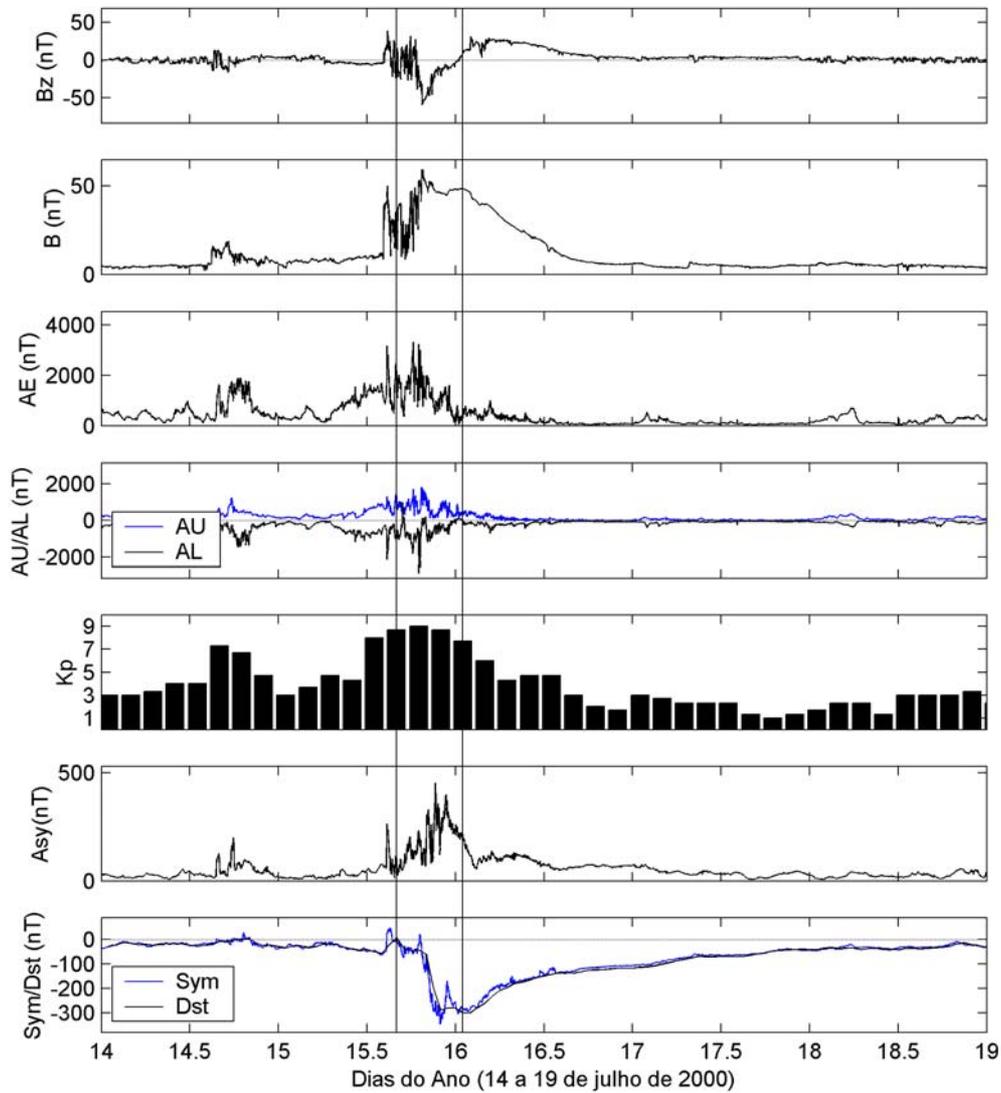


FIGURA 3.19 - Dados do campo IMF observados pelo ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 15 de julho de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT , além do K_p , do *Asy* e do *Sym/Dst* também dados em nT . As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal.

3.7 Tempestade de 5 a 10 de novembro de 2001

Na Figura 3.20, observam-se quatro choques interplanetários, que foram identificados pelos instrumentos a bordo do ACE, durante o período da tempestade de novembro de 2001: um deles ocorreu às 1h55min do dia 5 de novembro; o segundo e o terceiro às 1h20min e às 19h10min, respectivamente, do dia seguinte, sendo que os dois primeiros foram frontais, e o último, reverso. O quarto choque, identificado às 4h03min UT do dia 9 de novembro, também foi reverso.

O segundo choque foi associado a uma ICME, que começou às 21h UT do dia 6, e terminou às 6h UT do dia 9 de novembro. Dentro da estrutura pode-se observar o beta de plasma baixo, e uma temperatura baixa de prótons, $2,5 \times 10^4 K$. A densidade do vento solar não ficou visível nos dados do ACE, conforme se observa na Figura 3.20 mas segundo *Tsurutani et al.* (2005), oscilou em torno de $\sim 18 \text{ cm}^{-3}$. O aumento na intensidade do IMF e uma rotação lenta do campo magnético B_z identificaram a ICME/nuvem magnética. Ao observar-se a velocidade da nuvem, que foi de $\sim 420 \text{ km/s}$, percebeu-se que se tratava de uma nuvem que se moveu lentamente (ver *Tsurutani et al.*, 2004 sobre discussão de propriedades de nuvens “lentas”), além da presença de campos magnéticos sem ondas de Alfvén com grandes amplitudes (*Tsurutani et al.*, 1988).

A interação que ocorreu entre o choque e a nuvem magnética repercutiu em uma grande atividade geomagnética. O campo magnético da nuvem, com direção-sul e valor estável de $\sim 7 \text{ nT}$, foi comprimido pelo choque, e chegou a valores próximos de -48 nT . Quando a magnitude do campo, B , atingiu um pico, aproximadamente 1h40min depois do choque, o componente B_z aumentou para $\sim 65 \text{ nT}$ e permaneceu com valores negativos até 3 horas após o choque. Tal campo levou a uma fase principal com um valor de pico do Dst de -277 nT – os campos B_z intensos e de longa duração estão sempre presentes nos eventos de supertempestades magnéticas (*Gonzalez e Tsurutani*, 1987; *Gonzalez et al.*, 1994). A duração da fase principal foi de ~ 11 horas, e, nesta fase, a energia do vento solar que entrou na magnetosfera não pôde ser avaliada em todo o intervalo por causa

das falhas nos dados do plasma do vento solar. Também a energia na corrente de anel não foi estimada, conforme é mostrado na Figura 3.21.

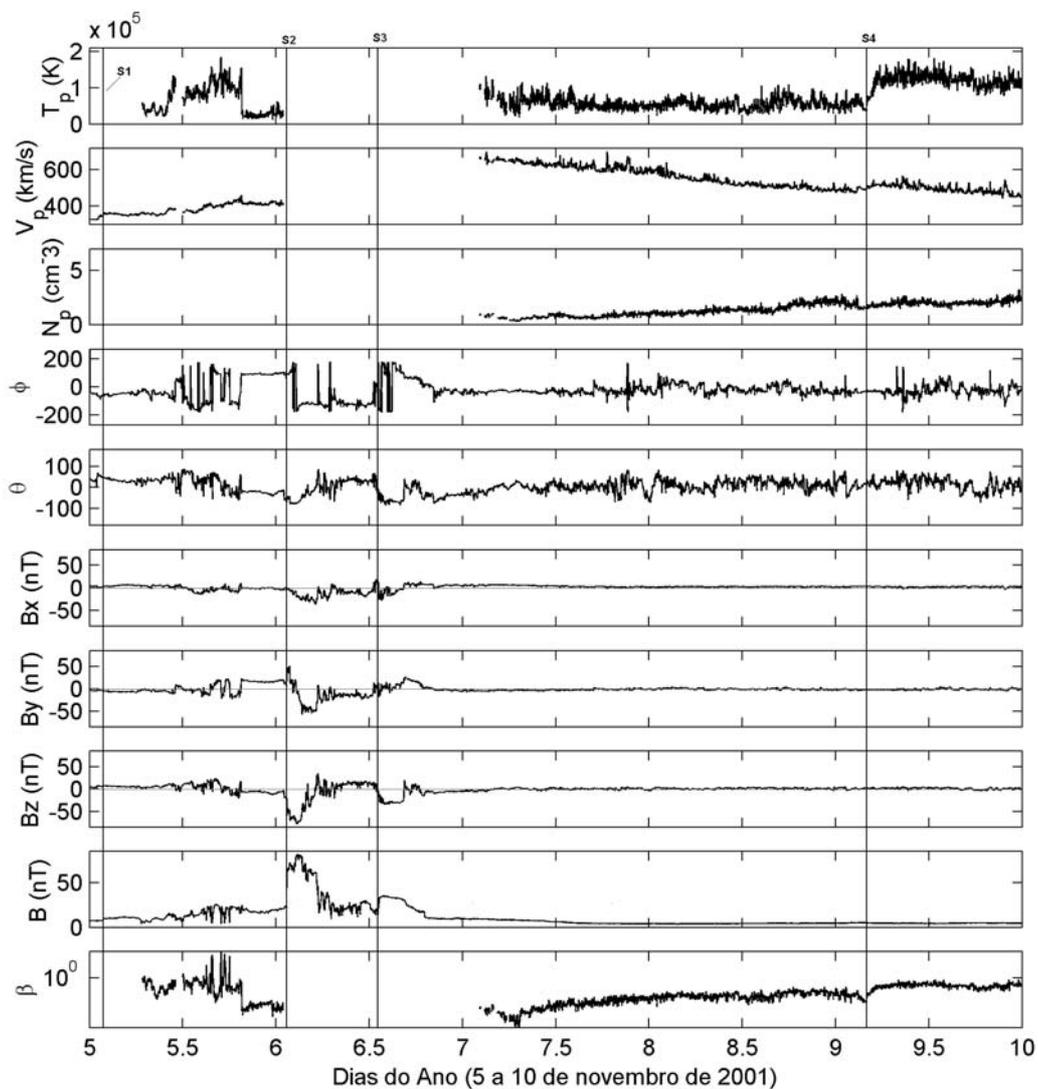


FIGURA 3.20 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 6 de novembro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas na vertical identificam os quatro choques ocorridos durante o evento.

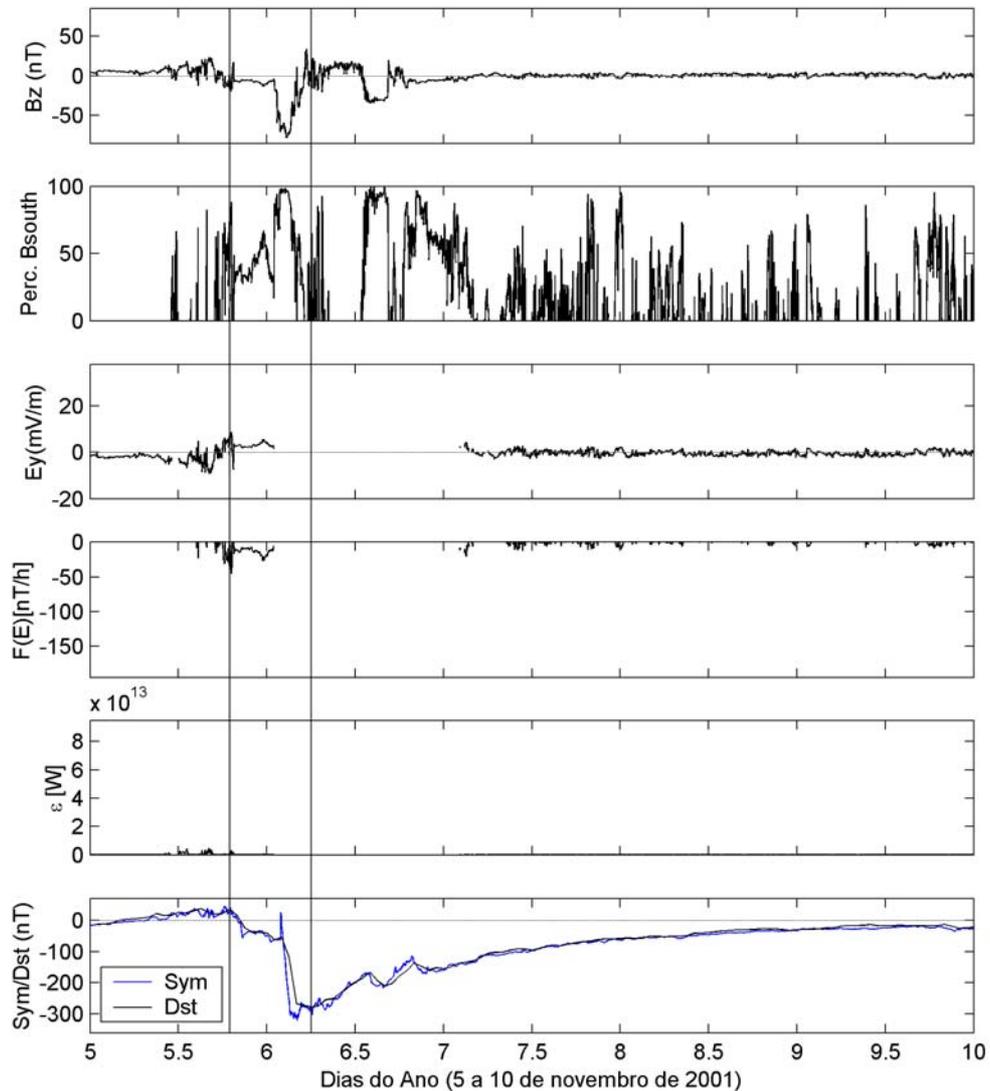


FIGURA 3.21 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S aparece na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , aparece somente em alguns períodos por causa das falhas nos dados de V_p e de B_z . As funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante a fase principal da tempestade de 6 de novembro de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

Além da tempestade do dia 6 de novembro, percebe-se que uma subtempestade ocorreu logo após o segundo choque. Tal evento foi caracterizado por um índice AE próximo aos 3000 nT , conforme de observa na Figura 3.22. *Zhou e Tsurutani* (2001) e *Tsurutani e Zhou* (2003) estudaram subtempestades que foram causadas por choques e sugeriram que a procedência pode ser da compressão dinâmica do choque ou o início súbito de um grande campo elétrico de direção *dawn-dusk* (amanhecer-anoitecer). Além do pequeno campo elétrico associado ao B_z , da nuvem magnética antes do choque, um outro campo elétrico iniciou à 1h20min UT no ACE e precisou de um tempo próximo a 34 minutos para chegar à magnetosfera, ou seja, à 1h54min UT alcançou a magnetopausa diurna (*Tsurutani et al.*, 2005).

A provável causa da tempestade está relacionada à explosão X1.0/3B, ocorrido no dia 4 de novembro, em RA 9684, na latitude heliográfica de 6° Norte e 18° Oeste, que resultou em uma CME no mesmo dia, observada por LASCO às 16h35min UT. Com uma velocidade média de 570 km/s , a ICME viajou durante 33,5 horas até passar pelo ACE.

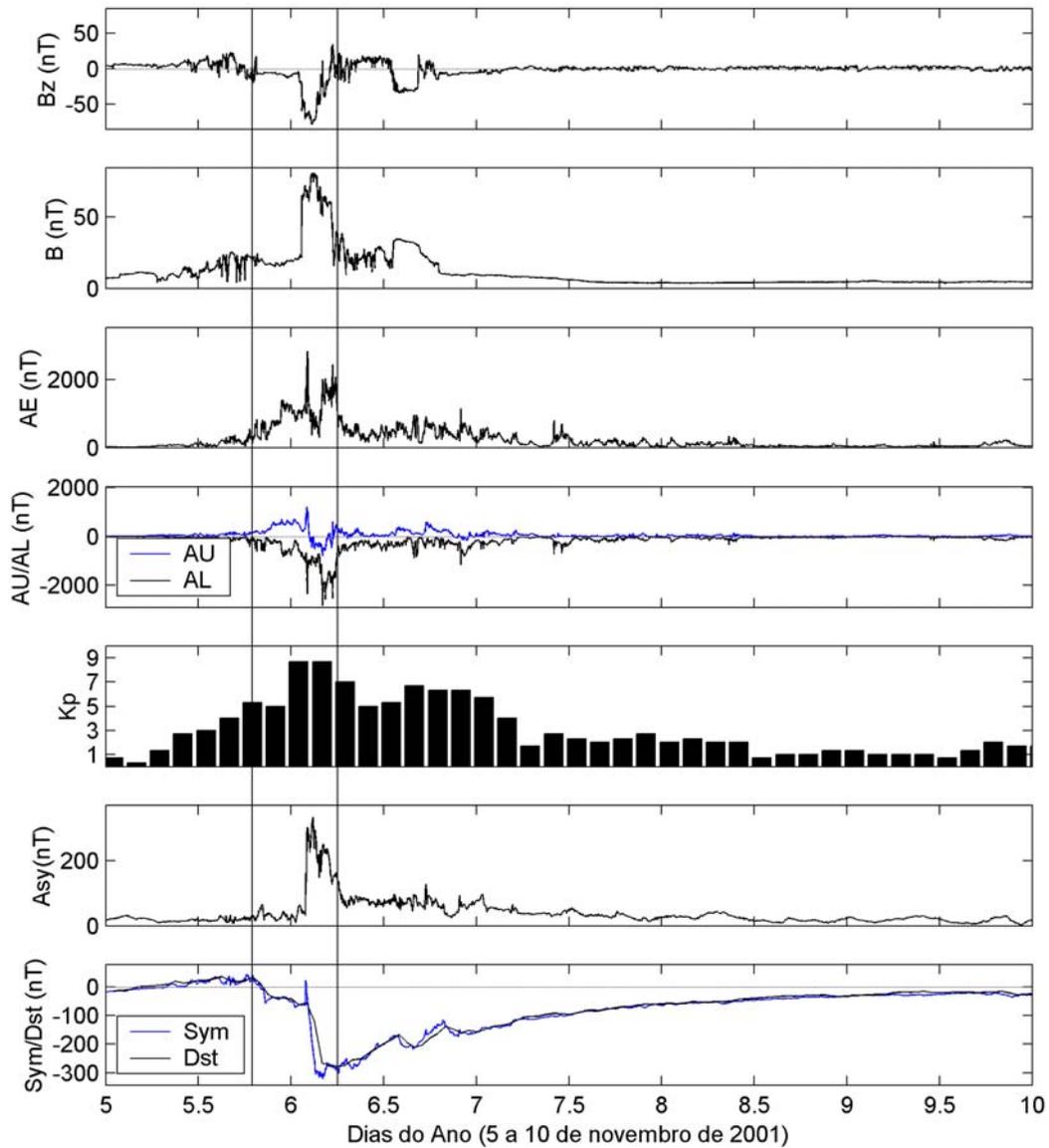


FIGURA 3.22 - Dados do campo IMF observados pelo ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 6 de novembro de 2001. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT , além do K_p , do *Asy* e do *Sym/Dst* também dados em nT . As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

CAPÍTULO 4

TEMPESTADES MAGNÉTICAS INTENSAS

Neste capítulo apresenta-se uma descrição dos eventos de tempestades magnéticas intensas. Mas antes de descrevê-las, é interessante entender um pouco das suas características e das principais condições interplanetárias que levam a sua ocorrência. *Gonzalez e Tsurutani* (1987) fizeram um trabalho visando encontrar um critério interplanetário que pudesse ser a causa comum para as tempestades intensas. No seu trabalho, utilizaram registros dos dados de plasma e de campo magnético do satélite ISEE-3 com o objetivo de determinar uma relação empírica para as causas interplanetárias das tempestades intensas ($-250 \leq Dst \leq -100 nT$). Na relação encontrada, os campos elétricos interplanetários ($-\vec{v} \times \vec{B}$), direcionados para o anoitecer (*dusk*), foram maiores que $5 mV/m$, correspondendo a valores de B_z inferiores a $-10 nT$, sobre um período maior do que 3 horas. Mais recentemente, *Vieira et al.* (2004) estenderam esse critério para diferentes estruturas interplanetárias e determinaram que eventos de campos na bainha/choques são mais efetivos (menor tempo de injeção de energia, taxas de injeção maiores) que nuvens magnéticas para causar uma tempestade magnética de dada intensidade.

É interessante notar que a ocorrência de eventos de tamanha energia acompanham o ciclo solar de 11 anos. Durante a máxima atividade solar, ocorrem muitas ejeções e filamentos eruptivos surgem, além de CMEs que se tornam mais frequentes. Em torno de 50% do material ejetado segue em direção à Terra, interagindo com o campo magnético da mesma e causando choques como resposta à propagação destas estruturas no meio interplanetário. Devido à grande geofetividade das CMEs, o que ocorre é que neste período há uma maior frequência de eventos de grande escala, como os eventos de tempestade magnética intensa. Um subgrupo das ICMEs são as nuvens magnéticas, caracterizadas por uma temperatura dos prótons baixa e por uma intensa e prolongada rotação do vetor campo magnético, alta intensidade de campo magnético podendo durar

até mais de um dia, com dimensões da ordem de ~ 0.3 UA, à distância de 1 UA (Burlaga et al., 1981; Klein e Burlaga, 1982; Burlaga, 1995).

Ocorrida a reconexão nas condições mencionadas acima, é através do comportamento da corrente de anel que se pode determinar as características das tempestades magnéticas. A injeção, o transporte e a perda das partículas que constituem a corrente toroidal dão uma idéia da evolução do evento que varia de tempestade para tempestade, mas que, no geral, conserva algumas características comuns, como a assimetria na corrente, na região do *dusk* principalmente, a deflexão do componente- H , observado em estações geomagnéticas operando no solo em baixas latitudes. Todas estas condições estão sob o controle dos processos dinâmicos que ocorrem na magnetosfera.

Considerando-se que a reconexão é o principal processo de entrada de energia do vento solar para a magnetosfera, primeiro na magnetopausa e depois à região da cauda, percebe-se que o transporte do plasma interplanetário é intensificado pela presença do campo elétrico de convecção. A combinação entre a velocidade do vento solar e o IMF- B_z é o que gera este campo elétrico de direção- y , e durante a reconexão ele é mapeado para dentro da magnetosfera sendo responsável pela convecção das partículas, ou seja, transporte das partículas da região da cauda magnética para as proximidades da Terra ($\sim 4-6 R_E$), onde elas sofrem deriva e aumentam a energia total disponível na corrente de anel.

Além disso, conforme mostrado estatisticamente por O'Brien e McPherron (2000), há uma correlação entre o campo elétrico interplanetário (E_y) e o tempo de decaimento das partículas na corrente de anel, τ , ou seja, uma dependência da taxa de recuperação da corrente anelar em função do campo elétrico interplanetário. Quanto às perdas das partículas na corrente de anel, pensou-se por muito tempo que os principais processos eram as trocas de carga, as interações de Coulomb e as interações de onda-partícula, mas durante a fase principal e logo no início da fase de recuperação, observou-se que havia uma grande deriva de partículas, principalmente de íons, em direção à magnetopausa diurna (Liemohn et al., 1999; Liemohn et al., 2000), provavelmente causada por E_y .

A Tabela 4.1 apresenta 15 tempestades magnéticas intensas selecionadas para estudo e comparação com as 15 supertempestades apresentadas anteriormente. Estas tempestades foram estudadas durante o período 1998 a 2001 a fim de se obter dados do satélite ACE, em órbita no Ponto Lagrangeano *L1*. Os valores de pico dos índices *Dst*, *AE* e *Kp* bem como a duração da fase principal são mostrados na tabela.

A descrição de alguns dos eventos de tempestade magnética intensa é abordada na seqüência, sendo que os demais eventos são apresentados no Apêndice B da dissertação. Analogamente ao que foi feito no capítulo anterior, Capítulo 3, seguem as principais características de cada evento, como origem solar, causa interplanetária e o comportamento dos índices geomagnéticos, representando a resposta magnetosférica aos distúrbios do vento solar.

TABELA 4.1 - Eventos de tempestade magnética intensa selecionados durante os anos de 1998 a 2001. Além do dia da tempestade, também são mostrados o tempo de duração da fase principal (em horas), os picos dos índices Dst (em nT), do AE (em nT) e do K_p em escala logarítmica

Tempestades Magnéticas	t	Dst	AE	K _p
10/03/1998	10	-116	1594	7 ₀
4/05/1998	12	-205	2842	9 _.
6/08/1998	12	-138	1921	7 ₀
16/04/1999	13	-91	1391	7 ₀
22/09/1999	4	-173	1877	8 ₀
22/10/1999	7	-231	1857	8 ₀
12/02/2000	32	-133	1371	7 _.
24/05/2000	7	-147	1858	8 ₀
11/08/2000	10	-106	1379	8 _.
12/08/2000	8	-235	3167	8 _.
4/10/2000	36	-182	2701	8 _.
6/11/2000	12	-159	2033	7 ₀
20/03/2001	26	-165	2085	7 ₀
28/10/2001	8	-160	1312	7 _.
24/11/2001	8	-213	2635	8 ₀

4.1 Evento de 8 a 18 de março de 1998

A Figura 4.1 apresenta os dados interplanetários medidos pelos instrumentos da sonda ACE para o período de 8 a 18 de março de 1998. Os dados apresentados no painel são a temperatura, a velocidade e a densidade de prótons, o ângulo azimutal e longitudinal do campo magnético, os componentes B_x , B_y e B_z (em GSM) e a magnitude total do campo magnético e o parâmetro de plasma beta. Estes mesmos painéis são apresentados nas figuras com os dados interplanetários das outras tempestades.

Durante a fase principal da tempestade, o componente-sul do IMF alcançou altos valores negativos – B_z aproximadamente igual a -19 nT – e a velocidade do vento solar ficou em torno de 550 km/s . O meio interplanetário, no dia 10 de março, foi caracterizado por uma pressão dinâmica alta ($\sim 20 \text{ nPa}$), um beta de plasma baixo ($\sim 0,3$). Nenhum choque foi detectado pelos instrumentos do ACE no período avaliado.

Uma região de interação entre feixes, observada pelo satélite WIND – e não foi detectada pelo satélite ACE - de 12h UT até 24h UT do dia 10 de março, foi a causa da tempestade cujo pico no Dst foi de -116 nT e estendeu-se por aproximadamente cinco dias. Torna-se visível através dos dados de plasma do satélite ACE que se tratava de um feixe rápido, porque a velocidade dos prótons, V_p , a temperatura e a densidade dos prótons, T_p e N_p , respectivamente, caíram dentro da estrutura, conforme se observa na Figura 4.1. As linhas verticais mostram as interfaces da estrutura que causou a tempestade.

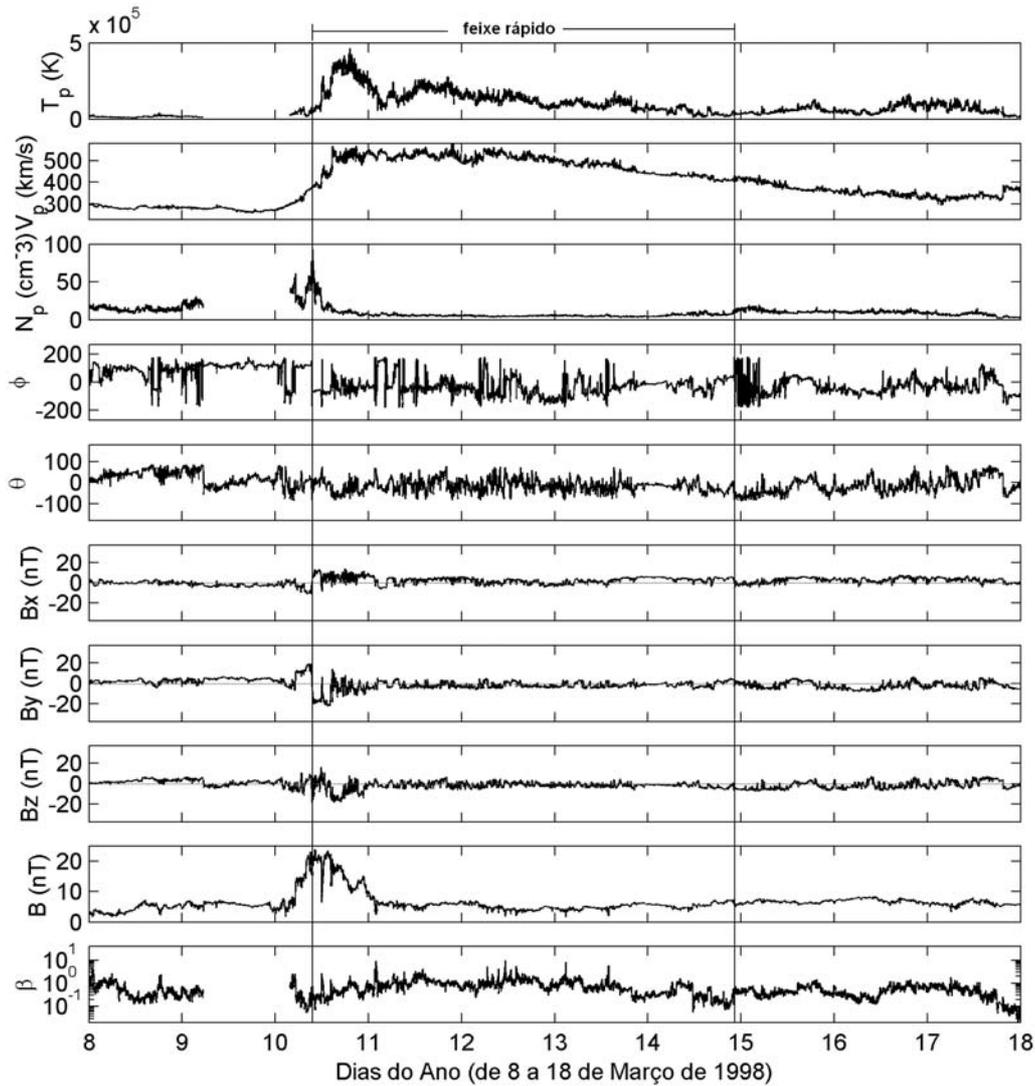


FIGURA 4.1 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 11 de março de 1998. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o início e o fim da estrutura que se estendeu por aproximadamente cinco dias.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam os parâmetros derivados de transferência de energia vento-solar magnetosfera: B_z , percentual de B_z sul, E_y , $F(E)$, epsilon e o índice Sym ; e os

valores de B_z , B e índices AE, AU/AL, K_p , A_{sy} e Sym/Dst . Painéis semelhantes serão apresentados para as outras tempestades estudadas.

Na Figura 4.2, pode-se observar que o campo elétrico interplanetário, E_y , oscilou bastante durante o período considerado, seguindo as oscilações do IMF na direção-z. Durante um período de mais de 3h, B_z permaneceu abaixo de -10 nT , enquanto que o campo elétrico E_y , durante este mesmo intervalo de tempo, assumiu valores superiores a 5 mV/m . Além disso, observa-se que a taxa de injeção de energia do vento solar para a magnetosfera (epsilon de Akasofu), durante a fase principal da tempestade, apresentou alguns picos e um máximo de $6,37 \times 10^{12} \text{ W}$. Nesta mesma fase, pode-se estimar uma energia de $2,89 \times 10^{16} \text{ J}$ (Joules), que entrou na magnetosfera, e, desta energia, $2,51 \times 10^{16} \text{ J}$ foi dissipada na corrente de anel. A taxa de injeção de energia na corrente equatorial, $F(E)$, pode ser vista na Figura 4.2, e o pico por ela alcançado foi de -49 nT/h .

Nos três dias que se seguiram após a detecção do feixe, o componente B_z permaneceu próxima de zero, porém com grande atividade flutuante, sendo que no mesmo período de tempo a atividade geomagnética oscilou entre moderada e fraca (K_p entre 1 e 3) (ver Figura 4.3). Depois deste período de baixa atividade, o B_z voltou a assumir valores de grande amplitude, resultando em um aumento nos valores de Dst e K_p . Durante a fase principal, o índice K_p alcançou um máximo valor 7.

O índice AE respondeu durante toda a fase principal da tempestade, aumentando, depois de um período de valores baixos, até um máximo próximo de 2000 nT . Para altas latitudes ainda, o índice K_p , conforme comentado acima, oscilou bastante entre altos e baixos valores, mas, durante a fase principal, variou entre 5 e 7. O índice assimétrico, A_{sy} , nesta mesma fase apresentou um pico em 250 nT , correspondendo ao exato momento de maior injeção na corrente de anel, e, no restante do tempo, oscilou entre 0 e 100 nT .

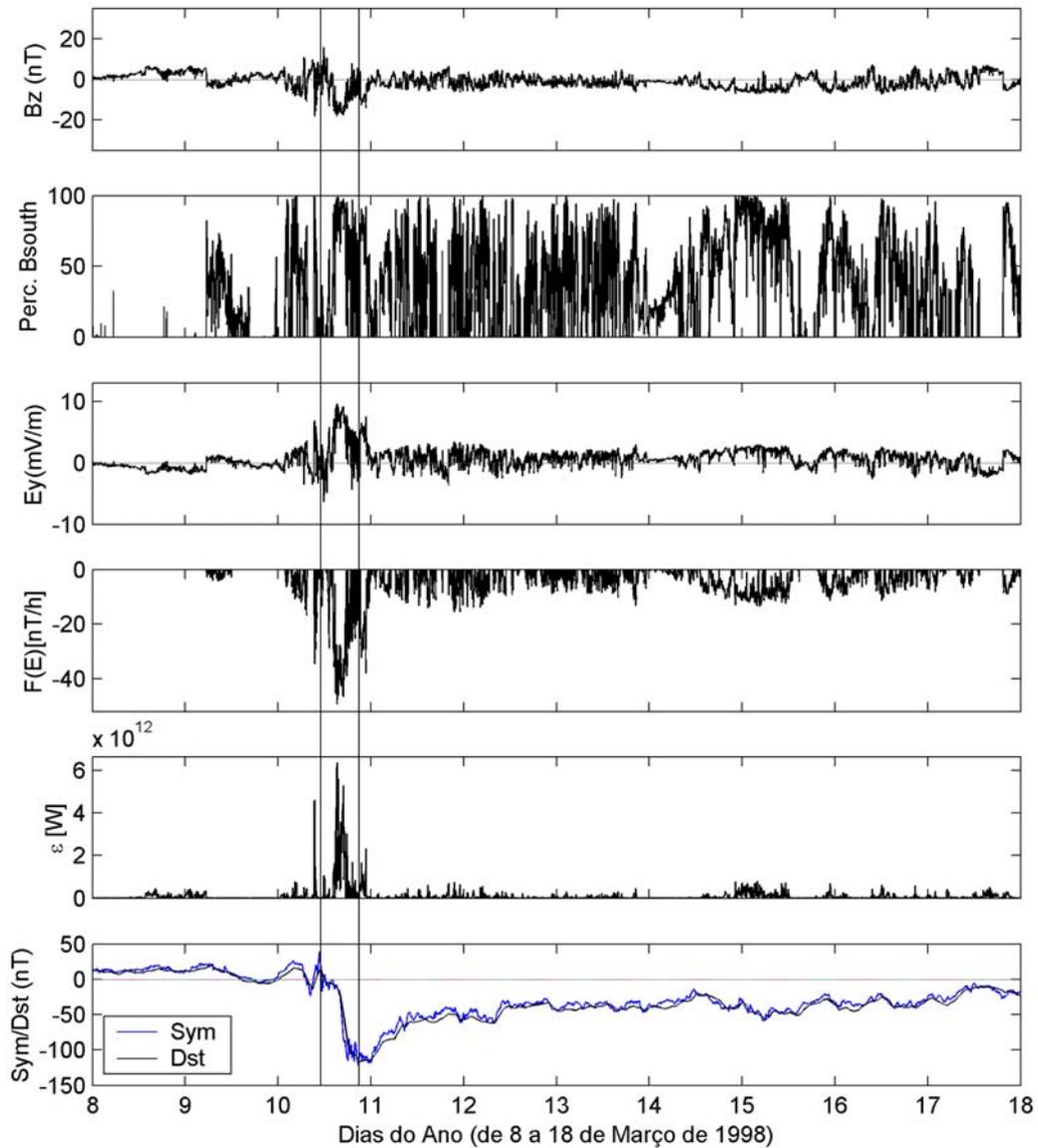


FIGURA 4.2 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 11 de março de 1998. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

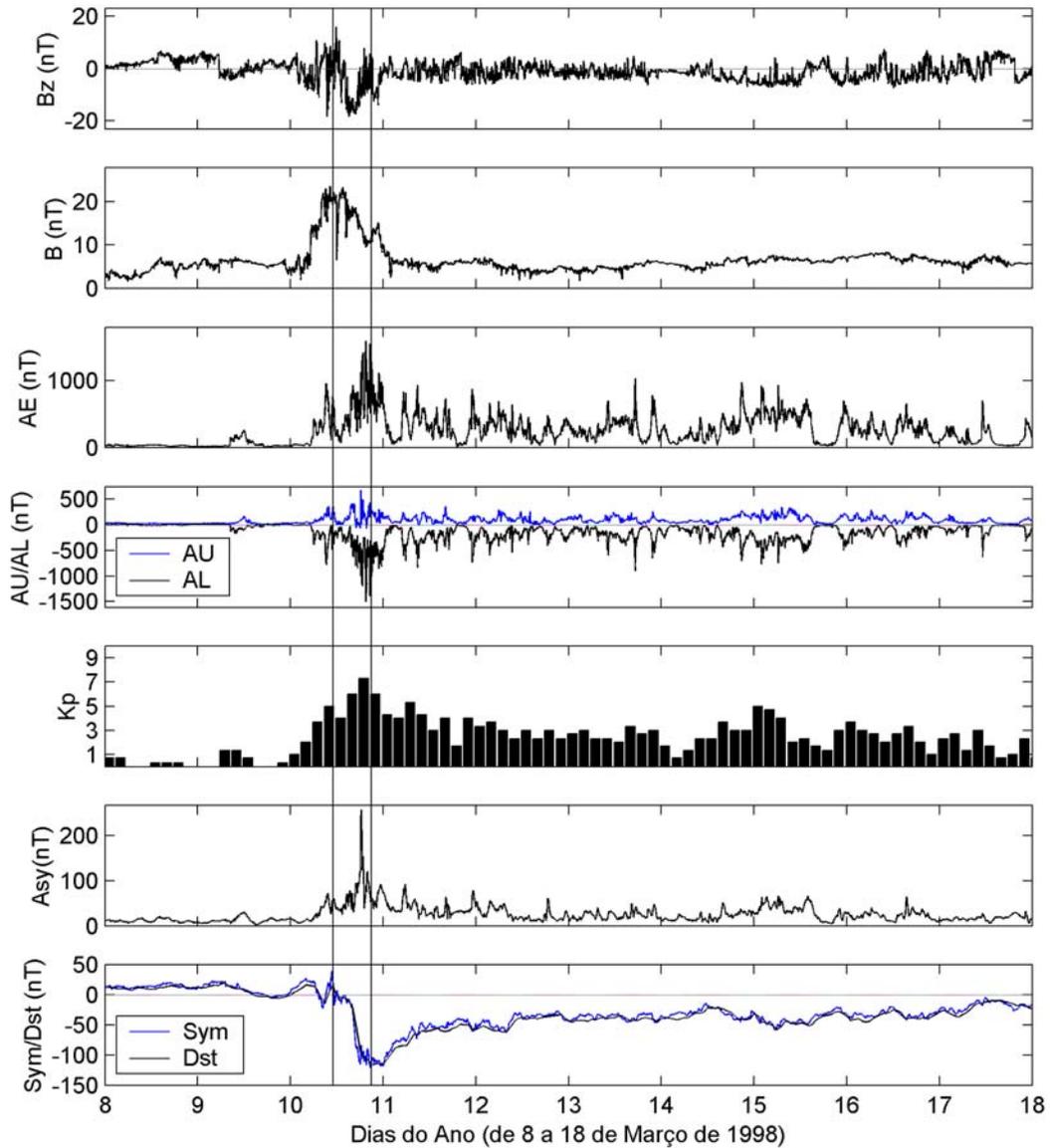


FIGURA 4.3 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e índices geomagnéticos para a tempestade do dia 11 de março de 1998. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o Asy e o Sym/Dst , dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais. Os índices AU, AL, AE, Asy e Sym são obtidos a partir do WDC-Kyoto, enquanto o K_p e o Dst , através do SPIDR.

4.2 Evento de 21 a 27 de setembro de 1999

As imagens do instrumento EIT a bordo do SOHO mostraram um filamento eruptivo e uma possível onda coronal no dia 20 de setembro às 5h UT. Uma pequena explosão do tipo C2.5 em raios-X estava associada com este evento. Uma CME do tipo halo foi observada pelo coronógrafo LASCO a bordo da espaçonave SOHO, no dia 20 de setembro, às 6h06min UT, sendo que às 11h45min UT o choque foi detectado a ~1UA. A velocidade de projeção da CME foi de 450 km/s, sendo que à distância aproximada de 1UA esta velocidade aumentou para aproximadamente de 660 km/s, e o tempo necessário para que a ejeção alcançasse tal distância foi de aproximadamente 63 horas – o que equivale a 2,62 dias (http://solar.scs.gmu.edu/research/cme_storm/event_repeat.html). Conforme Figura 4.4, a ICME teve início no dia 22 de setembro às 19h UT e terminou às 18h UT do dia 24. O beta de plasma foi baixo neste intervalo de tempo – o que é característico da estrutura de nuvem magnética – e a intensidade do IMF ficou em torno de 35 nT. O componente B_z foi defletido para valores inferiores a -10 nT por um período de 2 horas, além de uma queda na temperatura e na densidade dos prótons dentro da estrutura. Depois desta estrutura, um novo choque foi detectado no dia 26 do mesmo mês, às 14h20min UT, com um número de Mach de 1,1. As características interplanetárias estão visíveis na Figura 4.4.

Na Figura 4.5, observa-se que B_z estava totalmente direcionado para o sul durante a fase principal, e que o campo elétrico foi positivo também neste intervalo, permanecendo com valores maiores que 5mV/m por um período de até 3 horas. Como o campo elétrico é mapeado para dentro da magnetosfera durante a ocorrência da reconexão, foi possível estimar uma função de injeção na corrente de anel com uma taxa máxima em torno -70 nT/h, que resultou em uma energia de $2,0 \times 10^{16} J$, depositada na corrente de anel. Esta quantia representa uma parte da energia total que entrou na magnetosfera, calculada em torno de $1,94 \times 10^{16} J$ cuja taxa de injeção teve um valor máximo, calculado através do epsilon de $1,39 \times 10^{13} W$. Como se pode perceber, a energia dissipada na corrente de anel excedeu aquela que entrou, o que mostra que o parâmetro epsilon é apenas um indicativo da energia total de entrada (Koskinen e Tanskanen, 2002). O resultado da

injeção e da dissipação da energia na corrente de anel pode ser visto através dos índices Sym e Dst.

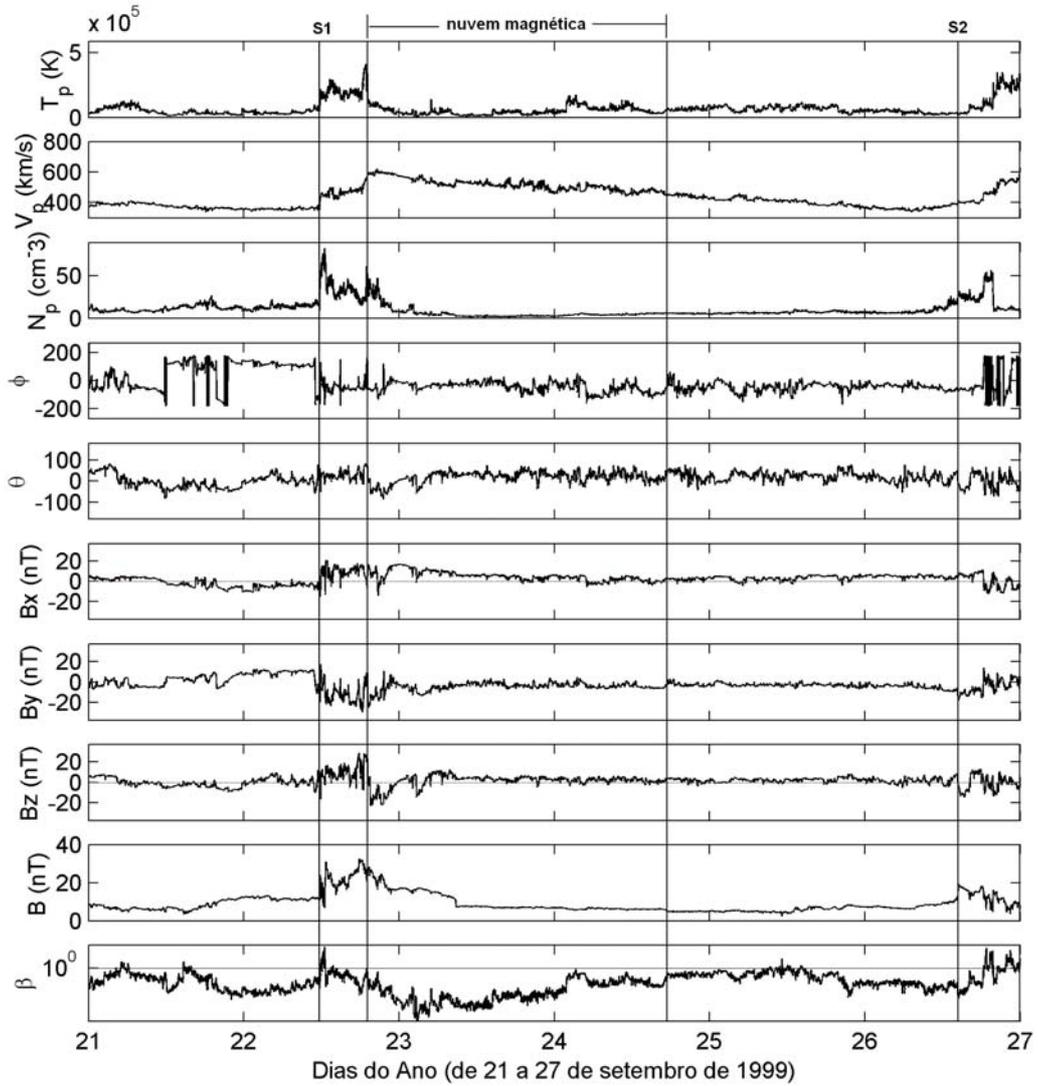


FIGURA 4.4 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 22 de setembro de 1999. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos neste período, além da estrutura interplanetária que causou a tempestade.

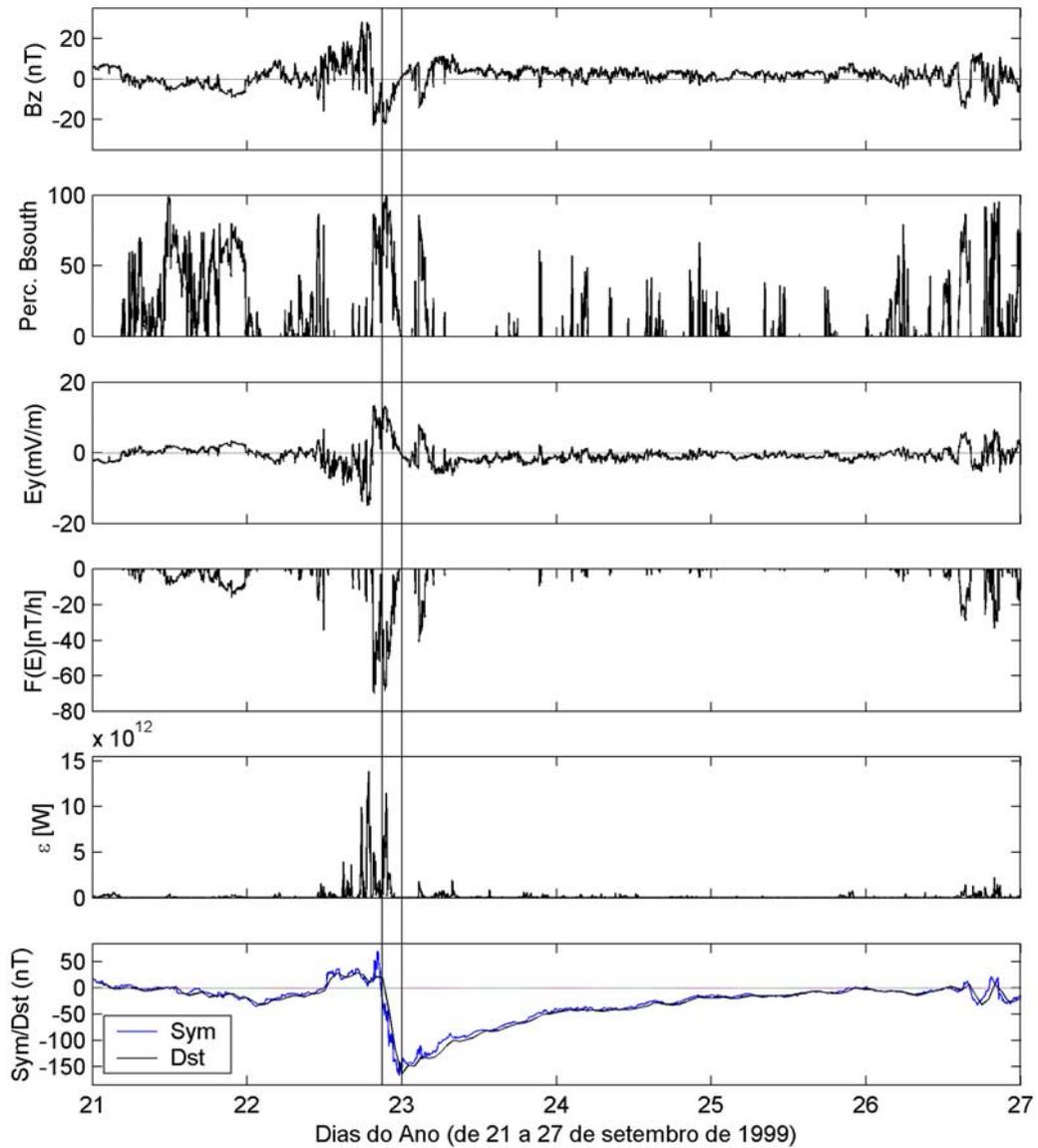


FIGURA 4.5 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 22 de setembro de 1999. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

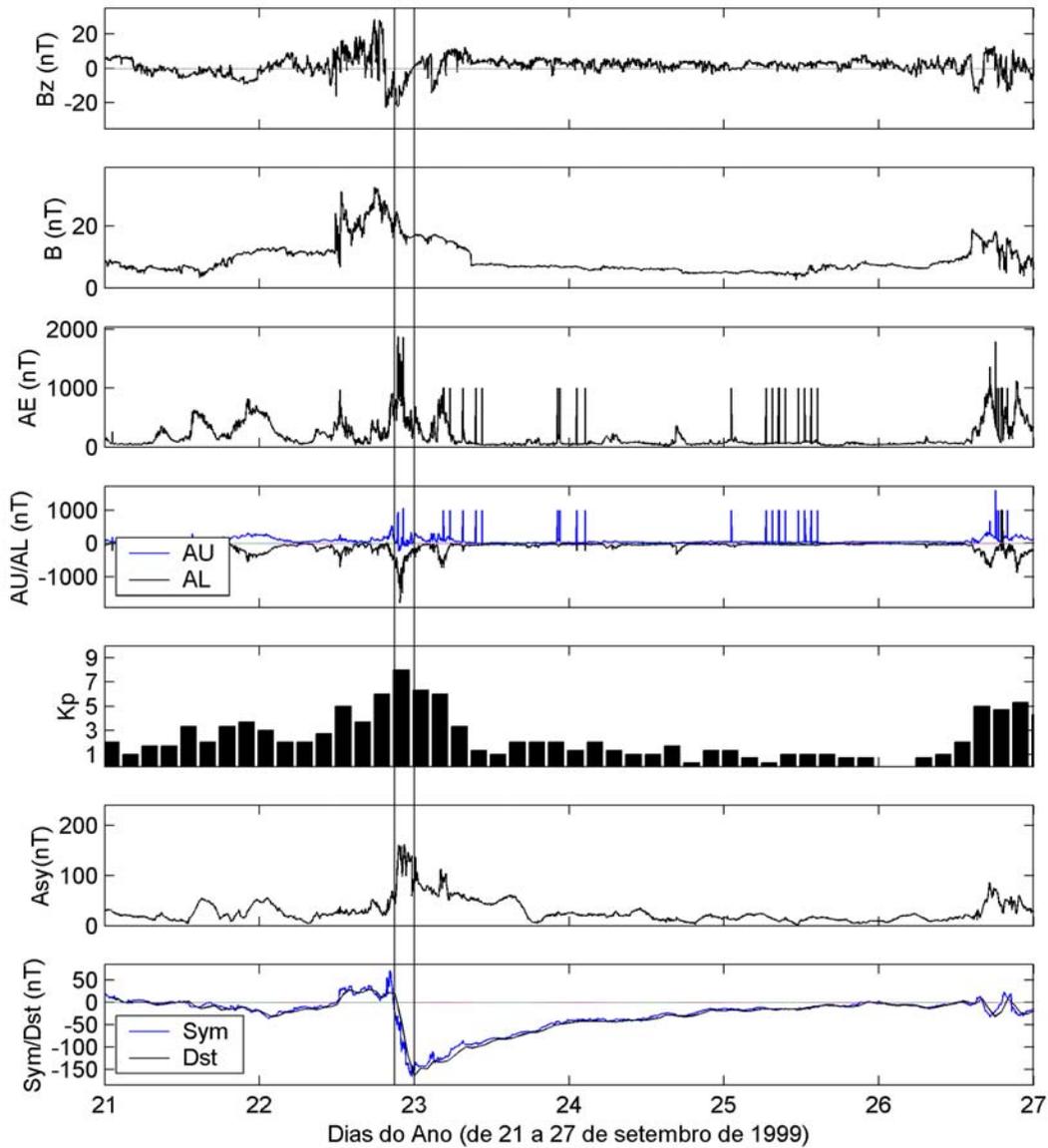


FIGURA 4.6 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 22 de setembro de 1999. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

Em se tratando da resposta magnetosférica, a Figura 4.6 mostra que o AE foi mais intenso durante a fase principal. No restante do intervalo, alguns valores de pico, mas pareceram não superar os 1000 nT . Já na recuperação, apesar dos *spikes*, pode-se perceber um tempo calmo com relação ao eletrojato auroral. O índice K_p atingiu um máximo valor entre 7 e 8 e oscilou entre estes valores durante a fase principal. O A_{sy} excedeu os 150 nT no pico da tempestade, mas manteve-se com valores moderados no restante do intervalo.

4.3 Evento de 20 a 27 de outubro de 1999

A Figura 4.7 mostra, conforme descrito por *Dal Lago et al.* (2004b), o choque frontal que caracterizou este evento. A sua detecção ocorreu às 2h20min UT do dia 21 e pôde ser observada pelo alto impulso na velocidade e na magnitude do IMF. Tal choque resultou no IS que marcou o início da fase principal da tempestade. Um IS geralmente ocorre como indicativo do início da fase principal, mas existem evidências da evolução da corrente de anel sem a ocorrência dos ISs (*Hirshberg*, 1963). Logo atrás do IS, uma ejeção que não foi do tipo nuvem magnética formou uma região turbulenta de B_z muito flutuante entre a frente da estrutura e a parte de trás do choque. A polaridade do IMF mudou por aproximadamente 26 horas. O valor médio de B , antes que a estrutura alcançasse o monitor, foi de $\sim 20 \text{ nT}$, e a direção do IMF era preferencialmente para sul, o que causou uma deflexão no índice Dst até um valor mínimo (máximo negativo) de -237 nT . Já dentro da estrutura, B aumentou para valores em torno de 38 nT .

Logo após a ejeção, um feixe rápido de CIR pôde ser observado, caracterizado por uma densidade alta, devido à compressão causada na parte traseira da ICME. A velocidade manteve-se alta, em torno dos 700 km/s , e a densidade caiu abruptamente de 35 para 5 cm^{-3} . Para a magnitude do campo magnético, B , observou-se também uma queda de valores em torno de 35 nT para 5 nT . A CME que se propagou teve uma velocidade de expansão baixa – aproximadamente de 546 km/s –, próxima à velocidade normal do vento solar. Uma CME foi observada pelo LASCO no dia 18 de outubro, às 0h6min UT. Provavelmente a ela esteve associado o *flare* do tipo C1.2 em raios-X que foi observada pelo satélite GOES relativo à região ativa localizada a 40° Sul e 5° Leste.

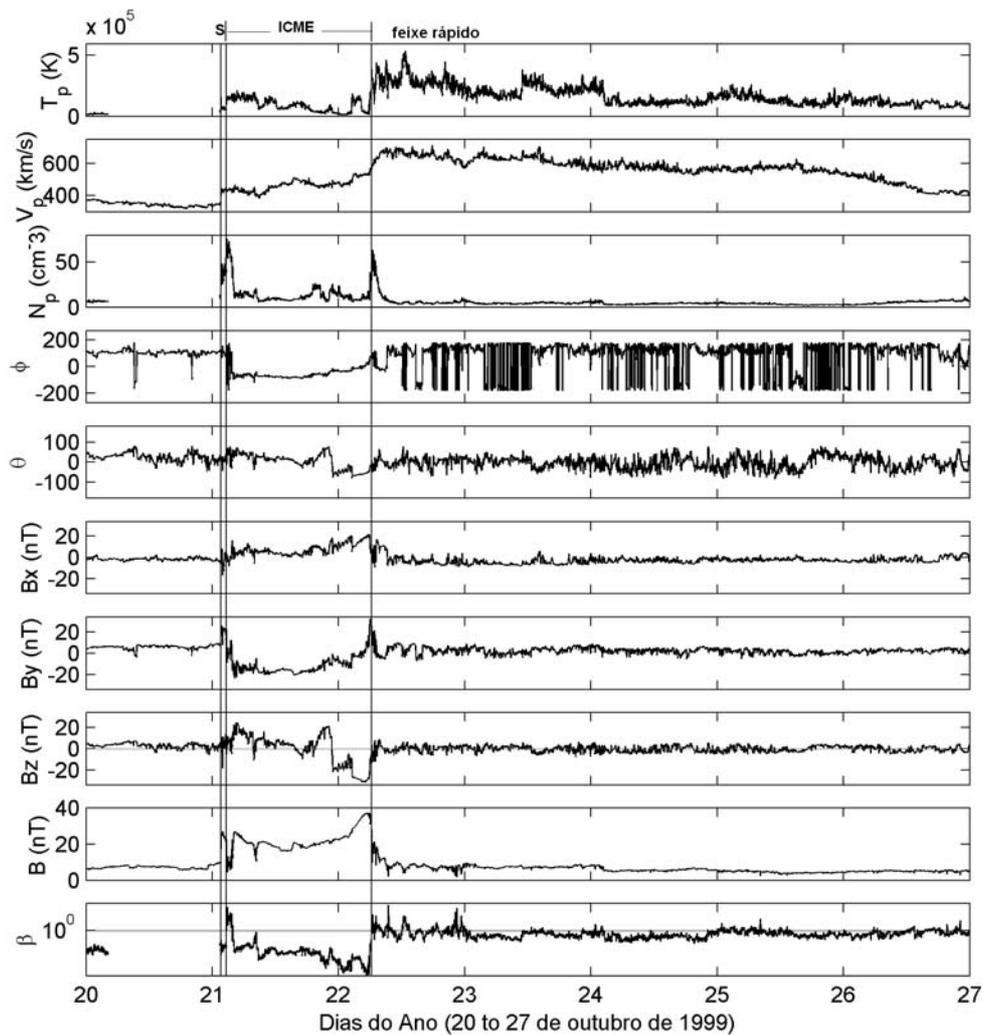


FIGURA 4.7 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 22 de outubro de 1999. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o choque e as estruturas que causaram a tempestade.

Na Figura 4.8, observa-se que o campo magnético B_z permaneceu por mais de 4 horas com valores inferiores a -15 nT , e o campo elétrico permaneceu com valores positivos superiores a 15 mV/m por 2 horas aproximadamente. A energia total estocada na região

da cauda magnética, calculada pelo ε , foi de $1,04 \times 10^{17} J$. Deste total, uma quantia razoável foi dissipada para a corrente de anel, em torno de $5,06 \times 10^{16} J$. Pode-se observar pela última figura mencionada que a função de injeção foi bastante intensa justamente porque o campo elétrico apresentou valores altos na fase principal. A taxa máxima alcançada mostrou que a injeção foi de até $-88 nT/h$ na corrente toroidal. O parâmetro epsilon de Akasofu teve um pico de $1,16 \times 10^{13} W$.

O AE, observado na Figura 4.9, foi fraco no primeiro dia do período considerado. A partir daí, principalmente durante a fase principal da tempestade, oscilou entre valores altos, superiores a 100 e $0 nT$. Como se observa, dois picos estão presentes na fase principal, o que mostra que a resposta foi intensa na região auroral. No dia 21, em resposta ao IS, visualizado através do *Sym*, o AE chegou a valores próximos de $100 nT$. Da mesma forma, o K_p respondeu ao IS do dia 21 e, na fase principal, foi bem intenso (valores de 7 a 9). Na recuperação, não caiu bruscamente, mas assumiu valores moderados, entre 3 e 6.

Em termos da corrente assimétrica, observou-se que o IS contou com um aumento no índice *Asy*, que caiu novamente e voltou a crescer na fase de injeção da energia na corrente de anel, com picos de até $200 nT$. Depois disso, mostrou-se bem oscilante, conforme se observa na Figura 4.9.

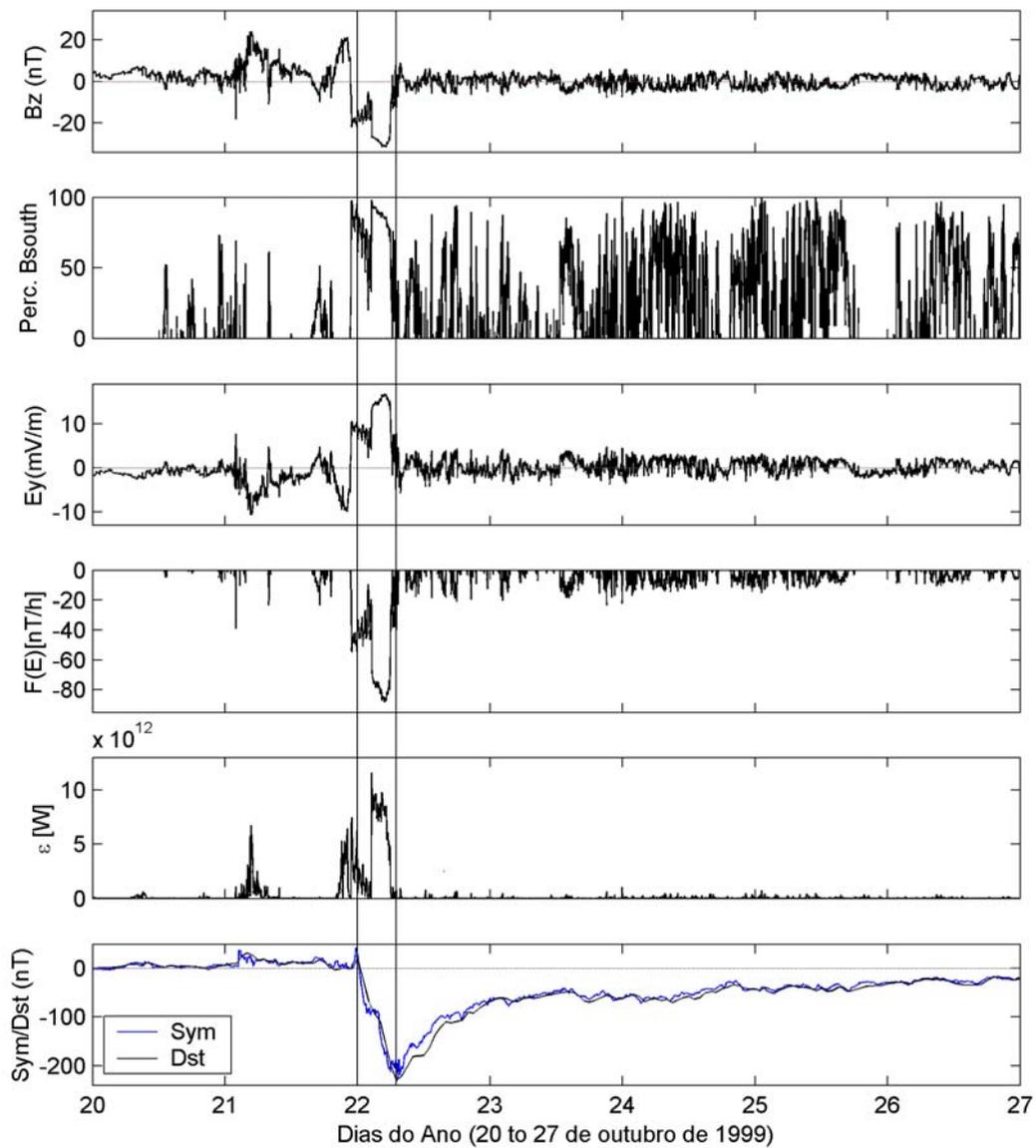


FIGURA 4.8 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 22 de outubro de 1999. Como resposta à injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

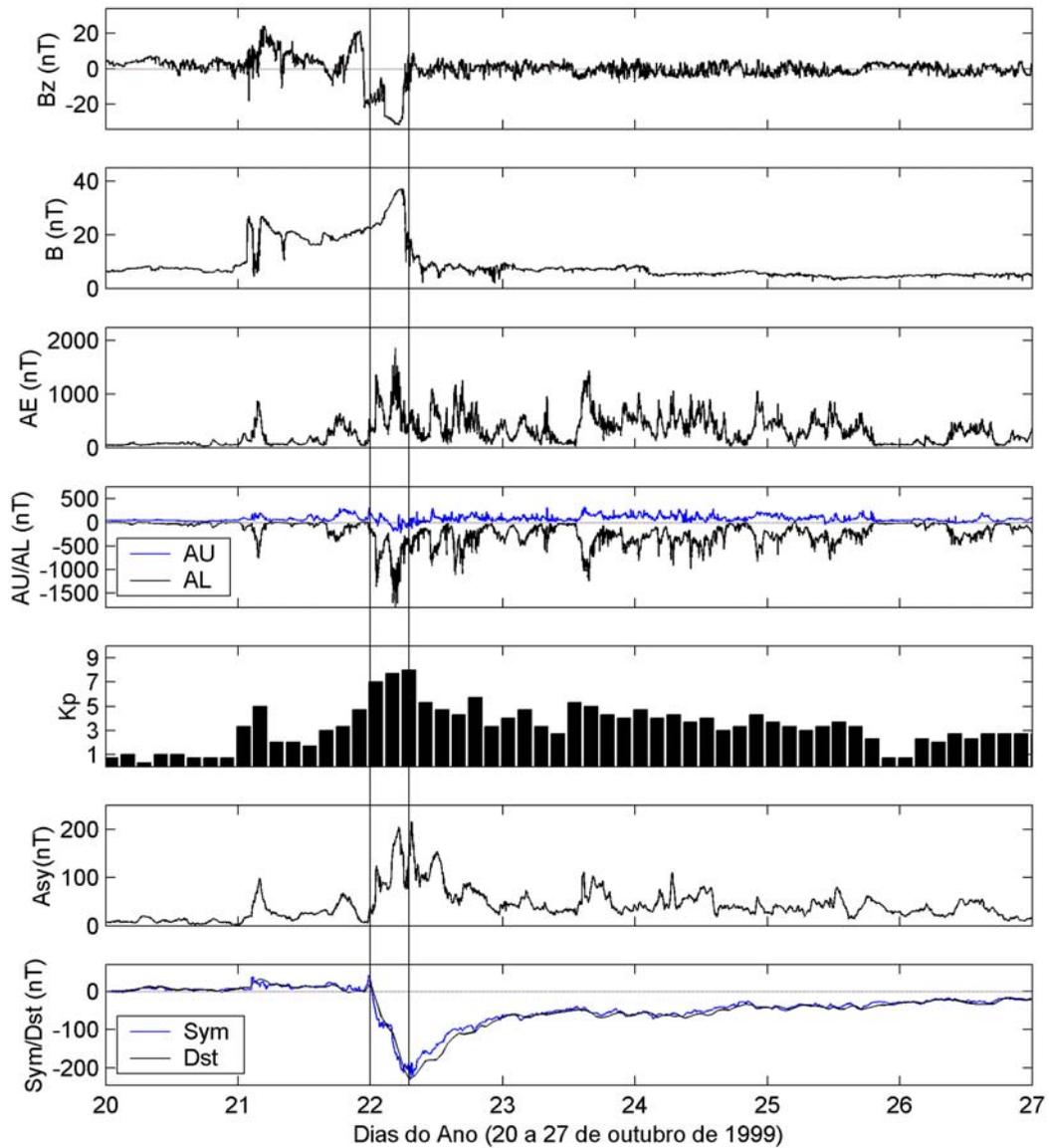


FIGURA 4.9 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 22 de outubro de 1999. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, B, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

4.4 Evento de 10 a 16 de fevereiro de 2000

O evento de fevereiro de 2000 foi causado possivelmente pela interação dos vestígios de duas ICMES. A 1UA, dois choques foram detectados: um no dia 11 de fevereiro, às 02h UT, e outro, no mesmo dia, às 23h UT, respectivamente com números de Mach de valores 2,0 e 2,8. O que guiou tais choques foram ejeções interplanetárias, sendo que a primeira delas chegou à distância de 1UA em torno das 16h UT do dia 11 de fevereiro, e foi engolfada, no mesmo dia, pela segunda ejeção, aproximadamente às 20h UT, criando um intenso e bem turbulento campo magnético sul, que permaneceu em torno de -10 nT por um período de 3 horas, com valor de pico de -16 nT (ver Figura 4.10).

A deflexão do componente horizontal, H , durante a fase principal da tempestade, levou a um valor de pico do Dst de -131 nT conforme se observa pela Figura 4.11. Além disso, com a permanência de B_S , observou-se um E_y , por mais de horas, com valores superiores a 5 mV/m . Com os altos valores de E_y por um período prolongado de tempo, obteve-se uma taxa de injeção na corrente de anel da ordem de -60 nT/h como valor de pico, totalizando uma energia de $3,59 \times 10^{16} \text{ J}$ de um total de $5,27 \times 10^{16} \text{ J}$ que entrou na magnetosfera durante a fase característica da tempestade. A taxa de injeção de energia na magnetopausa calculada pelo epsilon, teve um pico em $6,23 \times 10^{12} \text{ W}$.

Observando-se a Figura 4.12, percebe-se que a magnitude do IMF apresentou aumentos súbitos nos três choques registrados para o período. A resposta que o AE apresentou durante a fase principal da tempestade foi menos intensa do que a apresentada na primeira injeção de energia no período. Na fase de recuperação, ainda teve atividade, mas apresentou-se menos intensa, variando de 0 a 1000 nT . O K_p cresceu principalmente próximo da fase principal, de 5 a um valor máximo 7. No restante do intervalo, a resposta na região auroral manteve-se moderada, com valores superiores a 2. Também o A_{sy} teve grande resposta mais próximo ao término da fase principal, com valores de até 200 nT . Ainda se manteve na fase de recuperação até cair. Já no dia 14, apresentou um novo pico da mesma intensidade do primeiro.

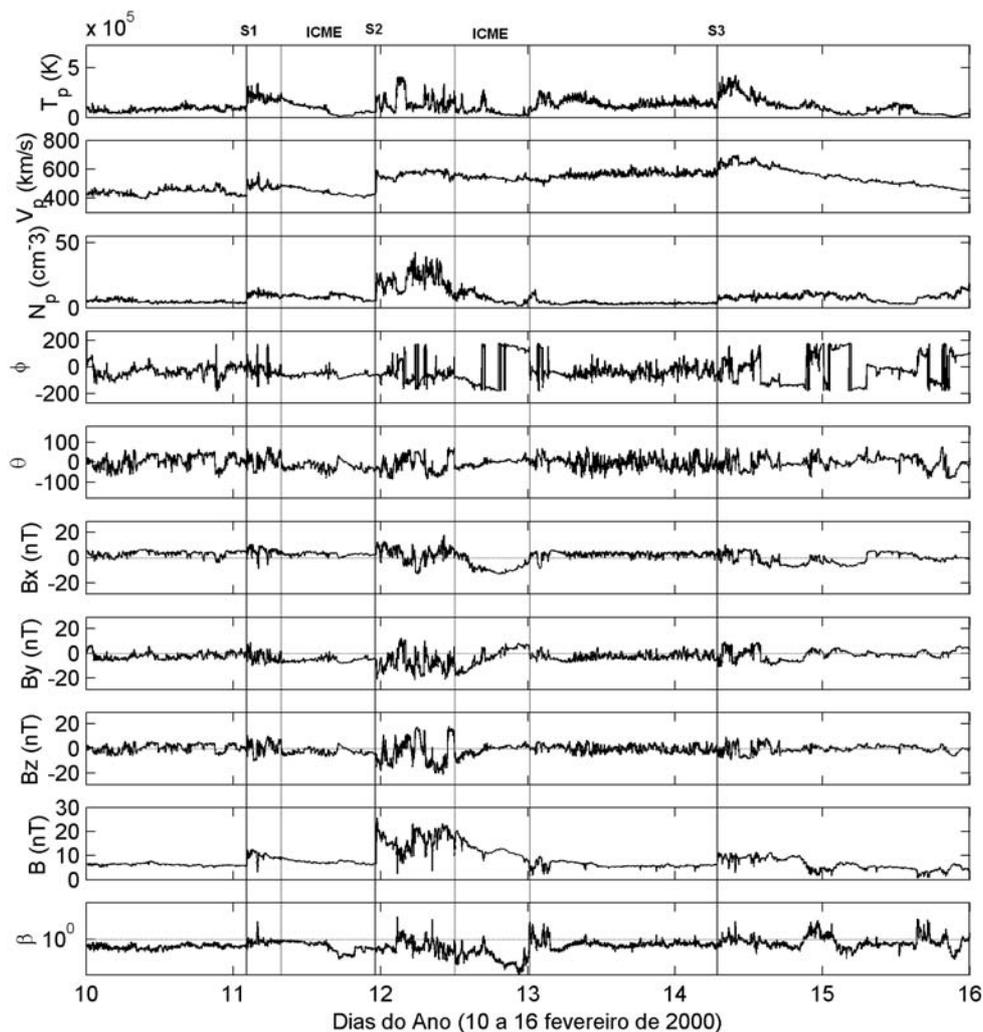


FIGURA 4.10 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 12 de fevereiro de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os três choques ocorridos neste período.

Três sucessivas CMEs foram observadas nos dias 8, 9 e 10 de fevereiro pelos coronógrafos de LASCO. No dia 8, uma explosão do tipo M1.3 em raios-X foi detectada pelo satélite GOES-8 proveniente de RA 8858 localizada a 25°N e 26° Leste.

No dia 9, a RA 8853 apresentou-se ativa com observações em *H-alpha*. Às 19h15min UT, uma explosão de intensidade 2f foi observada nas latitudes heliográficas 17° Sul e 40° Oeste. Foram detectadas explosões da classe C7.4 em raios-X. Logo depois, às 19h54min, LASCO C2 observou uma CME do tipo “halo”. Já no dia 10, uma explosão da classe C7.3 foi observada surgindo de RA 8858, nas posições heliográficas 31° Norte e 4° Leste. Às 2h30min UT, uma CME foi observada sobre o pólo Norte e mais tarde expandiu-se sobre todos os ângulos de visão. Acredita-se, a partir da análise das velocidades, uma vez que a causa da tempestade foi a interação entre duas CMEs, que as CMEs ocorridas nos dias 9 e 10 são as que possivelmente interagiram entre si (*Balmaceda et al.*, 2004).

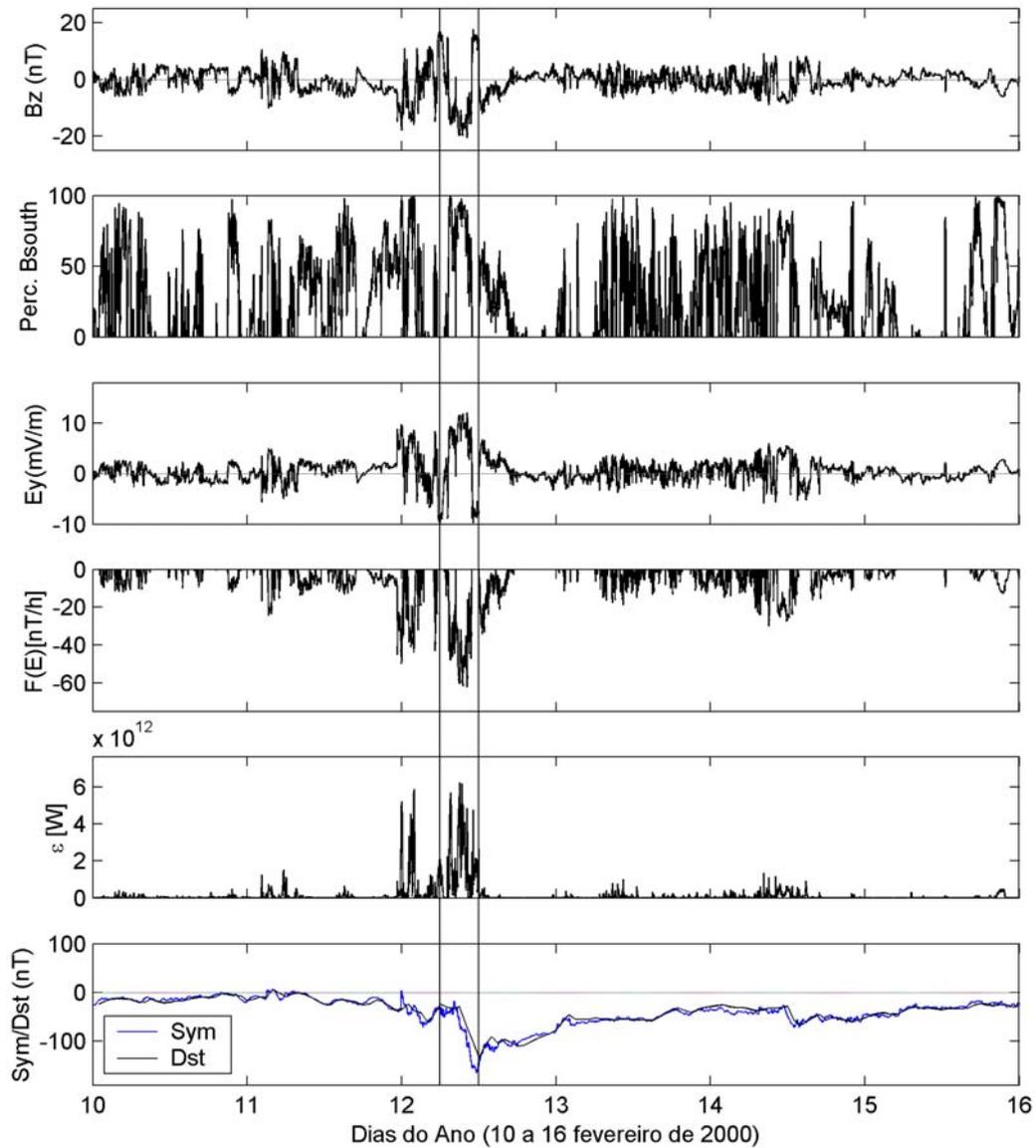


FIGURA 4.11 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo BS é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção de energia na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 12 de fevereiro de 2000. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

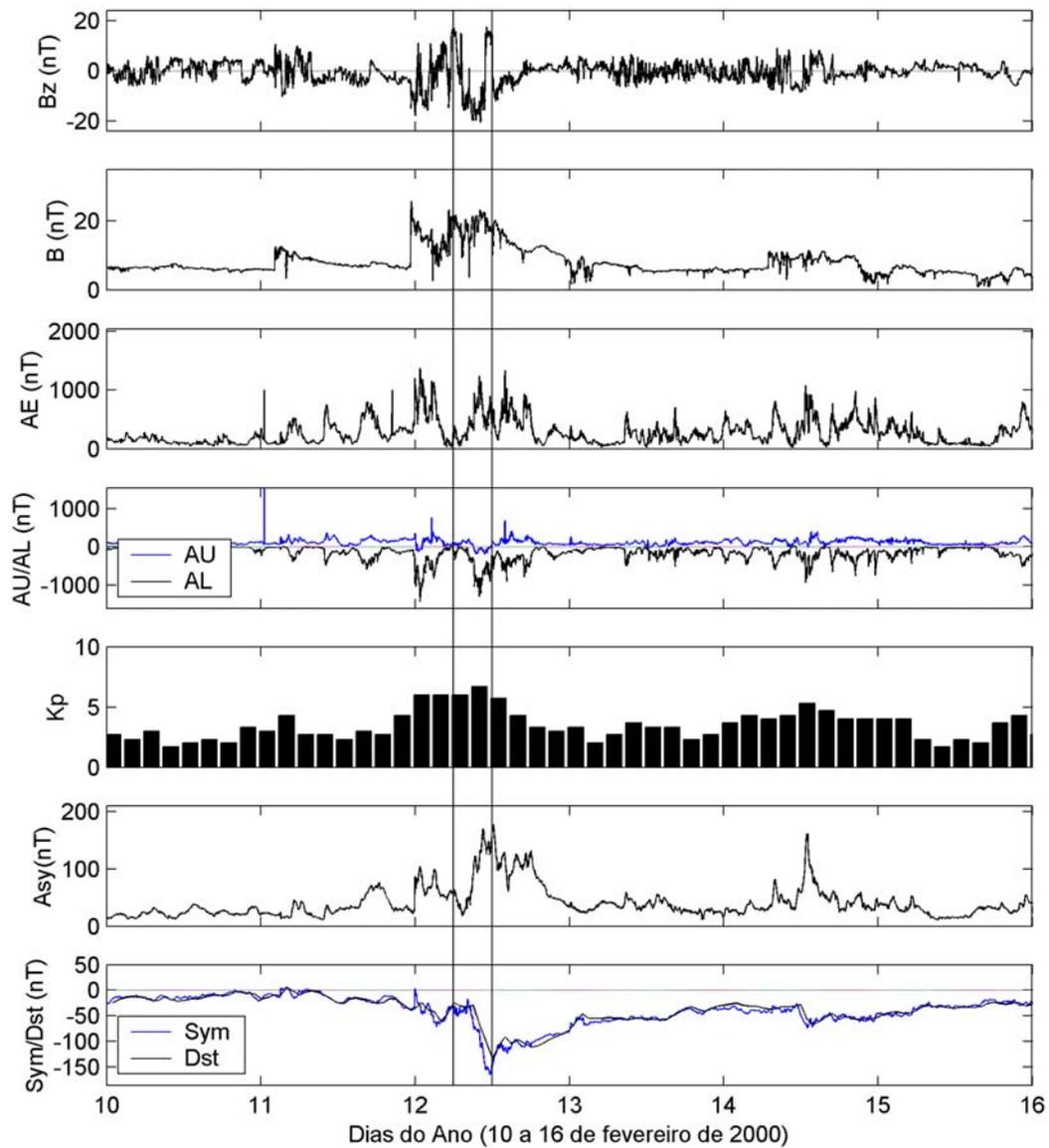


FIGURA 4.12 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 12 de fevereiro de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

4.5 Evento de 23 a 28 de maio de 2000

Às 6h26min UT do dia 20 de maio, uma CME foi observada e a ela estava associada a explosão do tipo C7.6, detectada pelo EIT a bordo da espaçonave SOHO, provavelmente com origem na região NOAA 8998, nas latitudes heliográficas de 15° Sul e 8° Oeste. No dia seguinte, às 7h26min UT, com uma velocidade de expansão de 629 km/s, uma nova CME foi observada, e uma nova explosão do tipo C8.2, provavelmente ocorrendo no limbo Oeste do Sol, a ela estava associada. A explosão foi detectada pelo satélite GOES (http://solar.scs.gmu.edu/research/cme_storm/event_question.html). Em 22 de maio do mesmo ano, uma CME ‘halo’ com uma velocidade de expansão de 737 km/s foi observada, e a ela provavelmente estava associada uma explosão solar do tipo C6.3 entre 01h20min e 01h50min UT. Além destas, outras CMEs foram observadas nos dias que se seguiram, não sendo possível identificar com exatidão a origem solar do choque do dia 23 de maio de 2000. Uma região de bainha formou-se logo após o choque. Com isso, B_z tornou-se negativo e contribuiu para que a reconexão ocorresse e causasse a tempestade do dia 24 de maio. Um dia após o choque, às 12h UT, uma CIR foi identificada e seu fim foi registrado às 16h UT do mesmo dia. As localizações do choque e da CIR aparecem na Figura 4.13, assim como os parâmetros do vento solar e do IMF. Tais dados foram observados pelo satélite ACE com intervalos de 64 segundos. O campo magnético de direção sul ficou por mais de 1 hora com valores inferiores a $-10nT$, e o campo elétrico permaneceu acima de $10 mV/m$ por 1 hora. Provavelmente este evento foi uma combinação de um choque mais um feixe rápido de CIR ou uma ICME.

Na Figura 4.14, podem-se observar muitas flutuações no componente sul do IMF, que deflete o componente horizontal do campo geomagnético até um valor de pico de $-147 nT$, e pico de K_p igual a 8₀. Durante 7 horas, a injeção na corrente de anel fez com que o Dst caísse até um valor mínimo de $-147 nT$. A taxa com que a energia foi injetada na corrente de anel alcançou um pico de $-100 nT/h$. Em torno de $4,15 \times 10^{16} J$ foi depositada nesta região de um total de $4,32 \times 10^{16} J$ que entrou na magnetosfera, ou

seja, praticamente toda a energia que foi injetada, calculada através do parâmetro epsilon, direcionou-se para latitudes baixas, rumo à corrente toroidal. A função epsilon

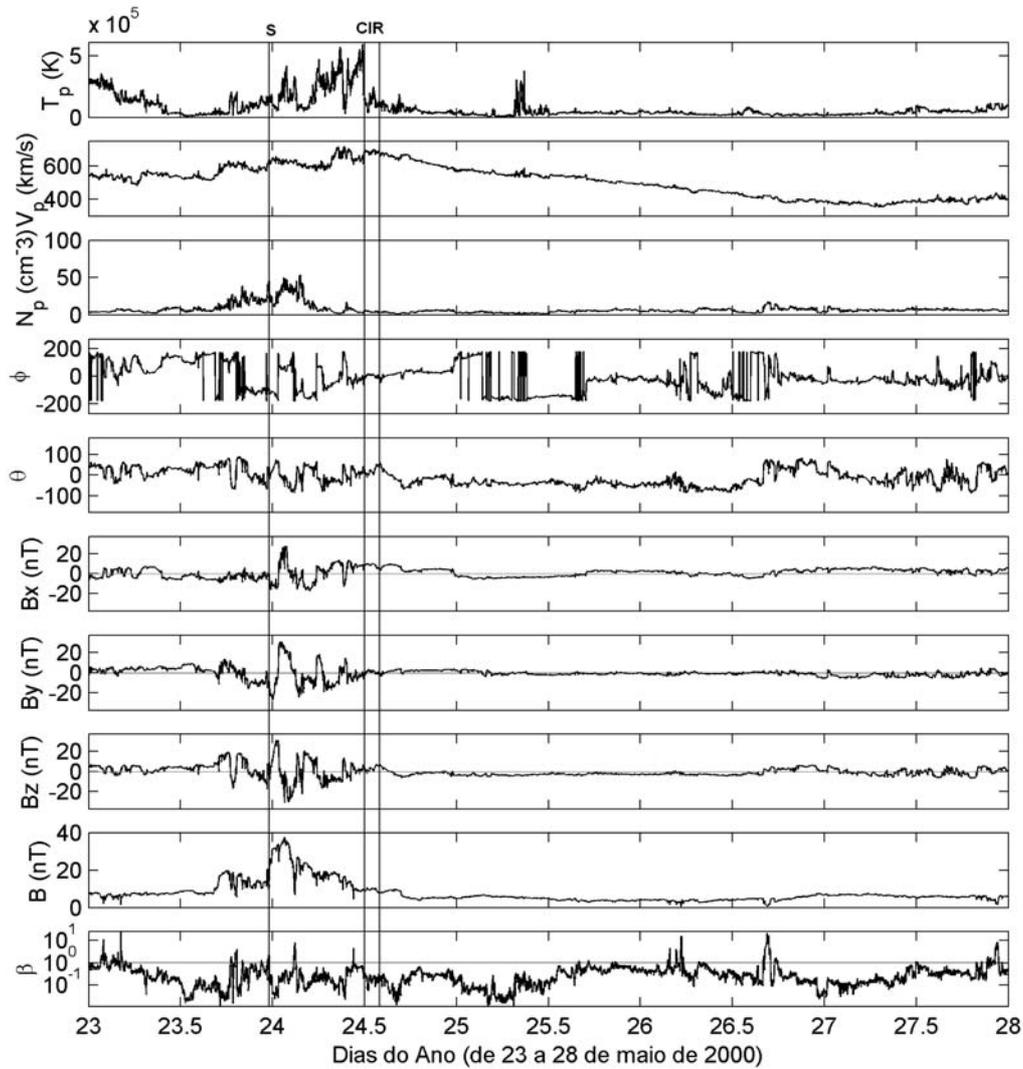


FIGURA 4.13 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 24 de maio de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o choque que levou à formação de uma região de bainha, além da estrutura de CIR que também contribuiu para a tempestade.

apresentou alguns picos durante a fase de maior injeção (fase principal), sendo que o máximo observado foi de $1,75 \times 10^{13} W$, mas caiu muitas vezes. Tal fenômeno resultou das oscilações de B_z , que variou de valores positivos para valores negativos e que determinou a ocorrência da reconexão.

Na Figura 4.15, a variação da atividade auroral foi registrada tanto pelo AE quanto pelo K_p . O AE atingiu um pico na fase principal, caiu durante a mesma, oscilou em intervalos longos de intensa atividade e períodos de baixa atividade. Por dois dias atingiu valores próximos a $500 nT$. O K_p foi intenso do dia 24 ao dia 27, mas foi alto mesmo antes da fase principal que atingiu um valor de pico 8. o menor valor observado para este período foi 1, mas durou por um período muito curto de tempo. Superando os $200 nT$, durante a fase principal, o índice Asy mostrou-se elevado em quase todo o período. Apresentou mais de um pico antes do início da tempestade, mas, na maior parte do tempo, ficou com valores em torno de $50 nT$, principalmente na fase de recuperação.

Este evento foi classificado por Vieira et al. (2004) como CIR (com choque) devido a uma falta de organização no campo magnético, mas *Cane e Richardson* (2003) o classificaram como ICME. É possível que este evento seja um evento composto, resultante da interação de choque/ICME com feixe rápido de CIR.

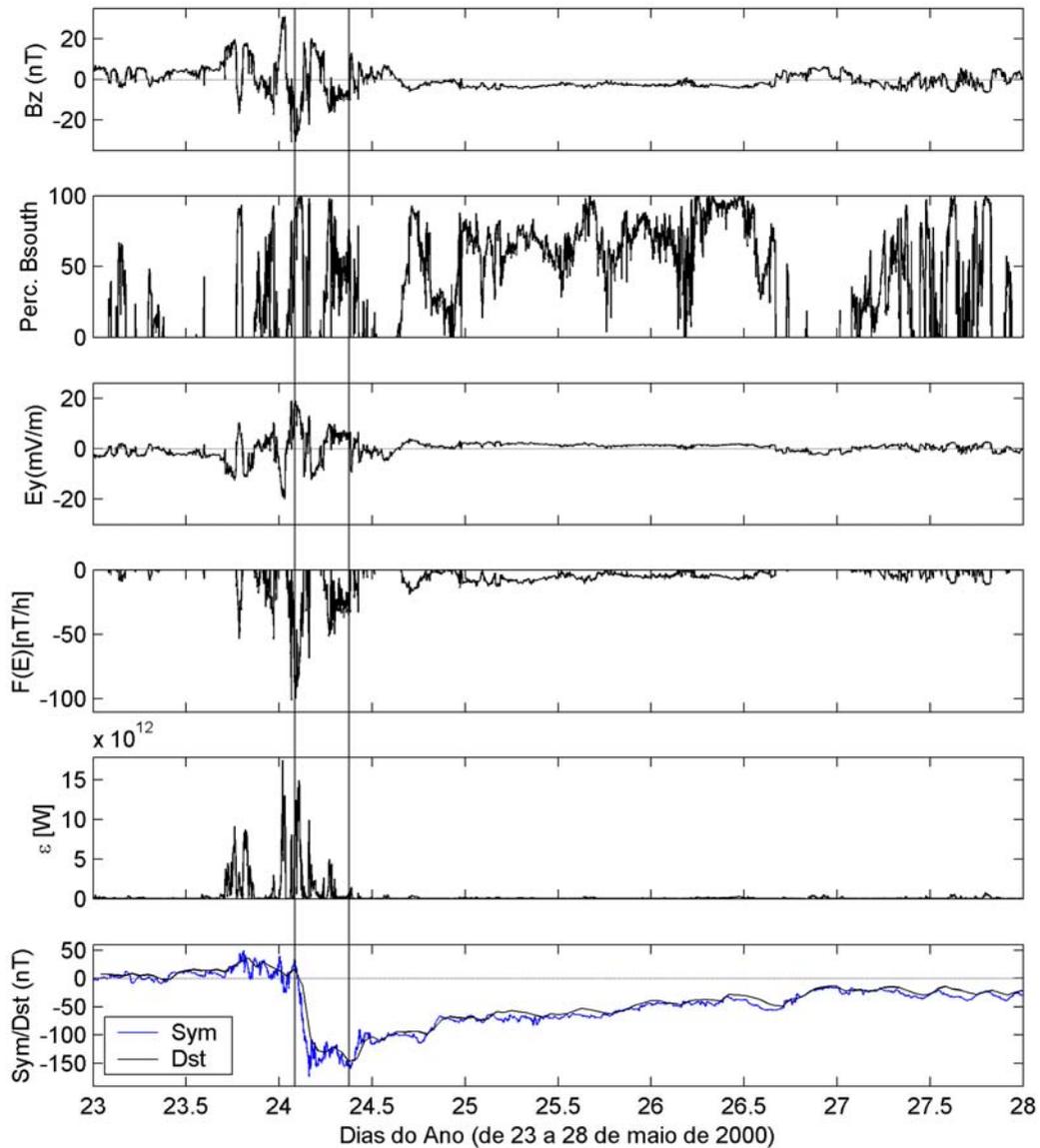


FIGURA 4.14 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 24 de maio de 2000. Como resposta à injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

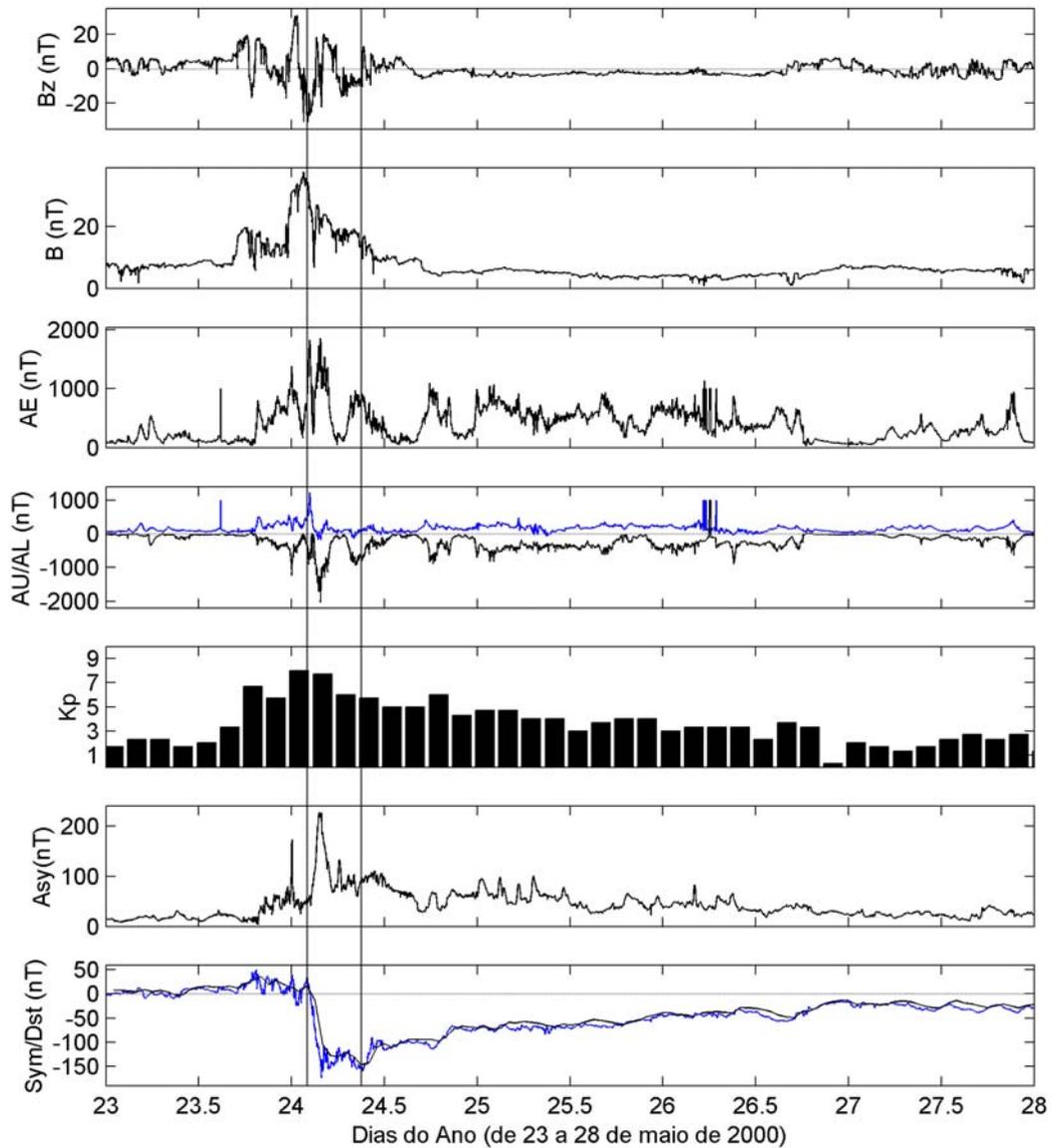


FIGURA 4.15 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 24 de maio de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , em escala logarítmica, e o *Asy*, o *Sym* e o *Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

4.6 Evento de 9 a 12 de agosto de 2000

Com uma fase principal de duração de 10 horas, a tempestade que decorreu neste período foi marcada por um pico de Dst de -106 nT. A CME, que se supõe ter sido responsável pela tempestade do dia 11 de agosto, foi observada no dia 9 de agosto às 16h30min UT, com uma velocidade de expansão de 898 km/s (*Schwenn et al.*, 2005). Nenhuma ejeção foi observada pelo telescópio imageador, EIT, a bordo da espaçonave SOHO. A estrutura interplanetária, que intensificou o componente B_s do IMF, foi uma ICME, localizada na Figura 4.16, com início no dia 10 de agosto, às 19h UT, e fim às 21h UT do dia seguinte. O choque causado pela propagação desta estrutura no meio interplanetário foi detectado pelos sensores a bordo do satélite ACE, aproximadamente às 4h07min UT do dia 10 de agosto e também é mostrado na figura.

A estrutura pôde ser identificada pelas baixas temperatura e densidade dos prótons, pelo baixo beta de plasma e pela rotação lenta do IMF- B_z . Percebe-se que antes que a estrutura terminasse, um novo choque foi detectado levando novamente B_z a valores negativos. Além disso, o segundo choque é identificado pelo aumento na magnitude do IMF, na densidade, velocidade e temperatura dos prótons. Como se observa, o componente B_z do IMF teve um valor máximo negativo de ~ -20 nT, permanecendo com valores inferiores a -10 nT por um intervalo superior a 8 horas.

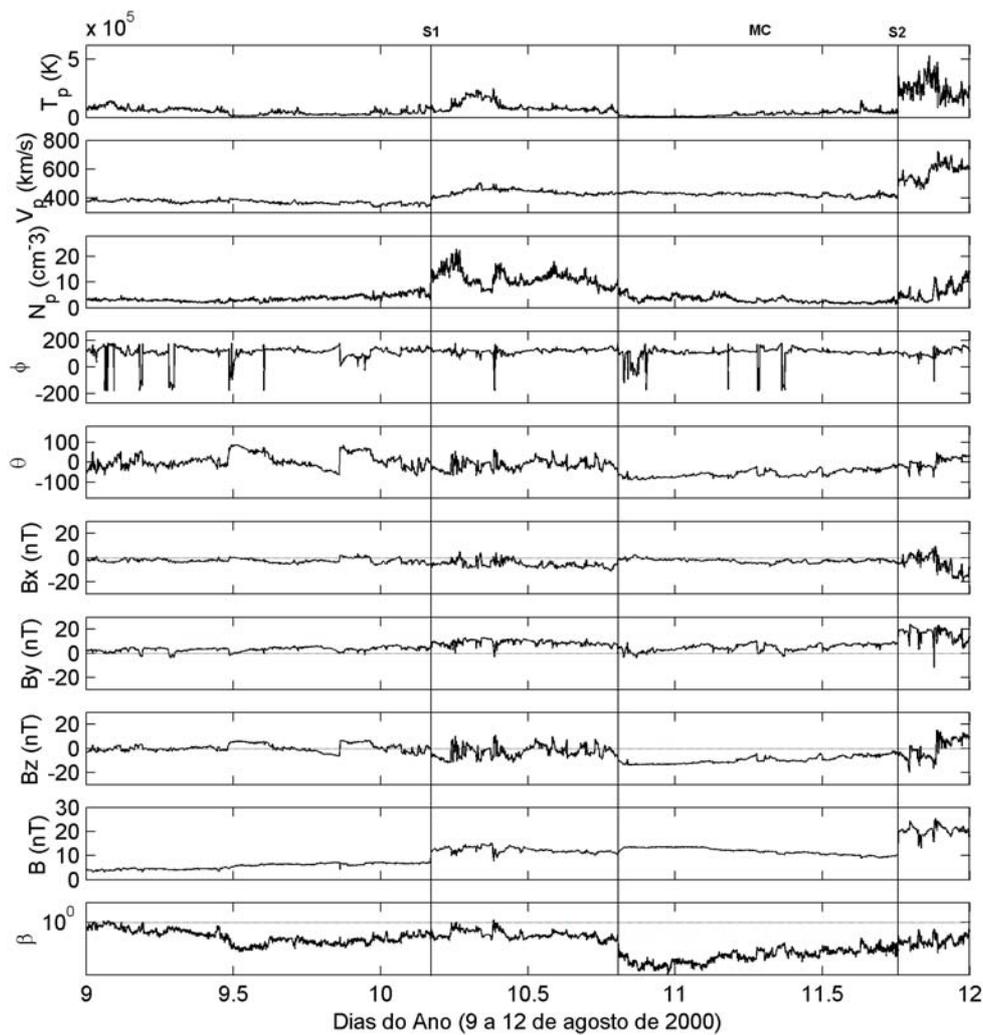


FIGURA 4.16 - Parâmetros do plasma do vento solar observado pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 11 de agosto de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos neste período, além da nuvem magnética, que causou a tempestade.

Na Figura 4.17, observa-se que, durante toda a fase de injeção de energia na corrente de anel, o IMF foi sul, ou seja, a reconexão não foi interrompida e observou-se um

parâmetro ε em todo o intervalo. Também a função $F(E)$ apareceu neste intervalo de tempo com um valor máximo de -55 nT/h. Integrada durante a fase principal, a taxa de injeção de energia na magnetosfera resultou em um total de $5,48 \times 10^{16} J$ da energia do vento solar que entrou na magnetosfera, sendo que, desta quantia, $3,8 \times 10^{16} J$ direcionou-se para baixas latitudes, ou seja, para formar a corrente de anel. O pico do epsilon ficou em torno de $5,35 \times 10^{12} W$.

O AE foi calmo no dia 9 de agosto, mas, depois desse dia, alcançou os 1000 nT, oscilando entre baixos e altos valores, até que, durante a fase principal, aumentou em intensidade, prolongando-se até a fase de recuperação. O K_p respondeu semelhantemente ao AE, superando-se na fase principal e sendo diminuto no dia 9 (valor 2). A corrente assimétrica apresentou dois picos: um no dia 10, quando o Dst começou a decair, e outro na fase principal, voltou a cair na fase de recuperação, mas seus valores superaram os observados no dia 9, como se visualiza na Figura 4.18.

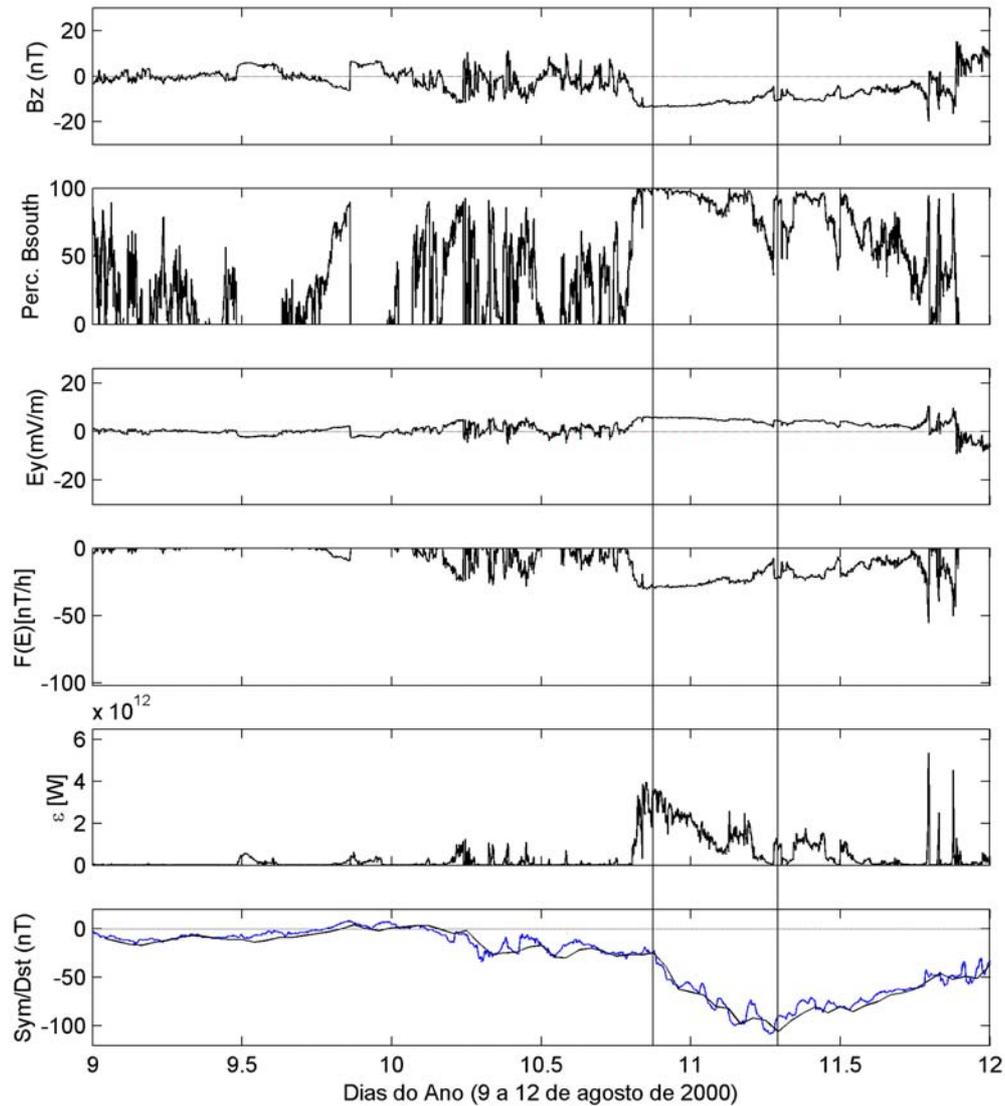


FIGURA 4.17 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 11 de agosto de 2000. Como resposta à injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

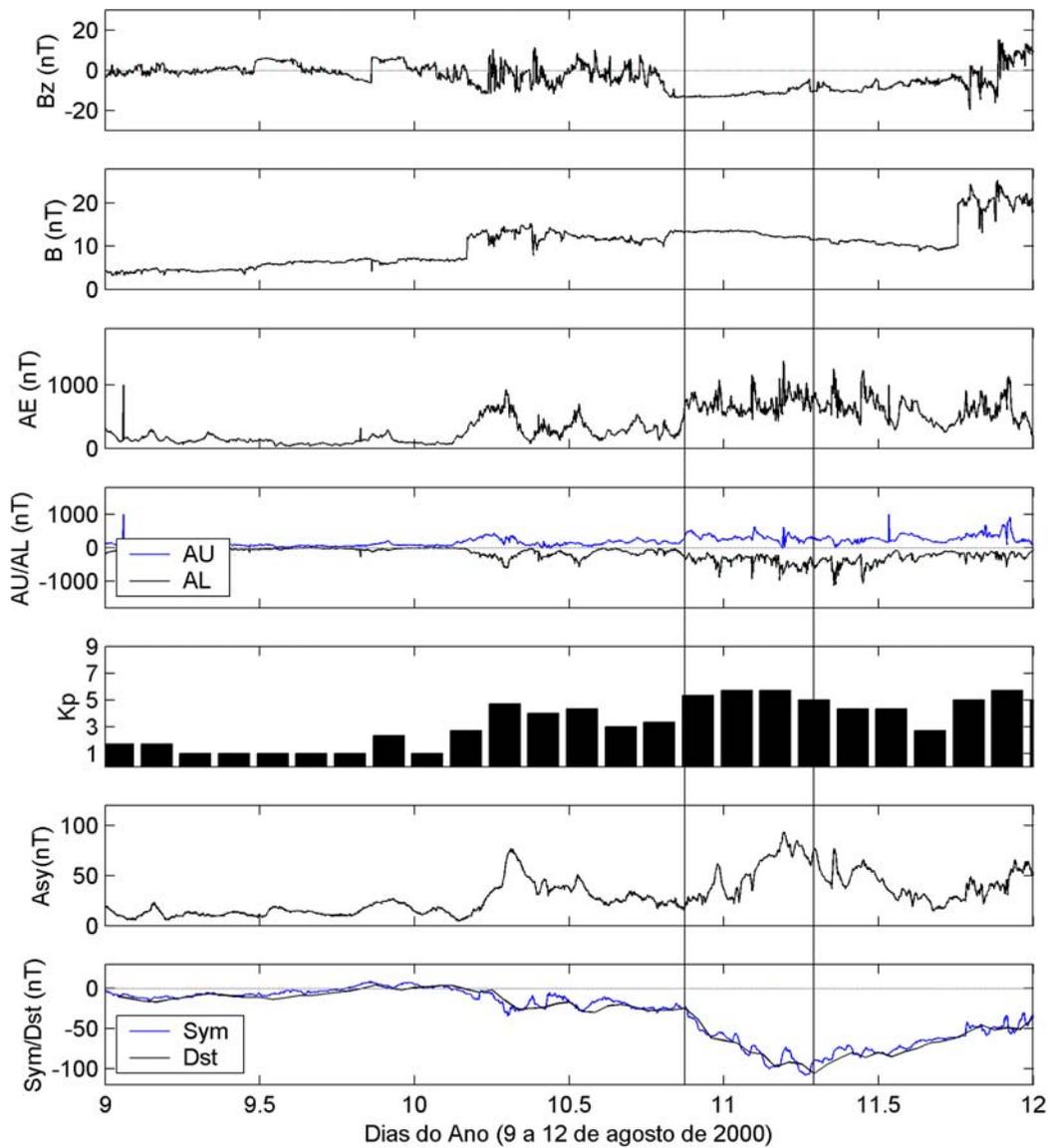


FIGURA 4.18 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 11 de agosto de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

4.7 Evento de 27 a 31 de outubro de 2001

A Figura 4.19 mostra que o aumento da densidade, da temperatura e da velocidade dos prótons identificou o primeiro choque, ocorrido às 2h42min UT do dia 28 de outubro, e detectado pelos instrumentos MAG /SWEPAM a bordo do satélite ACE. Logo depois, às 19h26min UT do mesmo dia, um choque reverso foi detectado (ver Figura 4.19). As estruturas que provavelmente estavam envolvidas com a tempestade, segundo os dados do monitor de prótons a bordo da espaçonave SOHO, foram detectadas às 15h02min UT do dia 25 de outubro e foram uma explosão do tipo X1.3/2B e uma CME do tipo halo que surgiram da RA 9672, localizada a 16° Sul e 21° Oeste, com um tempo de viagem de 57 horas e meia. No dia 27 o beta de plasma foi baixo e permaneceu assim por um dia. Também a temperatura dos prótons baixa parece identificar uma ICME que provavelmente causou um choque um dia antes do início do período estudado. Ao observar-se o componente B_z , percebe-se uma pequena deflexão, o que não caracteriza uma estrutura de nuvem magnética. Durante a passagem da estrutura ICME, B_z mostrou-se bastante oscilante. Percebe-se, pelo perfil do B_z , que uma região de bainha formou-se após o choque causado pela propagação da estrutura no meio interplanetário. E a ela deve-se a principal causa da tempestade magnética.

Contribuindo para a injeção de energia que foi estimada através do parâmetro epsilon, observou-se, conforme mostra a Figura 4.20, por um período de 2h, que o B_S permaneceu com valores inferiores a -10 nT , e que o campo elétrico E_y , pelo mesmo intervalo de tempo, superou o valor de 6 mV/m . A parcela do vento solar que foi injetada para dentro da magnetosfera foi pequena – em torno de $1,75 \times 10^{16} \text{ J}$ - enquanto que a dissipada na corrente de anel, e que foi responsável pela declinação da componente- H do campo geomagnético, foi estimada ser em torno de $5,39 \times 10^{16} \text{ J}$, ou seja, um valor muito maior do que a energia que entrou. O parâmetro de epsilon estimado teve um valor de pico em $4,66 \times 10^{12} \text{ W}$, enquanto que a injeção na corrente de anel teve sua taxa máxima em -49 nT/h .

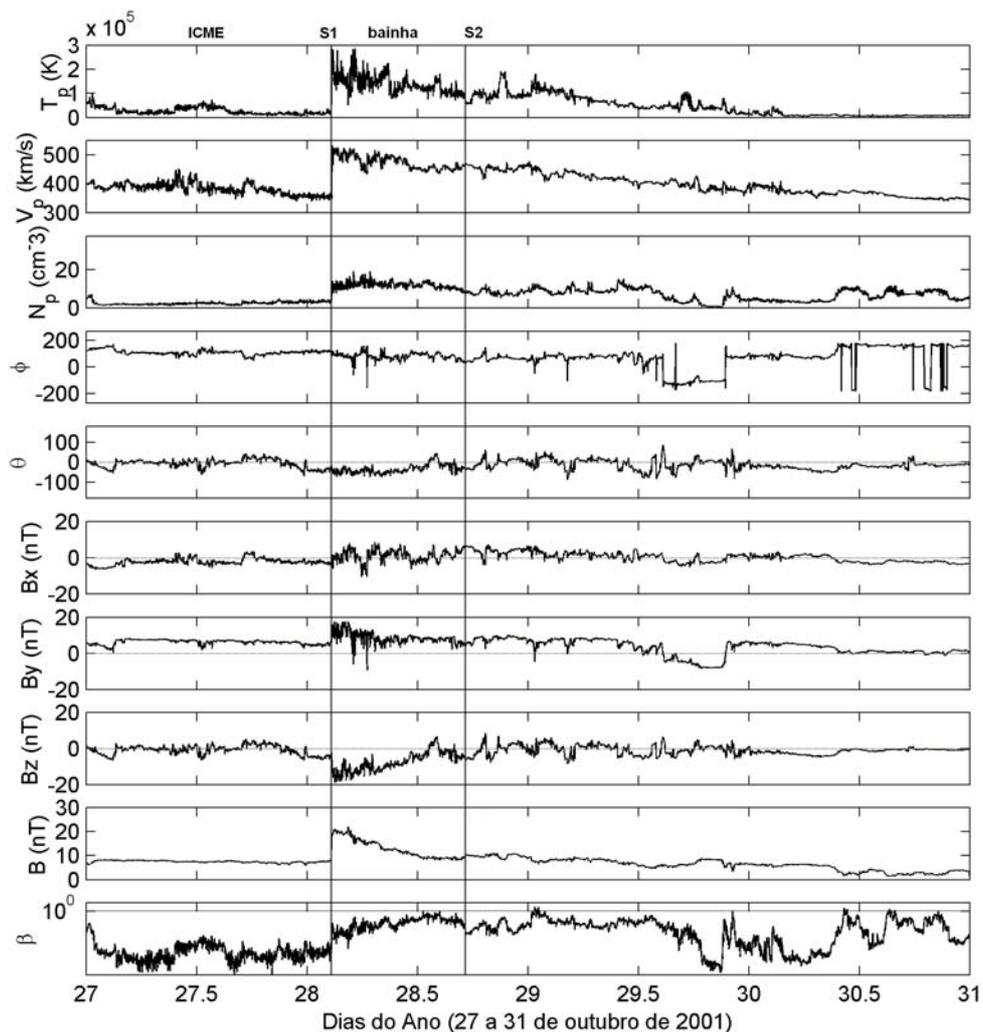


FIGURA 4.19 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 28 de outubro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além dos dois choques identificados durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

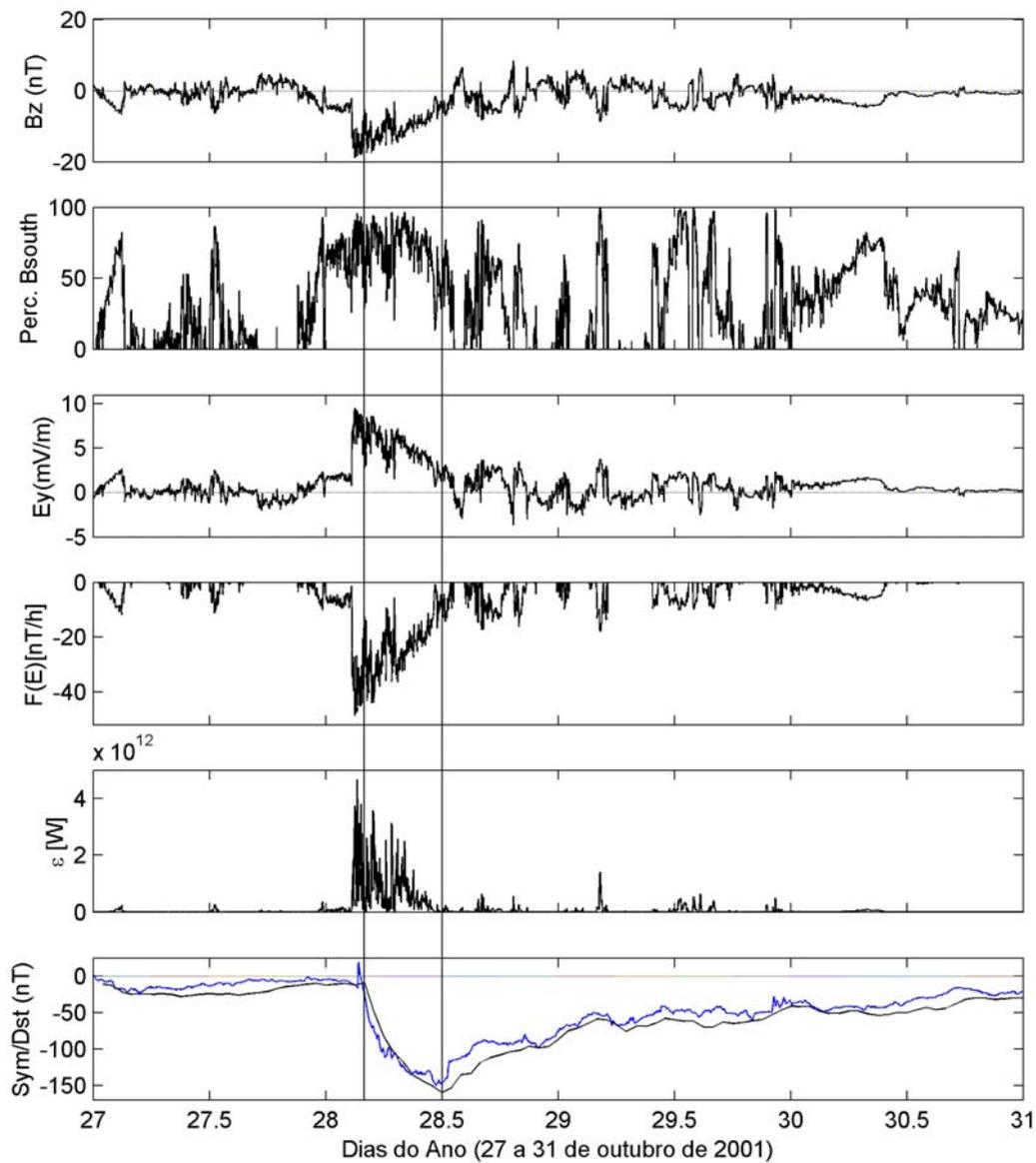


FIGURA 4.20 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 28 de outubro de 2001. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

Conforme mostrado pela Figura 4.21, na região auroral, os efeitos aparentes para a tempestade apareceram nos significativos valores para os índices durante a fase principal. O eletrojato auroral apresentou somente dois picos durante a fase principal, mas caiu entre estes dois picos para valores bem baixos. Em média, na fase principal, ficou em torno de 440 nT . Ainda na região auroral, o K_p não apresentou valores representativos durante o primeiro período, precursor à fase principal, mas assim que ela iniciou, pôde-se perceber um aumento claro na intensidade chegando a um valor 7, e permanecendo acima de 4 no restante da fase. Ao longo da recuperação, observou-se que a queda foi lenta e progressiva na intensidade, mas manteve-se até o fim do período. A média do índice Asy ficou em torno de 96 nT , sendo que dois picos são visíveis pela Figura 4.21. Na fase principal e perdurando na recuperação do Dst , o Asy respondeu à injeção de energia e à posterior perda das partículas da corrente de anel, intensificando seus valores, à medida que a injeção aumentava e diminuindo de intensidade assim que o Dst voltou a assumir valores normais de tempo calmo.

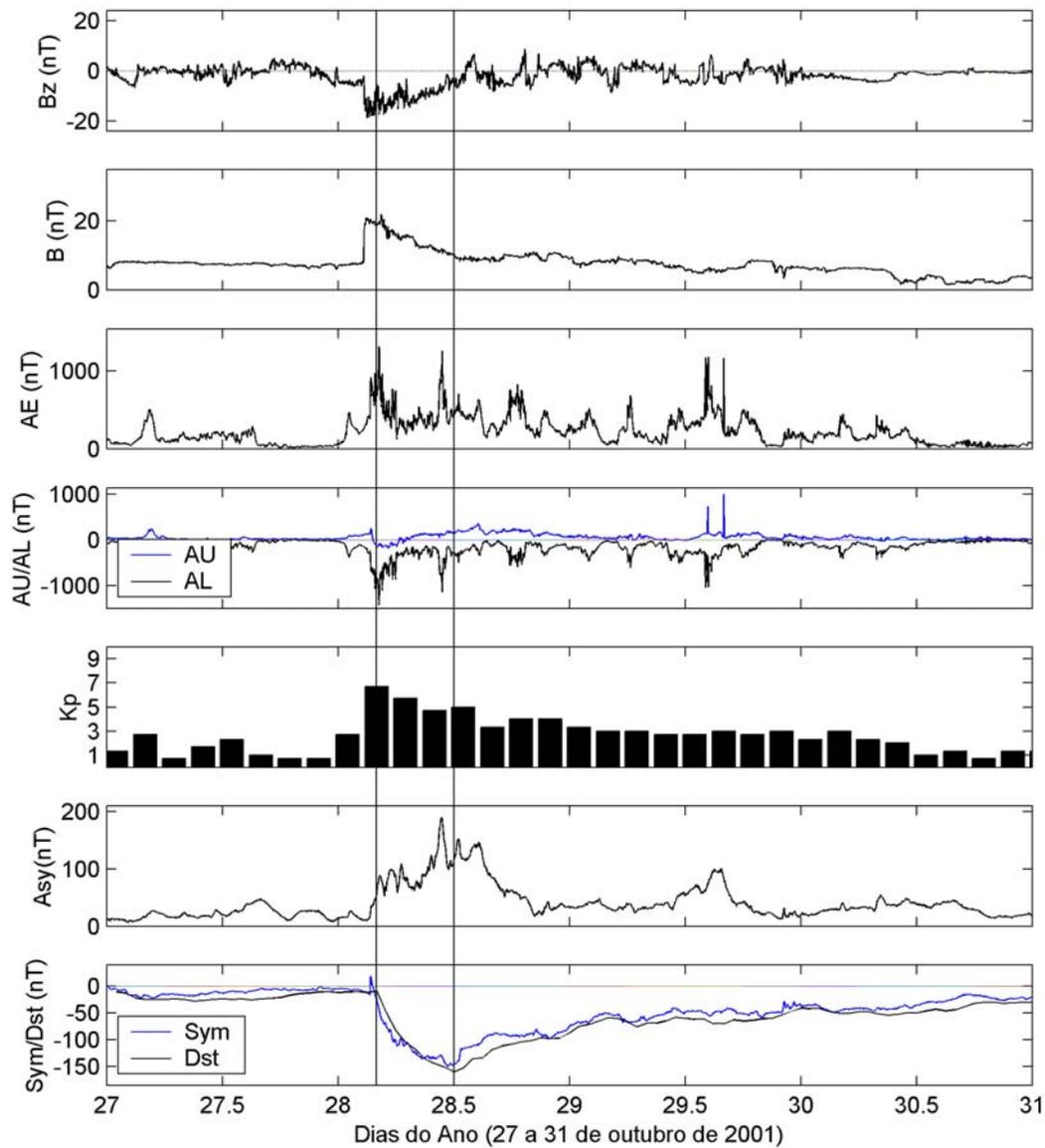


FIGURA 4.21 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 28 de outubro de 2001. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

4.8 Evento de 22 a 28 de novembro de 2001

A Figura 4.22 mostra que o último evento selecionado para a análise e comparação com os eventos de supertempestade foi marcado por 3 choques ocorridos no mesmo dia (24 de novembro) e distantes um do outro por poucas horas: o primeiro ocorreu às 5h45min UT; o segundo, às 8h UT e o terceiro às 9h UT. Todos eles foram frontais, e apenas foi possível observar o aumento na magnitude do IMF, porque os dados do meio interplanetário, como temperatura, densidade e velocidade, durante este período, apresentaram falhas. Pode-se observar que os componentes B_x e B_y do IMF apresentaram variações da mesma magnitude de B_z , provavelmente causada pela estrutura que se deslocava no espaço interplanetário.

A estrutura que causou o choque detectado no dia 24 e que depois levou à ocorrência da tempestade no mesmo dia foi a interação de duas ICMEs. As CMEs do tipo “halo” foram observadas no dia 22 de novembro, às 20h30min e às 23h30min UT, as duas com a mesma velocidade de propagação. Possivelmente, uma explosão do tipo M9.9, que surgiu da RA 9704 no mesmo dia da CME, esteja associada a elas.

A Figura 4.23 revela que não foi possível observar os dados do campo elétrico, nem das funções de injeção na magnetosfera e na corrente de anel, devido às falhas nos dados justamente no intervalo de maior importância para o cálculo destas energias. Observa-se apenas que, na fase de recuperação, apesar da incursão de B_z para valores positivos e já sem a reconexão, que o campo elétrico foi alto, resultado da alta velocidade do vento solar (em torno de 800 km/s). Em correspondência, observou-se que o parâmetro epsilon apresentou um valor de pico em torno de $8,3 \times 10^{12} W$.

A Figura 4.24 mostra que, durante a injeção de energia na corrente de anel, o índice AE apresentou dois picos de grande intensidade, sendo que num deles superou os 2700 nT e noutro foi um pouco mais tênue (próximo de 2000 nT). Na recuperação, permaneceu bem baixo sendo que, no período precedente à fase principal, manteve-se com valores moderados menores do que os da fase principal. Para o K_p , a resposta praticamente seguiu o mesmo caminho traçado pelo AE, com os mais altos valores na fase principal

(entre 7 e 9) e com pouca resposta na recuperação – muito baixos valores nesta fase. Antes da fase principal da tempestade, K_p manteve-se próximo de 3. Na Figura 4.24, com relação à corrente assimétrica, o Asy respondeu diretamente às duas injeções de energia na corrente de anel, visíveis pelo índice Sym , assumindo valores de pico nos extremos da fase principal (valores em torno de 350 nT).

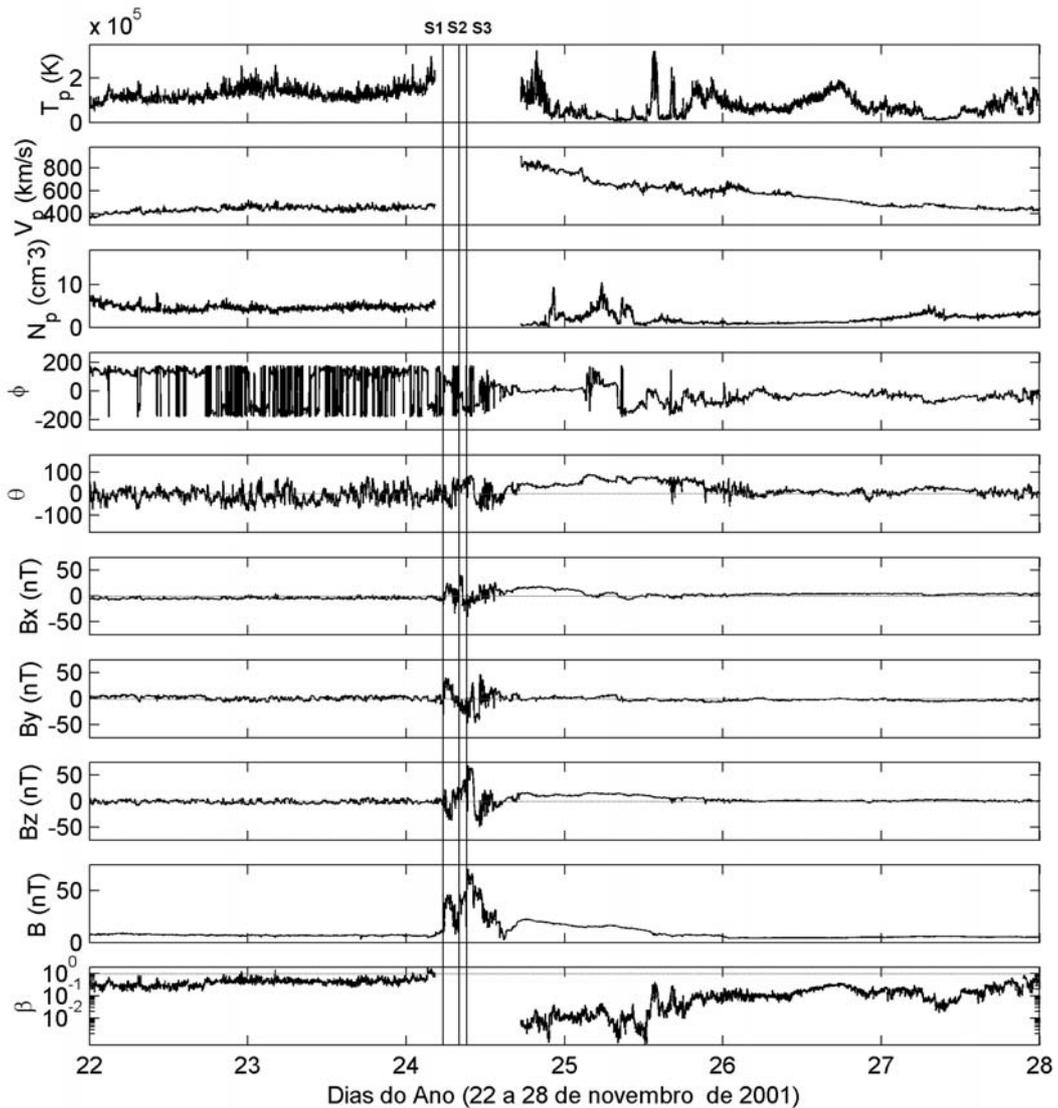


FIGURA 4.22 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 24 de novembro de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além dos três choques durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

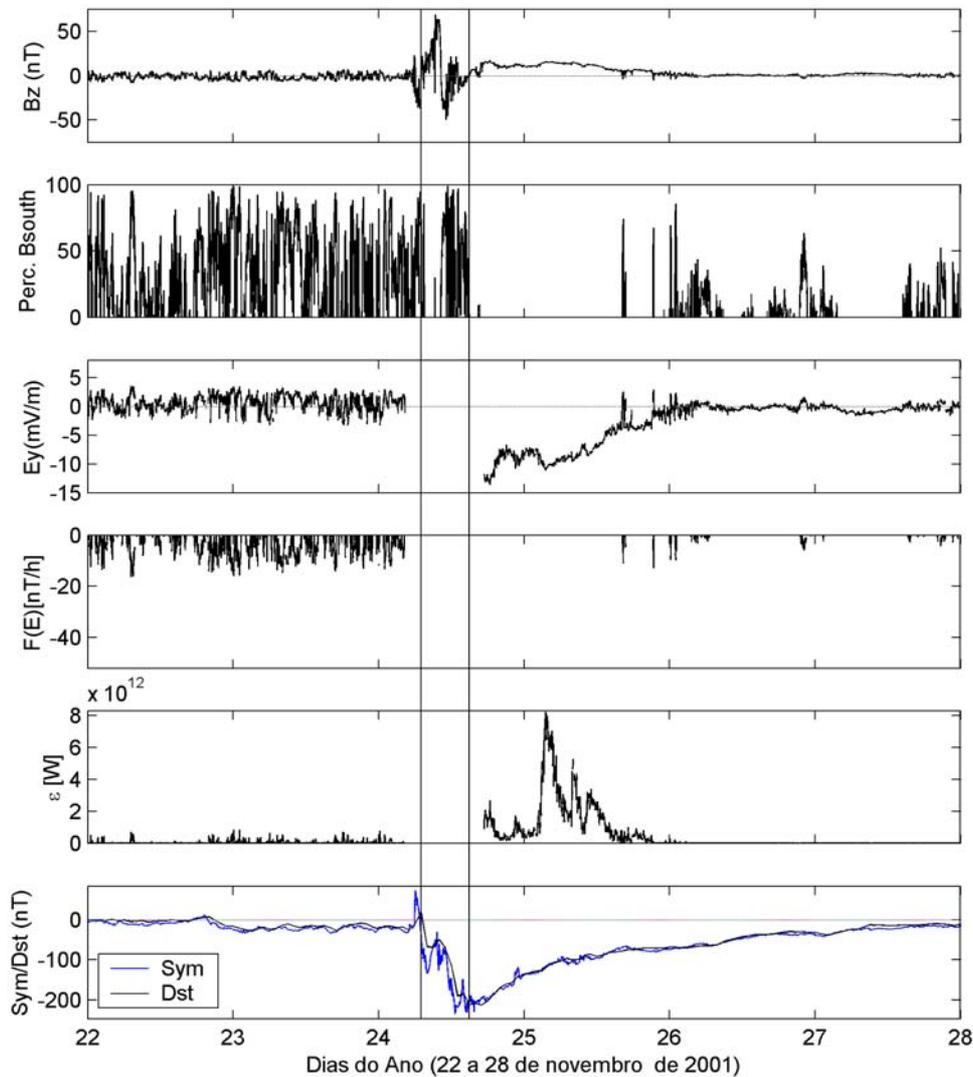


FIGURA 4.23 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , aparece somente em alguns períodos por causa das falhas nos dados de V_p e de B_z . As funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante a fase principal da tempestade de 24 de novembro de 2001. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

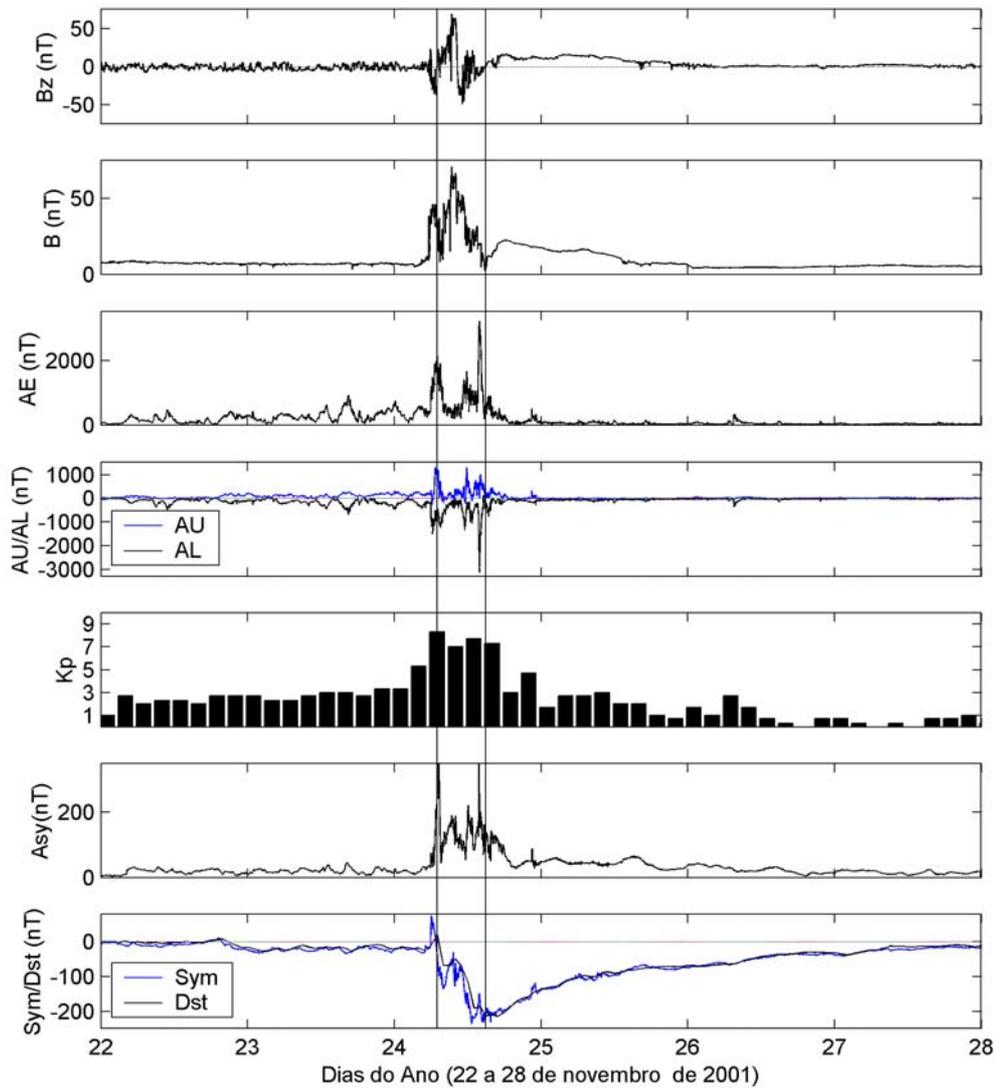


FIGURA 4.24 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) a para a tempestade do dia 24 de novembro de 2001. De cima para baixo, observam-se o IMF- B_z , a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

CAPÍTULO 5

OBSERVAÇÕES E COMPARAÇÕES

Na tentativa de entender de uma forma mais clara as principais características das supertempestades, decidiu-se fazer uma comparação com tempestades menos intensas, mas que não superassem as supertempestades em termos da energia depositada na corrente de anel. A partir da seleção e da classificação das tempestades, comparou-se os valores de pico dos índices geomagnéticos (Dst , Asy , Sym , AE e K_p) e de alguns dados do meio interplanetário (como, por exemplo, B_S e E_y) conforme se observou nas Tabelas 3.1 e 4.1, respectivamente. Os dados do meio interplanetário, principalmente B_S , E_y e a função de acoplamento na magnetopausa diurna, ε , são importantes para se compreender um pouco mais a geofetividade de cada evento. Os valores do epsilon, ε , apesar de não serem medidos para todas as tempestades, mostraram-se significativamente maiores para os eventos de supertempestades, o que já era esperado, devido às condições interplanetárias, principalmente à complexidade das estruturas envolvidas.

Na Figura 5.1, o número de eventos com valores de pico nos parâmetros interplanetários B_S , E_y e função ε , definida na Equação (2.16), e nos índices geomagnéticos Asy , AE , K_p num mesmo intervalo é identificado. A análise é feita, preservando-se a classificação anteriormente feita: supertempestades e tempestades magnéticas intensas. Com isso, torna-se fácil comparar as duas classes de tempestades e ver quais são as diferenças mais visíveis em termos geomagnéticos e do vento solar que propagou as estruturas causadoras de cada evento. Com relação aos índices, para as supertempestades, seus valores são em geral maiores. Para o K_p , parece haver uma linha de corte, pois as supertempestades assumem valores de pico sempre acima de 8_0 . Tal fato deve-se ao K_p medir vários sistemas de corrente, inclusive a corrente de anel, que provavelmente seja a maior contribuição para este índice. Além disso, outras correntes podem ter sido intensificadas e ter influenciado nas medidas. Para o índice Asy , parece haver uma separação entre as classes das tempestades, porém com superposição, em consequência da própria assimetria da corrente de anel.

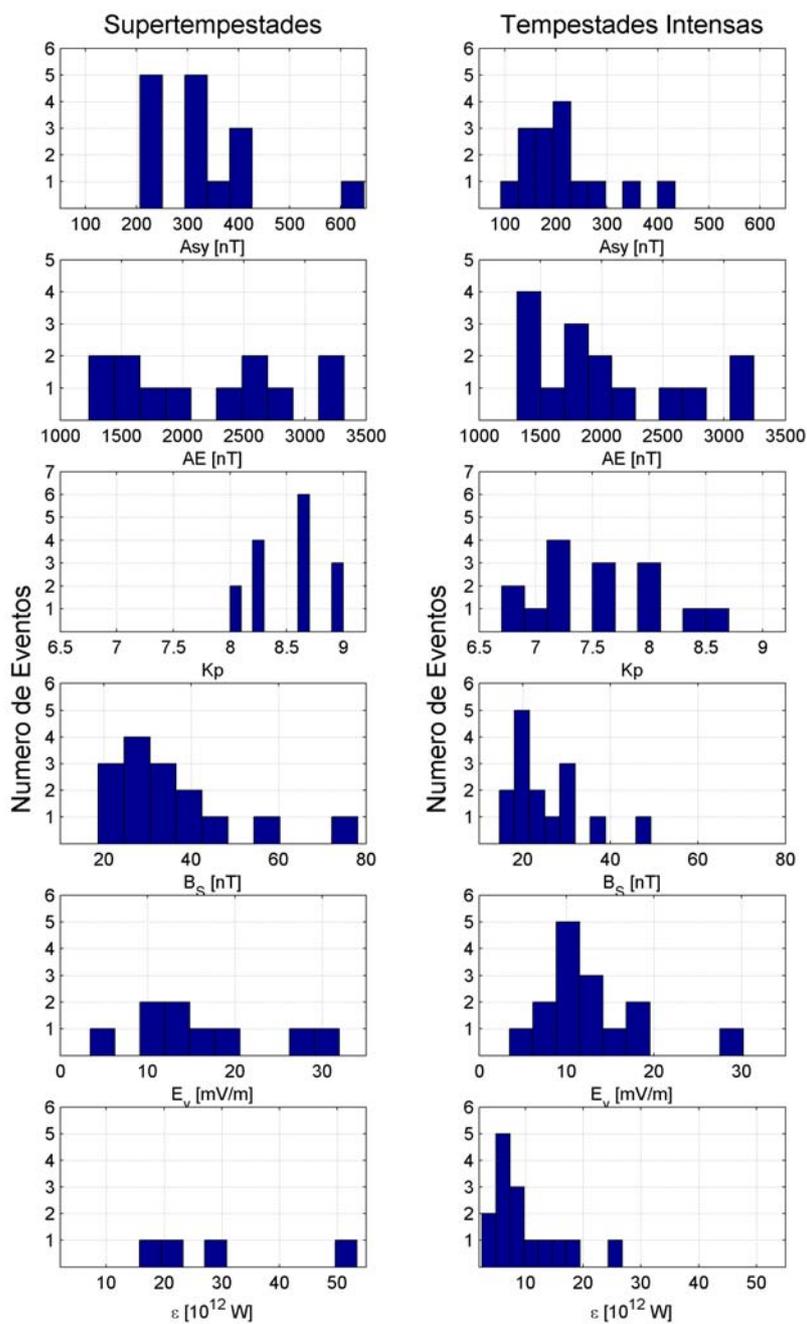


FIGURA 5.1 - Número de eventos que apresentaram valores de pico nos índices geomagnéticos e nos dados do meio interplanetário num mesmo intervalo de valores. O número de eventos analisados não é o mesmo para todos os parâmetros, porque nem todos apresentaram medidas durante o período de ocorrência da tempestade.

Conforme se observa ainda na Figura 5.1, B_S assume valores mais altos nas supertempestades e, além disso, o pico da distribuição ocorre em um valor mais alto do que para as tempestades intensas. Porém não há uma separação clara nos valores de pico para as duas classes. Com relação a E_y , a separação é menos clara ainda, com valores intensos ocorrendo em ambas as classes. Já para o epsilon, mesmo com a pequena amostra que foi possível considerar, os valores de pico da função concentraram-se, no geral, acima dos $2 \times 10^{13} W$, enquanto que as intensas tendem a se concentrar em valores menores que este limite de corte.

Para o período de 1998 até 2001, percebe-se que nas supertempestades os picos do AE foram altos comparados aos obtidos nas supertempestades anteriores. Entra em dúvida se as medidas feitas pelas estações geomagnéticas de solo na época em que as dez primeiras supertempestades foram escolhidas realmente conseguiram medir a intensidade do eletrojato auroral para o período da tempestade. As medidas estão disponíveis através do site do CDAWeb Explorer (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/). Como nem todas as supertempestades apresentaram medidas para este índice, provavelmente o eletrojato auroral tenha se deslocado em direção ao Equador. Este fato é verificado na Figura 5.2, que mostra as correlações lineares entre os valores de pico observados para as tempestades intensas e super intensas. O método utilizado é o de correlação Pearson, onde o coeficiente linear, r , indica se dois índices estão ou não relacionados.

O que se observa na Figura 5.2 é uma dispersão ($r = 0,06$) bem acentuada em $Dst \times AE$ para as supertempestades, o que era esperado devido à intensidade dos eventos. Durante tempestades magnéticas intensas o que se observa é uma aparente saturação ou um decréscimo nas medidas do AE, provavelmente devido ao fato mencionado acima, em que a oval auroral torna-se consideravelmente menor em latitude e as estações não conseguem monitorar corretamente a evolução da subtempestade (Feldstein, 1992). Isto poderia também contribuir para a média baixa de AE próximo ao máximo solar. O processo de subtempestade é um processo transiente iniciado no lado diurno da Terra em que uma quantidade significativa de energia, que é derivada da interação vento solar-

magnetosfera, é depositada na ionosfera auroral e na magnetosfera (Rostoker et al., 1980).

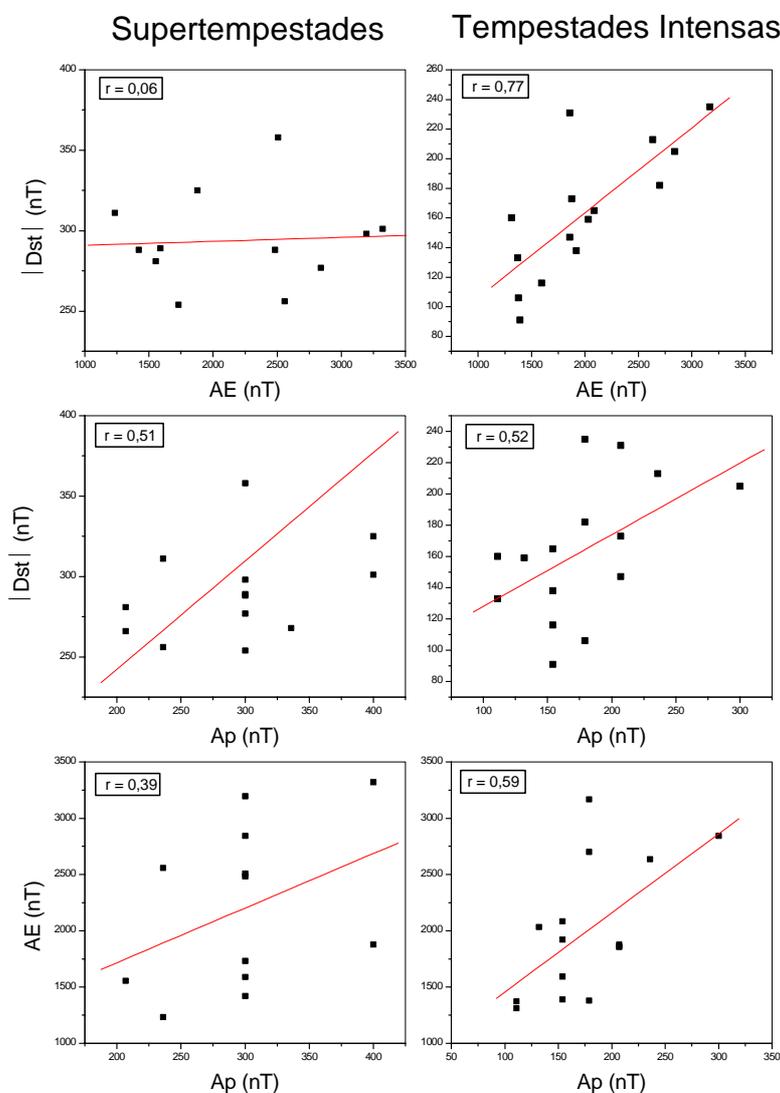


FIGURA 5.2 - Correlação linear entre os valores de pico dos índices geomagnéticos A_p (e então K_p), Dst e AE que foram apresentados nas Tabelas 3.1 e 4.1, nos Capítulos 3 e 4, respectivamente.

Com relação aos demais índices, o que se observa é que A_p e AE apresentam uma grande dispersão durante tempestades muito intensas, provavelmente causada pela alta influência da corrente de anel sobre o índice A_p e porque AE flutua mais rapidamente e

mais intensamente quando os eletrojetos aurorais variam durante a fase principal. Também devido à expansão do eletrojato, a oval auroral pode ser expandida para a região equatorial durante as tempestades intensas. Nota-se que esta correlação é maior no caso das tempestades magnéticas intensas, mas continua baixa ($r = 0,59$). Em relação aos picos dos índices A_p e Dst , percebe-se que o coeficiente de correlação para supertempestades e tempestades intensas não variou muito de uma classe de tempestade para outra, o que provavelmente deve-se ao fato do deslocamento da oval auroral em supertempestades.

A Figura 5.3 mostra que nas supertempestades não há uma boa correlação entre o índice Dst e a componente B_S do IMF, mas pode haver também uma correlação não-linear. A relação $Dst \times B_S$ é uma aproximação, ou seja, ao considerar-se a equação do balanço de energia (Equação 2.20), vê-se que a função de injeção é proporcional ao campo elétrico interplanetário ($E_y = vB_S$). Com isso, pode-se concluir que o Dst depende da integral do campo magnético B_S . Para as intensas, a correlação foi grande ($r = 0,75$), indicando que à medida que o componente sul do IMF aumentava correspondia um aumento no Dst . O que acontece com o campo elétrico interplanetário, E_y , é similar ao que ocorre com o B_S : ele é proporcional à integral sobre o tempo, sendo que a correlação entre E_y e Dst é apenas uma aproximação. Já para as intensas, a correlação foi boa ($r = 0,66$). No último painel, a correlação entre o índice Dst e a função de injeção ε mostram valores moderados para ambas as classes. A explicação pode estar no fato do Dst depender mais da integral do epsilon do que dos valores de pico da mesma.

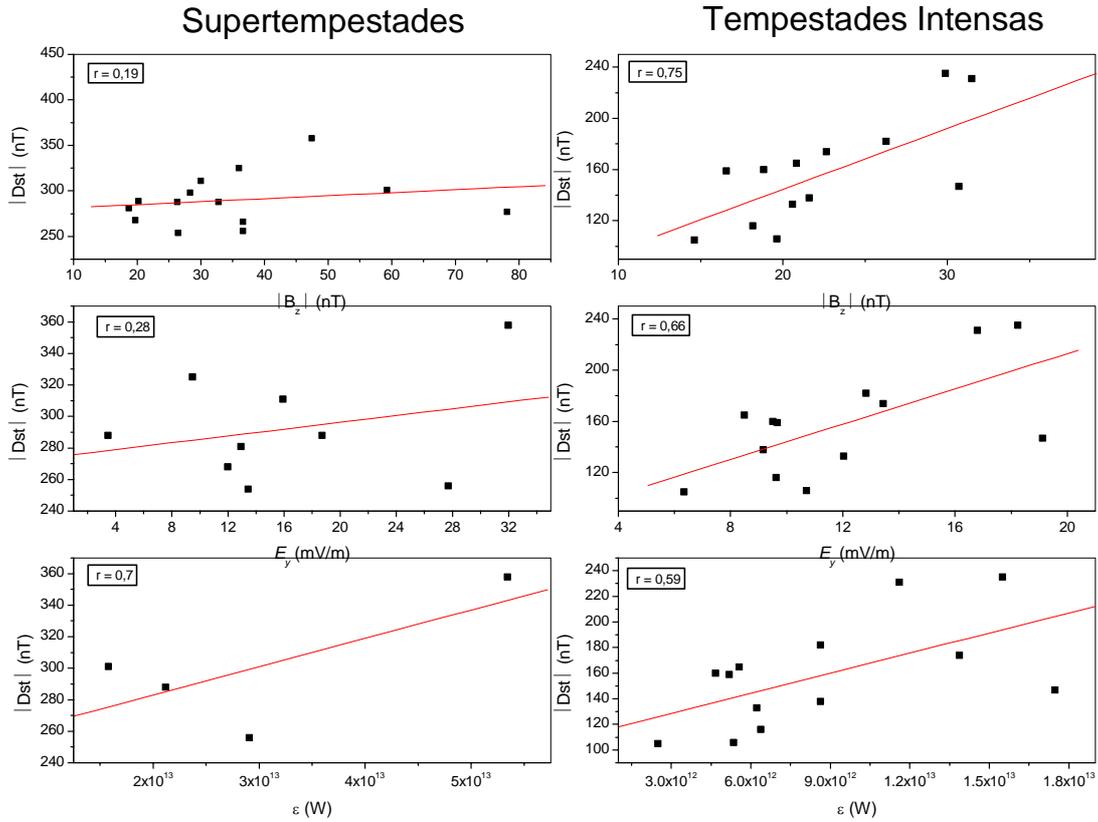


FIGURA 5.3 - Correlação linear dos valores de pico dos parâmetros interplanetários E_y , B_S e a função de acoplamento, ϵ , com o índice Dst .

Para se entender de que forma a energia é injetada e de que forma ela se perde nas mais diversas regiões internas à cavidade magnetosférica, é preciso entender um pouco acerca dos mecanismos que dominam e desencadeiam os processos energéticos. A ideia da física que está envolvida por detrás de cada um destes mecanismos revela que a existência de campos elétricos e magnéticos é fundamental para que o plasma, e, portanto, as partículas, sejam acelerados e intensifiquem a energização tanto da magnetosfera como da corrente de anel.

Foi visto no Capítulo 2 deste trabalho que o fenômeno para o qual o parâmetro epsilon de Akasofu ($\epsilon = 10^7 uB^2 l_0^2 \text{sen}^4(\theta/2)$) é calculado é o processo de reconexão. Essa dependência dá-se a partir do ângulo de inclinação (θ) entre a projeção do campo magnético interplanetário e o plano perpendicular à linha Terra-Sol, ou seja, para um

ângulo de 0° obtém-se o mínimo valor para a função de injeção, enquanto que sentidos opostos dos campos magnéticos interplanetário e geomagnético (180°) maximizam a função. Note que para este mesmo valor do ângulo θ , tem-se um processo de reconexão muito intenso.

Acumuladas, em sua maioria, na região da cauda, as partículas do vento solar que são injetadas na magnetosfera, sentem a presença de campos elétrico (E_y) e geomagnético, e, com isso, passam a ser aceleradas através das derivas eletromagnéticas em direção à Terra. O principal processo pelo qual as partículas são injetadas na corrente de anel, formando a estrutura em forma toroidal na região equatorial da Terra, é o processo de convecção devido ao campo elétrico interplanetário, E_y , que é mapeado para dentro da magnetosfera pela reconexão na magnetopausa diurna. A estimativa da energia cinética das partículas foi feita através da relação DPS (Equação 2.7) cuja dependência está no índice Dst^* .

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram que, com estas informações e com os dados que foram obtidos através de observações de satélites, foi possível fazer uma estimativa das energias injetadas na magnetosfera para cada evento. O parâmetro epsilon foi integrado durante o período correspondente à fase principal das tempestades, além daquele intervalo de tempo em que se observou variações no Dst de 50 e 100 nT . A partir daí, tinha-se uma estimativa da energia que entrou na magnetosfera considerando-se o processo de reconexão como fator determinante, e, com isso, foi possível identificar aquelas tempestades que foram mais energéticas e as que necessitaram de mais injeção de energia a fim de causar a mesma variação no Dst . O mesmo método foi usado tanto para supertempestades como para tempestades intensas, mantendo-se a separação nas classes distintas com o objetivo de comparação entre ambas.

O que em geral se observa é que as supertempestades foram caracterizadas por valores maiores nos valores integrados do epsilon nas supertempestades do que nas tempestades intensas. Com relação à energia necessária para causar variações de 50 e 100 nT ambas apresentam, em média valores semelhantes.

TABELA 5.1 – Integral do parâmetro epsilon calculada para os eventos de supertempestade magnética durante a fase principal das mesmas e durante o intervalo de tempo em que se observou variações no *Dst* de 50 e 100 nT. Os dados para as três primeiras tempestades foram obtidos do trabalho de *Monreal-MacMahon e Gonzalez (1997)*. Os pontos de interrogação no último evento revelam que não foi possível medir a energia durante toda a fase principal.

Supertempestades	$\int \varepsilon dt$ (Joule)	$\int \varepsilon dt$ (Joule) ($\Delta Dst = 50 nT$)	$\int \varepsilon dt$ (Joule) ($\Delta Dst = 100 nT$)
13/04/1981	$1,4 \times 10^{17}$	-	-
14/07/1982	$5,2 \times 10^{17}$	-	-
6/09/1982	$1,5 \times 10^{17}$	-	-
13/03/1989	-	-	-
21/10/1989	-	-	-
17/11/1989	-	-	-
10/04/1990	-	-	-
23/03/1991	-	-	-
29/10/1991	-	-	-
10/05/1992	-	-	-
6/04/2000	$1,9 \times 10^{17}$	$3,9 \times 10^{16}$	$7,52 \times 10^{16}$
15/07/2000	-	-	-
31/03/2001	$2,5 \times 10^{17}$	$3,19 \times 10^{16}$	$3,19 \times 10^{16}$
11/04/2001	$1,11 \times 10^{17}$	$1,43 \times 10^{16}$	$2,02 \times 10^{16}$
6/11/2001	-	-	-
Média	$(2,22 \pm 1,69) \times 10^{17}$	$(2,84 \pm 1,27) \times 10^{16}$	$(4,24 \pm 2,9) \times 10^{16}$

TABELA 5.2 – Integral do parâmetro epsilon calculada durante a fase principal das tempestades magnéticas intensas e durante o intervalo de tempo em que se observou variações no *Dst* de 50 e 100 nT.

Tempestades Intensas	$\int \varepsilon dt$ (Joule)	$\int \varepsilon dt$ (Joule) ($\Delta Dst = 50 nT$)	$\int \varepsilon dt$ (Joule) ($\Delta Dst = 100 nT$)
10/03/1998	$2,89 \times 10^{16}$	$2,71 \times 10^{16}$	$2,89 \times 10^{16}$
4/05/1998	$8,39 \times 10^{16}$	$8,02 \times 10^{16}$	$8,02 \times 10^{16}$
6/08/1998	$6,11 \times 10^{16}$	$4,98 \times 10^{16}$	$6,11 \times 10^{16}$
16/04/1999	$1,22 \times 10^{16}$	$2,1 \times 10^{14}$	$6,52 \times 10^{15}$
22/09/1999	$1,94 \times 10^{16}$	$1,7 \times 10^{16}$	$1,94 \times 10^{16}$
22/10/1999	$1,05 \times 10^{17}$	$8,57 \times 10^{15}$	$2,56 \times 10^{16}$
12/02/2000	$5,27 \times 10^{16}$	$1,65 \times 10^{16}$	$4,74 \times 10^{16}$
24/05/2000	$4,32 \times 10^{16}$	$3,08 \times 10^{16}$	$3,59 \times 10^{16}$
11/08/2000	$5,48 \times 10^{16}$	$3,90 \times 10^{16}$	$5,48 \times 10^{16}$
12/08/2000	$1,58 \times 10^{17}$	$1,19 \times 10^{16}$	$8,39 \times 10^{16}$
4/10/2000	$1,56 \times 10^{17}$	$2,17 \times 10^{16}$	$6,37 \times 10^{16}$
6/11/2000	$2,98 \times 10^{16}$	$1,87 \times 10^{16}$	$2,75 \times 10^{16}$
20/03/2001	$9,85 \times 10^{16}$	$1,63 \times 10^{16}$	$2,02 \times 10^{16}$
28/10/2001	$1,75 \times 10^{16}$	$7,72 \times 10^{15}$	$9,72 \times 10^{15}$
24/11/2001	-	-	-
Média	$(6,58 \pm 4,84) \times 10^{16}$	$(2,4 \pm 2,1) \times 10^{16}$	$(3,85 \pm 2,52) \times 10^{16}$

A partir da energia do vento solar, que é transferida para a magnetosfera interna, pode-se ter uma idéia da parcela que é transferida para a corrente de anel. Tal parcela não depende de ε , mas é variável com Dst^* . Como foi visto anteriormente, é a relação DPS que dá a idéia da quantidade de energia que circula na corrente de anel. A Tabela 5.3 mostra, para cada tempestade magnética, a quantidade de energia transferida para a

corrente toroidal. Muitos dos eventos de supertempestade não puderam ser estudados em termos desta energia, porque a falta de dados da pressão dinâmica do vento solar não permitiu a correção de Dst , em que se baseia a relação DPS.

TABELA 5.3 – Energia transferida para a corrente de anel, calculada através da relação DPS para as supertempestades e tempestades magnéticas intensas.

Supertempestades	$W_{RC} (J)$	Tempestades Intensas	$W_{RC} (J)$
13/04/1981	$6,3 \times 10^{16}$	10/03/1998	$2,51 \times 10^{16}$
14/07/1982	$8,9 \times 10^{16}$	4/05/1998	$4,19 \times 10^{16}$
6/09/1982	$6,7 \times 10^{16}$	6/08/1998	$2,33 \times 10^{16}$
14/03/1989	-	16/04/1999	$8,6 \times 10^{15}$
21/10/1989	-	22/09/1999	$2,0 \times 10^{16}$
17/11/1989	-	22/10/1999	$5,06 \times 10^{16}$
10/04/1990	-	12/02/2000	$3,59 \times 10^{16}$
23/03/1991	-	24/05/2000	$4,15 \times 10^{16}$
29/10/1991	-	11/08/2000	$3,8 \times 10^{16}$
10/05/1992	-	12/08/2000	$4,79 \times 10^{16}$
6/04/2000	$4,2 \times 10^{16}$	4/10/2000	$6,65 \times 10^{16}$
15/07/2000	-	6/11/2000	$4,54 \times 10^{16}$
31/03/2001	$4,95 \times 10^{16}$	20/03/2001	$1,02 \times 10^{17}$
11/04/2001	$4,96 \times 10^{16}$	28/10/2001	$5,01 \times 10^{16}$
6/11/2001	$6,62 \times 10^{16}$	24/11/2001	$5,34 \times 10^{16}$
Média	$(6,09 \pm 1,57) \times 10^{16}$	Média	$(4,33 \pm 2,2) \times 10^{16}$

Os valores encontrados representam boa parte da energia da energia total dentro da magnetosfera. Em média se observa que a energia que foi transferida para a corrente de anel foi maior nas supertempestades do que nas tempestades intensas, mas em muitas destas últimas observou-se valores significativos. Alguns deles, como a tempestade intensa de 28 de outubro de 2001, mostram que se comparar com o epsilon de Akasofu,

a energia dissipada na corrente de anel excedeu a energia que entrou na magnetosfera, ou seja, teve-se mais perda do que ganho de energia. Aqui, como em outros casos, fica clara a necessidade de correções no cálculo da função de acoplamento, que vai ser motivação para a próxima seção deste capítulo.

5.1 Correção do Parâmetro Epsilon

Os cálculos nos quais estão baseadas as tabelas anteriores consideram que a magnetopausa não se desloca com a variação da pressão, mas, sim, mantém-se na posição fixa $l_0 = 7R_E$. Este valor foi obtido empiricamente e é definido como a dimensão linear da área da seção transversal da magnetopausa (*Perreault e Akasofu, 1978*). Esta estimativa é boa quando se trata de tempestades moderadas, em que os parâmetros do vento solar e do IMF são mais tênues e não são marcados por estruturas interplanetárias muito complexas. Nos eventos de tempestade magnética intensa, a magnetopausa é comprimida intensamente e pode chegar a distâncias bem menores do que l_0 , ou seja, a área da seção transversal é reduzida. Este fato foi motivação para que uma correção do parâmetro epsilon fosse proposta por *Monreal-MacMahon e Gonzalez, em 1997*. Esta correção é dada por:

$$\varepsilon^* = \left(\frac{R_{CF}}{l_0} \right)^2 \varepsilon, \quad (5.1)$$

onde, conforme já foi visto nos capítulos anteriores, a expressão que descreve o raio da magnetopausa corrigido pela pressão dinâmica do vento solar, R_{CF} , é dada pela Equação 2.15 e foi obtida a partir do balanço entre as pressões magnética e do vento solar. Durante eventos muito intensos, o que se espera é que, devido à redução do raio da magnetopausa, seja observada uma redução nos valores da função de acoplamento, ε^* . Isso nem sempre ocorre, porque o parâmetro mais importante e que determina o tempo de injeção de energia é o componente B_z do IMF com direção sul. Então pode-se ter uma velocidade não tão maior que a velocidade média do vento solar, e observar-se que a magnetopausa não foi comprimida intensamente mesmo com a ocorrência de uma supertempestade.

Mas considerar somente a geometria do sistema, que é modificada pelas variações da pressão dinâmica do vento solar, não leva em conta a eficiência do processo de reconexão na energização da magnetosfera. O parâmetro de Akasofu surgiu a partir da consideração de que esta eficiência, representada por α , no trabalho de *Vasyliunas et al.* (1982), depende dos parâmetros do vento solar (N_p e V_p , e, portanto, pressão dinâmica), é dada por $\alpha = 1$ (*Gonzalez et al.*, 1990; *Vasyliunas et al.*, 1982). Mas se fosse possível considerar as mudanças na composição e na velocidade do vento solar, poder-se-ia melhorar este parâmetro e, portanto, a análise da influência que a pressão tem sobre a energia que é dissipada para dentro da magnetosfera.

Seguindo esta idéia, é que a segunda correção do epsilon de Akasofu sofreu alterações em sua fórmula. Além da correção na geometria, considera-se que α é um termo que varia conforme a pressão dinâmica e avalia a eficiência da reconexão devido à pressão. Um dos fatores que influencia na eficiência do processo de reconexão é a pressão dinâmica. Mais uma vez esta grandeza parece influenciar na estimativa da taxa de energia transferida do vento solar para dentro da magnetosfera. Se levar-se em conta que a compressão e o empilhamento (*draping*) das linhas de campo interplanetário na frente da magnetosfera contam com a contribuição da pressão que o vento solar exerce quando encontra um obstáculo em sua trajetória, percebe-se que as linhas de campo se reconectam sob a influência deste acúmulo de linhas. É fácil pensar que, se um fator externo atua no sentido de propiciar o encontro de linhas de campo com sentidos opostos, o processo é mais eficiente quando se compara a um caso onde não há a presença de um fator externo influenciando na reconexão magnética. Neste último caso, as linhas “encontrar-se-iam” aleatoriamente e possivelmente não haveria injeção em escalas tão grandes como as observadas em muitos eventos.

Com base nestas idéias e na análise dimensional feita por *Vasyliunas et al.* (1982) para as funções de injeção de energia, sugeriu-se como complemento do trabalho uma segunda correção para o parâmetro epsilon a partir da Equação 5.1. Esta correção é representada por:

$$\varepsilon^{**} = \left(\frac{P}{\overline{P}_0} \right)^{1/n} \varepsilon^*, \quad (5.2)$$

onde n assume os valores 2 e 6. O valor $n=2$ deve-se ao fato de que pressão dinâmica varia com a área da região de interação, e uma vez que ela é definida como a força do vento solar que é aplicada sobre a área efetiva da magnetopausa ($A=Rcf^2$), tem-se que a pressão varia com o inverso do quadrado do raio da seção transversal. O valor $n=6$ deve-se ao fato de que a pressão magnética varia com o inverso da distância radial do centro da Terra na sexta (6^a) potência, que decorre da expressão da pressão magnética, $P_{mag}=B^2/2\pi$, onde B é dado pela Equação 2.11. O valor de \overline{P}_0 é a média da pressão cinética do vento solar durante todo o ciclo solar a fim de se fazer uma normalização pela média da pressão. P representa a pressão dinâmica do vento solar. Como a média é calculada durante todo o atual ciclo solar, é certo que seu valor cresça, principalmente durante a fase principal das supertempestades magnéticas, fazendo com que a razão P/\overline{P}_0 seja maior que a unidade. A partir daí, o resultado da razão elevado na potência $1/n$ ainda permanece maior que a unidade, o que resulta em valores de ε^{**} maiores que ε^* . Nos cálculos que seguem, considera-se $n=2$, uma vez que é o inteiro para o qual a correção do parâmetro epsilon apresentou maiores valores, e como se está interessado em correções mais significativas, considerou-se para comparação somente $n=2$.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5, seguem as estimativas das correções dos parâmetros de acoplamento sugeridas e alguns dados de supertempestades magnéticas encontrados no trabalho de *Monreal-MacMahon e Gonzalez (1997)*, considerando-se todos os trinta eventos estudados no trabalho. É interessante perceber o que foi comentado acima, e verificar que a intensidade da tempestade implica em uma maior eficiência do processo de reconexão, que é desencadeada entre outros fatores pelo aumento da pressão.

Na Tabela 5.4, devido à falta dos dados do meio interplanetário necessários para o cálculo do parâmetro epsilon, também não foi possível constatar as correções para todos os eventos selecionados. Já na Tabela 5.5, com exceção de um evento, que apresentou

falhas nos dados, todas as funções de acoplamento foram calculadas com as respectivas correções.

TABELA 5.4 – Cálculo das integrais do epsilon de *Perreault e Akasofu* (1978) e das integrais das correções desta função de acoplamento durante eventos de supertempestade. Para as três primeiras tempestades, os dados foram obtidos de *Monreal-MacMahon e Gonzalez* (1997).

Supertempestades Magnéticas	$\int \varepsilon dt \text{ (J)}$	$\int \varepsilon^* dt \text{ (J)}$	$\int \varepsilon^{**} dt \text{ (J)}$
13/04/1981	$1,4 \times 10^{17}$	$1,1 \times 10^{17}$	-
14/07/1982	$5,2 \times 10^{17}$	$1,8 \times 10^{17}$	-
6/09/1982	$1,5 \times 10^{17}$	$8,4 \times 10^{16}$	-
14/03/1989	-	-	-
21/10/1989	-	-	-
17/11/1989	-	-	-
10/04/1990	-	-	-
23/03/1991	-	-	-
29/10/1991	-	-	-
10/05/1992	-	-	-
6/04/2000	$1,9 \times 10^{17}$	$3,5 \times 10^{17}$	$6,78 \times 10^{17}$
15/07/2000	-	-	-
31/03/2001	$2,5 \times 10^{17}$	$4,21 \times 10^{17}$	$9,41 \times 10^{17}$
11/04/2001	$1,1 \times 10^{17}$	$1,62 \times 10^{17}$	$4,47 \times 10^{17}$
6/11/2001	$3,63 \times 10^{15}$	$1,03 \times 10^{14}$	$1,98 \times 10^{14}$
Média	$(2,22 \pm 1,69) \times 10^{17}$	$(2,18 \pm 1,36) \times 10^{17}$	$(6,89 \pm 2,47) \times 10^{17}$

TABELA 5.5 – Cálculo das integrais do epsilon de *Perreault e Akasofu* (1978) e das integrais das correções desta função de acoplamento durante eventos de tempestade magnética intensa.

Tempestades Intensas	$\int \varepsilon dt \text{ (J)}$	$\int \varepsilon^* dt \text{ (J)}$	$\int \varepsilon^{**} dt \text{ (J)}$
10/03/1998	$2,89 \times 10^{16}$	$6,67 \times 10^{16}$	$9,12 \times 10^{16}$
4/05/1998	$8,39 \times 10^{16}$	$1,84 \times 10^{17}$	$2,76 \times 10^{17}$
6/08/1998	$6,11 \times 10^{16}$	$1,18 \times 10^{17}$	$2,14 \times 10^{17}$
16/04/1999	$1,22 \times 10^{16}$	$2,89 \times 10^{16}$	$3,86 \times 10^{16}$
22/09/1999	$1,94 \times 10^{16}$	$3,43 \times 10^{16}$	$7,09 \times 10^{16}$
22/10/1999	$1,05 \times 10^{17}$	$2,54 \times 10^{17}$	$3,26 \times 10^{17}$
12/02/2000	$5,27 \times 10^{16}$	$9,56 \times 10^{16}$	$1,91 \times 10^{17}$
24/05/2000	$4,32 \times 10^{16}$	$7,16 \times 10^{16}$	$1,66 \times 10^{17}$
11/08/2000	$5,48 \times 10^{16}$	$2,05 \times 10^{17}$	$1,37 \times 10^{17}$
12/08/2000	$1,58 \times 10^{17}$	$3,64 \times 10^{17}$	$5,06 \times 10^{17}$
4/10/2000	$1,56 \times 10^{17}$	$3,91 \times 10^{17}$	$4,87 \times 10^{17}$
6/11/2000	$2,98 \times 10^{16}$	$6,88 \times 10^{16}$	$9,58 \times 10^{16}$
20/03/2001	$9,85 \times 10^{16}$	$3,13 \times 10^{17}$	$2,7 \times 10^{17}$
28/10/2001	$1,75 \times 10^{16}$	$4,25 \times 10^{16}$	$5,97 \times 10^{16}$
24/11/2001	-	-	-
Média	$(6,58 \pm 4,84) \times 10^{16}$	$(1,6 \pm 1,26) \times 10^{17}$	$(2,09 \pm 1,5) \times 10^{17}$

A fim de se observar as diferenças entre as tempestades com relação às energias envolvidas, a Figura 5.4 mostra, para cada classe de tempestade, o número de eventos que apresentaram a integral do campo elétrico interplanetário, E_y , as integrais dos parâmetros de acoplamentos de Akasofu, com e sem as correções, num determinado intervalo de valores. Note que as integrais são calculadas durante a fase principal de cada evento.

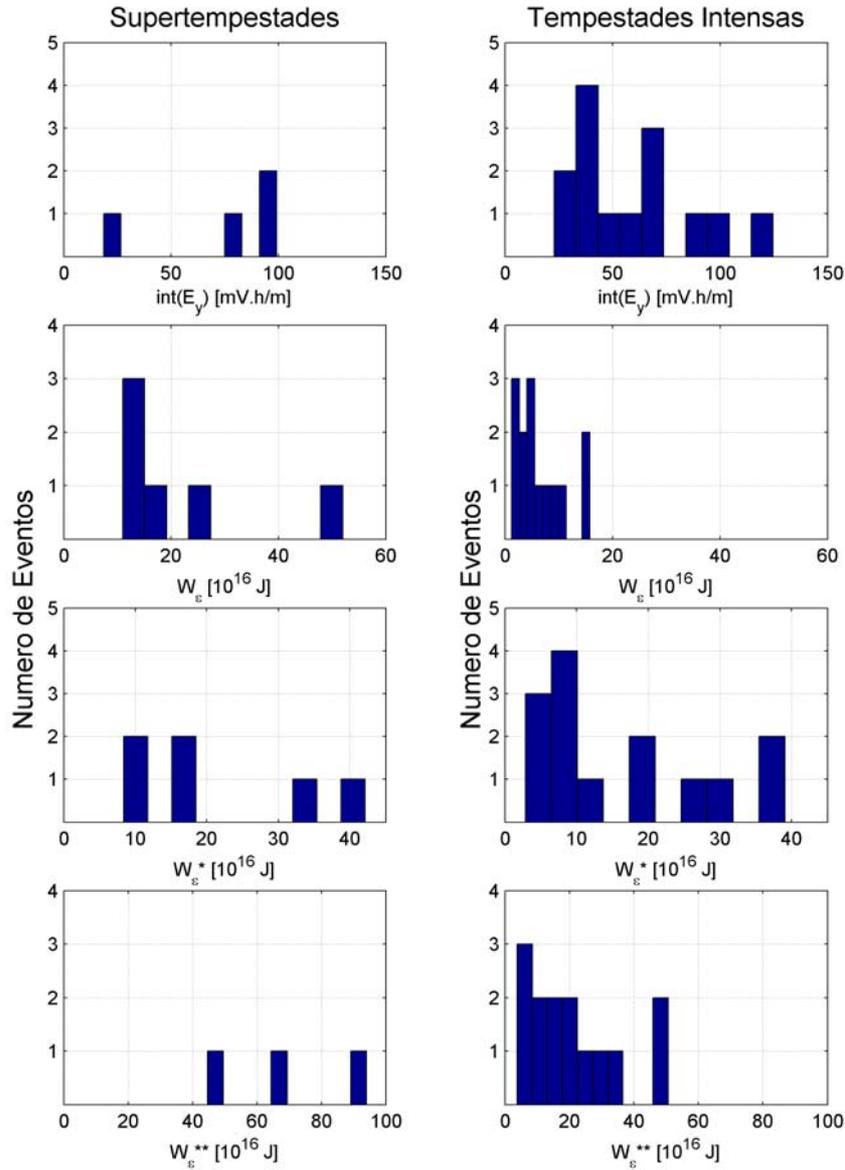


FIGURA 5.4 – Comparação entre supertempestades e tempestades magnéticas intensas.

Do topo para baixo aparecem as integrais do campo elétrico interplanetário, do parâmetro epsilon, do epsilon com a correção do raio da magnetopausa e do epsilon corrigido pela pressão dinâmica, respectivamente. As integrais são calculadas durante a fase principal de cada tempestade.

A integral de E_y , calculada durante a fase principal de cada tempestade não parece ser uma condição importante na diferenciação de supertempestades e tempestades

magnéticas intensas. Até mesmo o epsilon corrigido pelo raio da magnetopausa parece não ser uma boa característica que diferencie as duas classes. No entanto, quando se observam as mudanças ocorridas devido à correção do raio da magnetopausa, percebe-se que os valores de epsilon de Akasofu diminuíram no caso das supertempestades, o que já era esperado devido à redução do tamanho da magnetopausa, e a conseqüente redução da área efetiva, e de R_{cf} . Para as tempestades intensas, ocorreu o contrário: o raio da magnetopausa assumiu valores maiores do que l_0 , e, portanto, a área efetiva aumentou, intensificando a energização. Já a correção do epsilon considerando-se a pressão dinâmica mostrou que nas supertempestades, o valor da integral foi superior a $4 \times 10^{17} J$, mas o número de eventos foi reduzido (3) por falta de dados. Nas tempestades intensas, na maioria dos eventos, observaram-se valores das integrais de ε^{**} menores do que $4 \times 10^{17} J$, ou seja, eles voltaram a ser reduzidos, justamente pela redução na eficiência da reconexão. Não se podem comparar os dois eventos, porque a amostra dos eventos de supertempestades ficou muito reduzida.

5.2 Geofetividade das tempestades e parâmetro epsilon

Visando buscar alguma relação das causas interplanetárias com a geofetividade através da análise das energias envolvidas em cada evento, procurou-se separar os eventos conforme as estruturas interplanetárias que causaram as tempestades magnéticas. O objetivo aqui é concluir a partir da amostra selecionada se há alguma relação com a estrutura e a energia injetada. Sabe-se que as principais causas dos eventos super intensos são estruturas complexas, mas algumas delas podem ser causadas por CMEs, que são muito geofetivas, principalmente as nuvens magnéticas que pelas suas características topológicas prolongam o tempo de injeção de energia na magnetosfera. A Figura 5.5 mostra o número de eventos de cada classe com as respectivas estruturas interplanetárias causadoras das tempestades.

O número de eventos complexos é grande em ambas as classes de tempestades, sendo que nas tempestades magnéticas intensas chegou a 9 eventos, enquanto que nas supertempestades foi de 6 eventos. As regiões da bainha também aparecem num número significativo de casos (5), pela grande compressão que é causada pelos choques

interplanetários observados durante supertempestades e o surgimento de campos B_S muito intensos. As outras estruturas foram menos freqüentes: apenas uma nuvem magnética causou sozinha uma supertempestade, enquanto que não foi observado nenhum evento causado somente por CIR, nem por CMEs; para as intensas, a incidência de estruturas de nuvem magnética foi de 3 casos, enquanto que CIRs, região de bainha e CMEs apareceram somente em um caso cada estrutura.

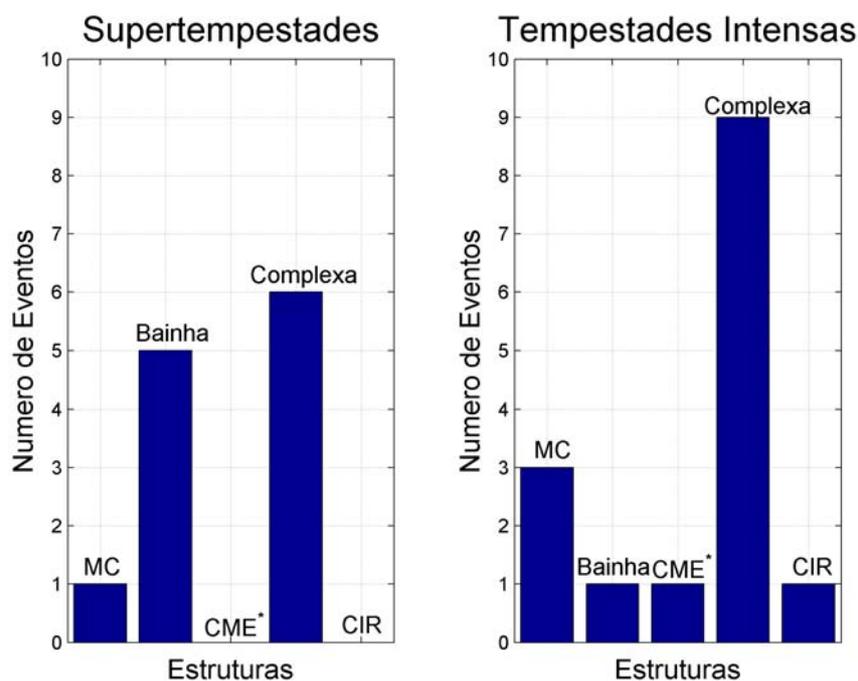


FIGURA 5.5 – Causas interplanetárias das supertempestades e tempestades magnéticas intensas. Dentre elas, pode-se encontrar principalmente estruturas complexas, em que, na sua maioria, ICMEs interagem com outra estrutura e formam uma estrutura B_S complexa.

Vale ressaltar que quando se refere à CME está se falando dos eventos que foram causados por uma estrutura CME que não foi nuvem magnética. A fim de evitar confusões, a notação adotada para se referir a este tipo de estrutura será CME*. A interação entre duas ou mais destas estruturas constituiu o que se define por estruturas complexas. Embora nem todas tivessem interagido entre si, o que se observa são duas nuvens magnéticas interagindo, ou duas CMEs*, ou uma CIR comprimindo a parte de

trás de uma CME* ou nuvem magnética, ou ainda uma região de bainha sendo comprimida por uma estrutura (CIR, CME* ou MC). Outro aspecto importante é a definição das nuvens magnéticas: aqui se considera estrutura de nuvem magnética aquela que não foi precedida por nenhum outro tipo de estrutura interplanetária, nem mesmo por bainha.

Depois da seleção dos eventos conforme as estruturas que levaram à ocorrência de cada um deles, procurou-se estimar, através da energia que havia sido calculada anteriormente, as estruturas que na amostra foram mais geofetivas, ou seja, que contribuíram para que uma quantidade de energia significativa entrasse na magnetosfera (W_e) e depois fosse dissipada na corrente de anel, entre outras partes da magnetosfera. A Figura 5.6 representa em forma de histograma a média das energias para as tempestades causadas por determinada estrutura.

A média para o parâmetro epsilon para os eventos de supertempestade causados por regiões de bainha foi de $3,55 \times 10^{17} J$, enquanto que para os eventos complexos a média da energia ficou em torno de $1,7 \times 10^{17} J$. Na primeira correção do epsilon a média caiu para a estrutura de bainha ($2,65 \times 10^{17} J$) e aumentou para estrutura complexa ($2,23 \times 10^{17} J$). Para a correção do epsilon pela pressão dinâmica, devido à falta de dados para a amostra, não foi possível fazer a média da energia. Na classe das intensas, a maior média para a energia calculada através do epsilon de Akasofu foi encontrada nas estruturas complexas ($8,27 \times 10^{16} J$), enquanto que as nuvens magnéticas apresentaram a segunda maior média ($4,34 \times 10^{16} J$). A partir da correção da geometria, estas estruturas ainda mantiveram suas médias mais altas do que as outras estruturas, mas, além disso, aumentaram seus valores em relação à primeira aproximação para a energia magnetosférica (W_e). Quando se corrigiu considerando a pressão, o que foi observado foi um aumento de quase 50% na energia dos eventos complexos ($2,67 \times 10^{17} J$). A média para as nuvens magnéticas, considerando-se a correção da pressão, foi de $1,27 \times 10^{17} J$.

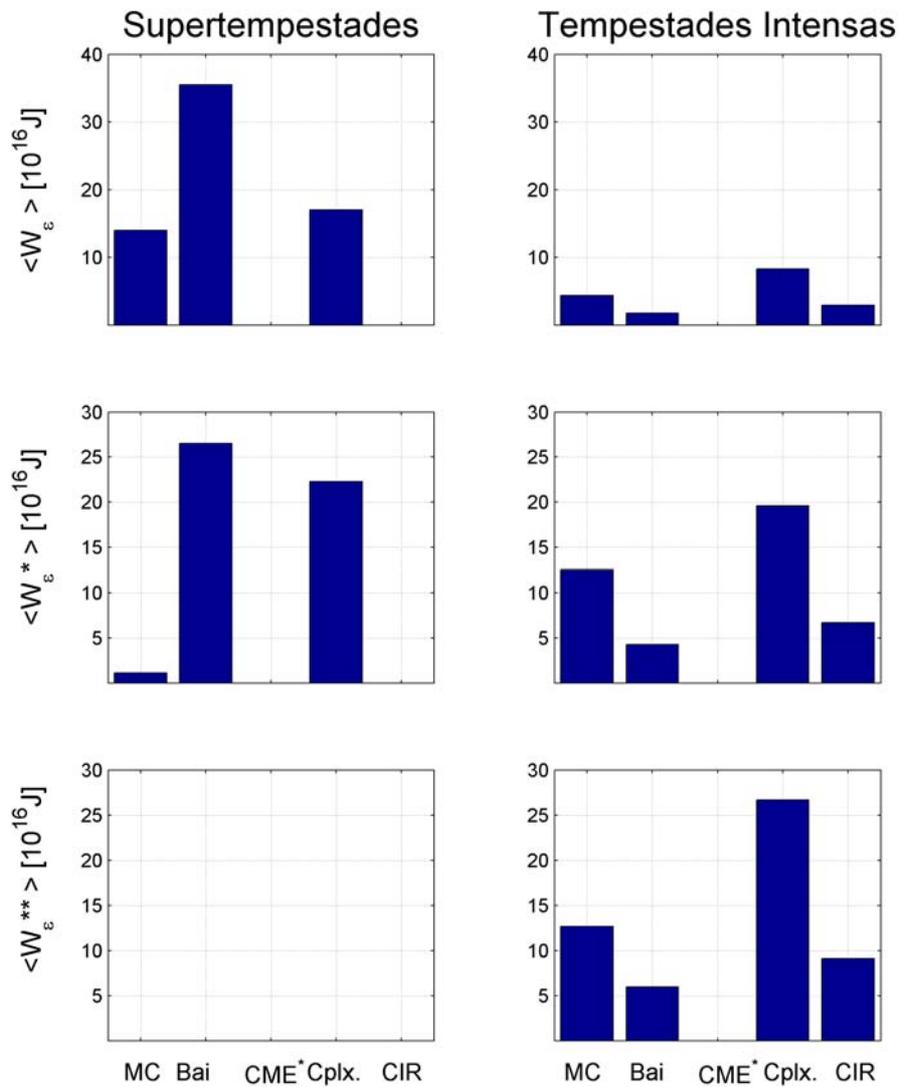


FIGURA 5.6 – Comparação entre supertempestades magnéticas e tempestades magnéticas intensas com relação às estruturas que causaram os eventos e a quantidade de energia transferida para dentro da magnetosfera através do processo de reconexão magnética. As correções do parâmetro epsilon de acoplamento também aparecem.

O que está claro é que, como se haveria de esperar, as estruturas complexas mostraram-se altamente geofetivas em ambas as classes das tempestades. Nas supertempestades,

as regiões da bainha mostraram-se ainda mais geoféticas, conforme se observou na Figura 5.6, provavelmente devido à alta compressão e intensificação de B_S , o que concorda com o trabalho de *Vieira et al.* (2004), em que de 20 eventos de tempestade magnética intensa analisados, observou-se que aqueles causados por regiões de bainha foram mais energéticos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com relação à fase principal, observada nas Tabelas 3.1 e 4.1, o tempo de maior injeção na corrente de anel não mudou significativamente de uma classe de tempestade para outra. A maior fase principal durou 42 horas e ocorreu durante a supertempestade de 21 de outubro de 1989, mas fases principais longas também foram observadas durante eventos intensos. Assim, não parece clara uma relação entre a intensidade da tempestade e o tempo de energização da corrente de anel.

Observou-se que, em geral, os parâmetros do vento solar e as energias envolvidas nos processos de reconexão e de convecção são maiores para as supertempestades. Em muitos dos índices há superposição de dados, e não se observa com clareza um limite de corte que realmente diferencie as classes das tempestades. Uma exceção são os índices K_p e A_{sy} que mostraram nítidas diferenças entre uma classe e outra: para o K_p , observaram-se valores superiores a 8₀, e o A_{sy} revelou que a corrente de anel mostrou-se intensamente assimétrica durante as supertempestades.

O índice AE não variou muito de uma classe para outra, mas aí também está o fato anteriormente mencionado do deslocamento do eletrojato auroral em direção à região equatorial, levando a medidas imprecisas dos valores do índice. Outro fato é que os dados estão, muitas vezes, relacionados a eventos antigos, em que os sensores eram vulneráveis às grandes variações nas correntes, não podendo ser monitorados adequadamente.

Com relação ao parâmetro epsilon de Akasofu, sem nenhuma correção, percebe-se que a maioria dos eventos de supertempestade apresentou valores superiores a $2 \times 10^{13} W$, enquanto que nas tempestades intensas, com maior frequência, foram encontrados valores de epsilon menores: apenas um caso teve um pico de potência maior que este valor. O número de eventos para cada classe é diferente, mas a tendência é de que, conforme representado pelo histograma, para as supertempestades, as quantias de energia envolvidas sejam maiores do que as das tempestades intensas.

Quando se leva em conta a resposta da corrente de anel, e ao mesmo tempo a quantidade de energia injetada na magnetopausa diurna, observam-se os mais diversos resultados entre os eventos de tempestade selecionados. Para uma variação no Dst de $50 nT$, algumas estruturas pareceram ser mais geofetivas que outras, enquanto que para outros eventos, dependendo da estrutura, a quantidade de energia necessária para causar uma mesma variação no Dst foi maior. Como por exemplo, o evento de tempestade intensa no dia 16 de abril de 1999, causado por uma MC, necessitou da menor quantidade de energia para causar o mesmo efeito observado nas outras ($\Delta Dst = 50 nT$).

Valores idênticos de energia causaram tanto uma variação de $50 nT$ como a variação de $100nT$, como se observa na supertempestade de 31 de março de 2001 e na tempestade intensa de 4 de maio de 1998, por exemplo. Isto se explica pelo fato de que se está usando o tempo do Dst (em horas) como tempo de integração, enquanto que o índice Sym cujas medidas são em intervalos de 1 minuto percebem maior número de mudanças na componente- H do campo geomagnético. Caso esta estimativa de energia através da comparação com a resposta da corrente de anel fosse feita considerando-se o tempo do índice Sym , estes valores de energia, que se igualaram na Tabela 5.2, seriam diferentes para cada ΔSym .

Analisando-se a Tabela 5.1, apesar da pequena amostra de eventos, ou seja, o reduzido número de tempestades em que foi possível se determinar o valor de epsilon considerando-se as variações do índice de tempestade, Dst , o que se observou foi que a estrutura complexa foi a mais geofetiva e causou a tempestade do dia 11 de abril de 2001. A energia necessária para causar uma mesma variação no índice Dst , sendo calculada para todos os eventos, foi menor durante esta supertempestade, o que mostra que a resposta na corrente de anel foi a mesma para todos os eventos, mas neste, em especial, a energia foi a menor de todas.

Com relação aos dados interplanetários, percebe-se que a estatística para os valores de E_y e B_z ficou comprometida ao se analisar as supertempestades. Nem sempre o intervalo completo da tempestade pôde ser coberto com as medidas destes componentes, e o que se percebe é que principalmente o E_y se desviou das medidas esperadas para o tamanho

dos eventos em termos da energia. B_S apresentou valores de pico muito intensos durante a ocorrência das supertempestades, chegando até $\sim 80 \text{ nT}$, mas foi alto também para as tempestades intensas. Assim, não há uma separação nítida, que possa ser usada na diferenciação das duas classes de tempestade.

Quanto à necessidade da correção do epsilon, observa-se que a consideração de que a magnetosfera não é um obstáculo estável no meio interplanetário faz grande diferença no cálculo da energia do vento solar que é injetada na magnetosfera interna. A idéia da magnetopausa fixa, através do valor constante do parâmetro $l_0 (=7R_E)$, implica em se considerar que, tanto para tempestades intensas, quanto para tempestades moderadas, quanto para super-intensas, a compressão da magnetosfera é sempre a mesma. Isto não é coerente com a realidade, uma vez que sabemos que as dimensões da magnetosfera variam muito conforme as mudanças no vento solar.

Principalmente durante a ocorrência de supertempestades, a magnetopausa diminui em tamanho, quando a pressão do vento solar é muito intensa, fazendo com que a área diminua, e, portanto, menos energia entre. Aí, observa-se um l_0 menor, devido à pressão do plasma na frente da magnetosfera, e, conforme a Equação (2.16), energia estimada diminui, com relação àquela em que se considera $l_0=7R_E$. Por este fato é que se observou que, com a primeira correção do epsilon, a energia integrada durante a fase principal, em média, diminuiu durante supertempestades, enquanto que, nas tempestades intensas, em média, ela aumentou. Tal aumento deve-se à área efetiva (l_0^2) maior – pressão dinâmica do vento solar menor - por onde se considera que a energia está passando.

A correção, que foi proposta neste trabalho, não existia nas bibliografias, e foi feita a partir da verificação de que a energia de entrada (ε) muitas vezes era excedida pela energia perdida na corrente de anel (W_{RC}), o que foi verificado através das Tabelas 5.1 a 5.3. Com esta verificação, surgiu a necessidade de melhorar as estimativas para analisar criteriosamente as energias envolvidas.

A expressão original do epsilon de Akasofu surge da consideração de que a dependência que a potência transferida tem dos parâmetros do vento solar (N_p e V_p , e, portanto, pressão dinâmica) é dada por $\alpha = 1$ (Gonzalez *et al.*, 1990; Vasyliunas *et al.*, 1982). Mas aqui também não se consideram as variações que podem ocorrer nos parâmetros de plasma do vento solar conforme a atividade do Sol varia. Além da correção na geometria, considera-se que α é um termo, que varia conforme a pressão dinâmica e avalia a eficiência da reconexão devido à pressão. A partir destas considerações, é feita a segunda correção do epsilon, e observa-se que, nas tempestades magnéticas intensas, existe uma diferença clara entre as correções W_{ϵ^*} e $W_{\epsilon^{**}}$, uma vez que os valores da primeira, em média, aumentam na segunda correção, quando se considera a influência da pressão. Com relação a W_{ϵ} e $W_{\epsilon^{**}}$, para as tempestades magnéticas intensas, não se observam mudanças significativas, possivelmente pelo fato de que a reconexão é menos eficiente durante estes eventos, ou seja, os parâmetros do vento solar são mais tênues em comparação com os super-intensos.

Entre W_{ϵ} e $W_{\epsilon^{**}}$ observa-se que, para as supertempestades, os valores da segunda foram maiores - superiores a $4 \times 10^{17} J$ - do que os da primeira, que foram, em sua maioria, menores que $4 \times 10^{17} J$. Isto mostra que a correção feita melhorou a estimativa das energias, apesar do número de eventos ter sido reduzido. Um grupo maior de supertempestades, sem falhas nos dados do meio interplanetário, possibilitaria certificar a veracidade desta tendência. O mesmo ponto de corte é observado entre as duas energias W_{ϵ^*} e $W_{\epsilon^{**}}$. Como se observa na Figura 5.4, o valor $4 \times 10^{17} J$ parece separar os valores calculados a partir das duas correções. Os valores da energia para uma parcela dos eventos foram reduzidos a partir da correção do raio, o que é esperado, uma vez que o raio da magnetopausa, em geral, diminui com o aumento da pressão, fazendo com que a magnetopausa oscile com esta variação.

Quando se comparam as duas colunas da Figura 5.4, que representam, cada uma, uma classe de tempestade, supertempestade e tempestade intensa, respectivamente, pode-se verificar se as energias atuam, ou não, como características diferenciando as duas

classes. Com relação à integral do epsilon de Akasofu, W_ϵ , nota-se que, em geral, o valor $2 \times 10^{17} J$ atuou com um valor limitante: tempestades intensas com valores abaixo de $2 \times 10^{17} J$. Considerando-se a correção pela geometria, não há uma diferença entre ambas as classes, enquanto que, se for adicionada, à correção da geometria, a eficiência da reconexão, observa-se que o valor $4 \times 10^{17} J$ passa a ser um ponto limite entre os dois tipos de tempestades magnéticas. A energia para as tempestades intensas ficou abaixo deste valor, enquanto que a energia para as supertempestades superou este valor. Portanto, apesar do número diferente de eventos para cada uma delas, percebe-se que há uma tendência que leva a afirmar que a energia $W_{\epsilon^{**}}$ é uma característica que diferencia as duas classes. Novamente, a amostra deveria ser acrescida de maior número de eventos super-intensos para se ter uma estimativa melhor.

Embora o número das tempestades da amostra não permita encontrar igual número de tempestades para cada estrutura interplanetária, o que se observa é que de um modo geral as tempestades causadas por campos B_S na bainha e as causadas por estruturas complexas foram mais energéticas no caso das supertempestades do que aquelas causadas por nuvens magnéticas. Tanto para o epsilon de Akasofu integrado durante a fase principal, com as correções deste parâmetro, as mesmas conclusões foram obtidas. No caso das tempestades magnéticas intensas, as mais geoféticas foram as estruturas complexas e as nuvens magnéticas. Isto se manteve em todas as energias calculadas, mesmo com as correções do parâmetro de acoplamento.

Em termos de perspectivas futuras, está-se consciente da importância fundamental do estudo de supertempestades magnéticas ocorridas nos últimos 3 anos, que contam com a observação dos satélites ACE e WIND com menos falhas nos dados. Os eventos mais intensos que ocorreram em outubro e novembro de 2003 merecem atenção pela intensidade de suas ejeções e pela grande deflexão na componente H . Também é interessante aumentar o conjunto de eventos a fim de melhorar a estatística feita.

Outro aspecto importante é o estudo do fluxo de elétrons próximo à Terra durante supertempestades e durante tempestades magnéticas intensas, estudando-os

comparativamente. Além disso, a observação da intensidade e evolução das emissões aurorais durante estes eventos através das imagens do satélite POLAR.

Também estudar com cuidado a evolução da corrente de anel assimétrica durante os eventos de supertempestades, uma vez que a deriva das partículas com direção à magnetopausa diurna em órbitas abertas é muito intensa nestes eventos, e se observa um índice A_{sy} muito intenso em comparação com eventos de menor intensidade. Além disso, observar a perda das partículas que constituem esta corrente e as que formam a corrente simétrica, dando início à fase de recuperação da tempestade.

A observação da magnetosfera de diversos ângulos, através dos satélites Cluster, Polar, Geotail, GOES que estão operando e observando as regiões da magnetosfera pode dar uma idéia da dinâmica magnetosférica. Com isso, é possível avaliar-se as energias envolvidas, principalmente aquelas que se perdem em outras regiões da magnetosfera, além da corrente de anel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J.; Sauer, H.; Frank, L.; Reiff, P. Effects of the March 1989 solar activity, **EOS-AGU**, v. 70, p. 1479, 1989.

Asikainen, T.; Kerttula, R.; Mursula, K.; Friedel, R.; Baker, D.; Soraas, F.; Fennell, J. F.; Blake, J. B. Global View of Energetic Particles During a Major Magnetic Storm, **AGU Geophysical Monograph on Physics and Modelling of the Inner Magnetosphere**, 2005, in press.

Balmaceda, L. A.; Gonzalez, W. D.; Echer, E.; Santos, J. C.; Vieira, L. E. A.; Dal Lago, A.; Guarnieri, F. L.; de Gonzalez, A. L. C. The solar origins of the Sun-Earth connection events on April 1999 and February 2000. **Brazilian Journal of Physics**, v. 34, n. 4B, Dec. 2004.

Balmaceda, L. A. **Estudo das possíveis causas solares de tempestades geomagnéticas**. 2003 Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

Bell, J. T.; Gussenhoven, M. S.; Mullen, E. G. Super Storms, **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 102, no. A7, p. 14 189-14198, July 1997.

Bittencourt, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. São José dos Campos: J. A. Bittencourt, 2003. 309p.

Burlaga, L. F.; Skoug, R. M.; Smith, C. W.; Webb, D. F.; Zurbuchen, T. H.; Reinard, A. Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998-1999, **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 106, n. A10, p. 20957-20978, 2001.

Burlaga, L. F. **Interplanetary Magnetohydrodynamics**. New York: Oxford University Press, 1995.

Burlaga, L. F.; Sittler, E.; Mariani, F.; Schwenn, R. Magnetic loop Behind an Interplanetary Shock: Voyager, Helios and IMP-8 Observations, **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v **86**, p. 6673, 1981.

Burton, R. K.; McPherron, R. L.; Russell, C. T. An Empirical Relationship Between Interplanetary Conditions and Dst. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 80, p. 4204-4214, 1975.

Cane, H. V.; Richardson, I. G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002. **Journal Geophysical Research-Space Physics**, v. 108, n.A4, 2003.

Cane, H. V.; Richardson, I. G. Cosmic Rays and solar wind disturbances during late October 1989. **Journal Geophysical Research-Space Physics**, v. 100, n.A2, p. 1755, 1995.

Cargill, P. J.; Chen, J.; Spicer, D. S.; Zalesak, S. T. Magnetohydrodynamic simulations of the motion of magnetic flux tubes through a magnetized plasma. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 101, n. A3, p. 4855-4870, 1996.

Cowley, S. W. H. The Earth's Magnetosphere. In: Suess, S. T.; Tsurutani, B. T. (ed.). **From the Sun**; Washington DC: American Geophysical Union (AGU), 1998. p. 13-22.

Daglis, I. A.; Thorne, R. M.; Baumjohann, W.; Orsini, S. The Terrestrial Ring Current: Origin, Formation, and Decay. **Reviews of Geophysics**, v. 37, p. 407-438, 1999.

Dal Lago, A.; Vieira, L. E. A.; Echer, E.; Gonzalez, W. D.; Gonzalez, A. L. C.; Guarnieri, F. L.; Balmaceda, L.; Santos, J. C.; da Silva, M. R.; de Lucas, A.; Schuch, N. J. Great Geomagnetic Storms in the Rise and Maximum of Solar Cycle 23. **Brazilian Journal of Physics**, v. 34, n. 4B, p. 1542-1546, Dec. 2004b.

Dal Lago, A.; Vieira, L. E. A.; Echer, E.; Gonzalez, W. D.; Gonzalez, A. L. C.; Guarnieri, F. L.; A.; Schuch, N. J.; Schwenn, R. Comparison between halo CME

expansion speeds observed on the Sun, the related shock transit speeds to earth and corresponding ejecta speeds at 1 UA. **Solar Physics**, v. 222, p. 323-328, May 2004a.

Davis, T. N.; Sugiura, M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.71, p. 785-801, 1966.

Dessler, A. J.; Parker, E. N. Hydromagnetic Theory of Magnetic Storms. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 64, p. 2239-2252, 1959.

Dungey, J. W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. **Physical Review Letters**, v. 6, p. 47, 1961.

Ebihara, Y.; Ejiri, M. Simulation study on fundamental properties of the storm-time ring current. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 105, no. A7, p. 15.843-15.859, July 2000.

Feldstein, Y. I. Modeling of the Magnetic Field of Magnetospheric Ring Current as a Function of Interplanetary Medium Parameters. **Space Science Reviews**, v. 59, p. 83-165, 1992.

Fenrich, F. R.; Luhman, J. Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity. **Geophysical Research. Letters**, v. 25, n. 15, p. 2999-3002, 1998.

Goldstein, B. E. The Solar Wind. In: Suess, S. T.; Tsurutani, B. T. (ed.). **From the Sun**, Washington DC: American Geophysical Union (AGU), 1998. p. 13-22.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Lepping, R. P.; Schwenn, R. Interplanetary Phenomena Associated with Very Intense Geomagnetic Storms. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 173-181, 2002.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Clua de Gonzalez, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT). **Space Science Reviews**, v. 88, n.3/4, p. 529-562, 1999.

Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroél, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M. What Is a Geomagnetic Storm? **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 99, n. A4, 5771-5792p, 1994.

Gonzalez, W. D.; Clua de Gonzalez, A. L. C.; Lee, L. C.; Tsurutani; B. T. Role of the lifetime of ring current particles on the solar wind-magnetosphere power transfer during the intense geomagnetic storm of 28 August 1978. **Planetary Space Science**, v.38, n.36, p.765-769, 1990.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani; B. T.; Clua de Gonzalez, A. L. C.; Smith, E. J.; Tang, F.; Akasofu, S. -I. Solar Wind-Magnetosphere Coupling During Intense Magnetic Storms (1978-1979). **Journal Geophysical. Research-Space Physics**, v. 94, p. 8835-8851, 1989.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T. Criteria of Interplanetary Parameters causing Intense Magnetic Storms ($Dst < -100$ nT). **Planetary Space Science**, v. 35, 1101p, 1987.

Gosling, J. T.; McComas, D. J.; Phillips, J. L.; Bame, S. J. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. **Journal of Geophysical Research- Space Physics**, v. 96, p. 7831-7839, 1991.

Greenspan, M. E.; Hamilton, D. C. A test of the Dessler-Parker-Schopke relation during magnetic storms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 105, n.A3, p. 5.419-5.430, Mar. 2000

Hill, T. W. Solar Wind–Magnetosphere Coupling. In: Carovillano, R. L.; Forbes, J. M. (ed.). **Solar-Terrestrial Physics: Principles and Theoretical Foundations**, Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1983. p. 261-302.

Hirshberg, J. Note on ring currents in the absence of sudden commencement storms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 68, p. 6201, 1963.

Hundausen, A. J. **Coronal Mass Expansion and Solar Wind**. New York: Springer-Verlag, , 1972.

Huttunen, K. E. J. Interplanetary shocks, magnetic clouds and magnetospheric storms. 2005. Tese (Doutorado em Física) – Department of physical Sciences, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki, Finland, 2005. Disponível em: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/fysik/vk/huttunen/interpla.pdf>.

Huttunen, K. E. J.; Koskinen, H. E. J. Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 1729-1738, 2004.

Huttunen, K. E. J.; Koskinen, H. E. J.; Schwenn, R. Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 107, n.A7, 2002.

Jordanova, V. K.; Thorne, R. M.; Farrugia, C. J.; Dotan, Y.; Fennell, J. F.; Thomsen, M. F.; Reeves, G. D.; McComas, D. J. Ring current dynamics during the 13-18 July 2000 storm period. **Solar Physics**, v. 204, p. 361-375, 2001.

Kahler, S. W. Solar flares and coronal mass ejections. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 30 , p. 113-141, 1992.

Kamide, Y.; Baumjohann, W.; Daglis, I. A.; Gonzalez, W. D.; Grande, M.; Joselyn, J. A.; McPherron, R. L.; Phillips, J. L.; Reeves, E. G. D.; Rostoker, G.; Sharma, A. S.; Singer, H. J.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M. Current Understanding of Magnetic Storms: Storm-Substorm Relationships. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 103, p. 17.705-17.728, 1998b.

Kamide, Y.; Yokoyama, N.; Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Daglis, I. A.; Brekke, A.; Masuda, S. Two steps development of geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 103, n.A4, p 6917-6921, 1998a.

Kamide Y.; McPherron, R. L.; Gonzalez, W. D.; Hamilton, D. C.; Hudson, H. S.; Joselyn, J. A.; Kahler, S. W.; Lyons, L. R.; Lundset, H.; Szuszczewicz, E. Magnetic storms: Current understanding and outstanding questions. In: Tsurutani, B. T.; W. D., Walter; Kamide, Y.; Arballo, J. K. (ed.). **Magnetic Storms, Geophysical Monograph 98**, Washington DC: American Geophysical Union (AGU), 1997. p. 1-19.

Klein, L. W.; Burlaga, L. F. Interplanetary Magnetic Clouds at 1 AU. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 87, p. 613-624, 1982.

Koskinen, H. E. J.; Tanskanen, E. I. Magnetospheric energy budget and the epsilon parameter. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 107, n.A11, p. SMP 42-1, Nov. 2002.

Kozuka, Y.; Watanabe, T.; Kojima, M.; Ohyama, M.; Tsuneta, S.; Khan, J. I.; Watari, S. The dynamical characteristics of a disappearing-filament associated interplanetary disturbance observed in 1992 early May. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 47, p. 377-381, 1995.

Lakhina, G. S. Magnetic reconnection. **Bulletin of the Astronomical Society of India**, v. 28, p. 593-646, 2000.

Lakhina, G. S.; Tsurutani, B. T. Explosive energy release by disruption of current sheets. **Physica Scripta**, v. 74, p. 67-70, 1998a.

Lanzerotti, L. J.; Uberoi, C. Earth's Magnetic Environment. **Sky & Telescope**, v.76, p. 360-362, Oct. 1998.

Liemohn, M. W.; Kozyra, J. U.; Thomsen, M. F.; Roeder, J. L.; Lu, G.; Borovsky, J. E.; Cayton, T. E. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime Dst^* . **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 106, p. 10883-10904, 2001.

Liemohn, M.W.; Kozyra, J. U.; Khazanov; G. V.; Craven, P. D. Effects of various transport processes on the streaming ion density during the first stage of plasmaspheric

refilling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 6, p. 437-447, 2000.

Liemohn, M. W.; Kozyra, J. U.; Jordanova, V. K.; Khazanov, G. V.; Thomsen, M. F.; Cayton, T. E. Analysis of early phase ring current recovery mechanisms during geomagnetic storms. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 18, p. 2845-2848, 1999.

Maltsev, Y. P. The point of controversy in magnetic storm study (A review). In: Physics of Aurora Phenomena Annual Seminar, 18, Apatity, **Proceedings XVIII**. [S.1], p. 33-40, 2003.

McPherron, R. L. Magnetospheric Dynamics. In: Kivelson, M. G.; Russel, C. T. (ed.). **Introduction to Space Physics**, United Kingdom: Cambridge University Press, 1995. p. 400-458.

Menvielle, M.; Berthelier, A. The K-derived planetary indices: description and availability. **Reviews Geophysical Space Physics**, v. 29, p. 415-432, 1991.

Monreal-MacMahon, R.; Gonzalez, W. D. Energetics during the main phase of geomagnetic superstorms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 102, n.A7, p. 14.199-14.207, 1997.

O'Brien, P.; McPherron, R. L. An Empirical Phase Space Analysis of Ring Current Dynamics: Solar Wind Control of Injection and Decay. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.105, p. 7707-7720, 2000.

Papagiannis, M. D. **Space Physics And Space Astronomy**. New York: Gordon and Breach Science, 1972.

Parks, G. K. **Physics of Space Plasma: An Introduction**. Washington: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

Perreault, P.; Akasofu, S.-I. A Study of Geomagnetic Storm. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 54, p. 547-573, 1978.

Pizzo, V. J. A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind- I. Theoretical Foundations. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 83, p. 5583-5572, 1978.

Priest, E. R. **Solar magneto-hydrodynamics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1987.

Pulkkinen, T. I. ; Ganushkina, N. Yu.; Kallio, Lu, G.; Baker, D. N.; Turner, N. E.; Fritz, T. A.; Fennell, J. F.; Roeder, J. Energy Dissipation During the Geomagnetic Storm: May 1998. **Advanced in Space Research**, v. 30. n. 10, p. 2231-2240, 2002.

Roederer, J. G., Earth's Magnetosphere. In: Kennel, C.F.; Lanzerotti, L.J.; Parker, E.N. (ed.). **Solar System Plasma Physics**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1979. p. 3-56.

Rostoker, G.; Akasofu, S.-I.; Foster, J.; Greenwald, R. A.; Kamide, Y.; Kawasaki, K.; Lui, A. T. Y.; McPherron, R. L.; Russel, C. T. Magnetospheric substorms: Definitions and signatures. **Journal of Geophysical Research-SpacePhysics**, v. 85, p. 1663-1668, 1980.

Rostoker, G. Geomagnetic Indices. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, n. 4, p. 935-990, 1972.

Sawyer, C.; Warwick, J. W.; Dennett, J. T. **Solar Flare Prediction**. Colorado: Associated University Press, 1986.

Schwenn, R.; Dal Lago, A.; Huttunen, E.; Gonzalez, W. D. The association of coronal mass ejection with their effects near the Earth. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v. 23, n. AG/2004180, p. 1033-1059, 2005.

Skopke, N. A General Relation Between the Energy of Trapped Particles and the Disturbance Field Near the Earth. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 71, p. 3125-3130, 1966.

Smith, C. W.; Ness, N. F.; Burlaga, L. F.; Skoug, R. M.; McComas, D. J.; Zurbuchen, T. H.; Gloeckler, D. K.; Haggerty, D. K.; Gold, R. E.; Desai, M. I.; Mason, G. M.;

Mazur, J. E.; Dwyer, J. R.; Popecki, M. A.; Möbius, E.; Cohen, C. M. S.; Leske, R. A. ACE observations of the Bastille Day 2000 interplanetary disturbance. **Solar Physics**, v. 204, p. 229-254, 2001.

Sobral, J. H. A.; Abdu, M. A.; Yamashita, C. S.; Gonzalez, W. D.; Clua de Gonzalez, A. L.; Batista, I. S.; Zamlutti, C. J.; Tsurutani, B. T. Response of the low-latitude ionosphere to very intense geomagnetic storms. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 6-7, p. 965-974, 2001.

Sojka, J. J.; Schunk, R. W.; Denig, W. F. Ionospheric response to the sustained high geomagnetic activity during the March 89 great storm. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 99, p. 21341-21352, 1994.

Srivastava, B. J.; Habiba, Abbas; Pathan, B. M. Extended main phase of some sudden commencement great geomagnetic storms with double SSCs. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 61, p. 993-1000, 1999.

Stern, D. P. Energetics of the magnetosphere. **Space Science Reviews**, v. 39, p. 193-213, 1984.

Tascione, T. F. Magnetosphere. In: _____. **Introduction to the space environment**. Malabar: F. L. Krieger Publishing, 1994, p. 45-58, cap.5.

Tsurutani, B. T.; Judge, D. L.; Guarnieri, L. F.; Gangopadhyay, P.; Jones, A. R.; Nuttall, J.; Zambon, G. A.; Didkovsky, L.; Manucci, A. J.; Iijima, B.; Meier, R. R.; Immel, T. J.; Woods, T. N.; Prasad, S.; Floyd, L.; Huba, J.; Solomon, S. C.; Straus, P.; Viereck, R. The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. **Geophysical Research Letters**, v. 32, no. 3, Jan. 2005.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Zhou, X.-Y.; Lepping, R. P.; Bothmer, V. Properties of slow magnetic clouds. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 147-151, 2004.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Lakhina, G. S.; Alex, S. The Extreme Magnetic Storm of 1-2 September 1859, **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 108, n. A7, p. 1268, 2003.

Tsurutani, B. T.; Zhou, X. Y. Interplanetary shock triggering of substorms: Wind and Polar. **Advances in Space Research**, v. 31, n. 4, p. 1.063-1.067, 2003.

Tsurutani, B. T.; Kamide, Y.; Arballo, J. K.; Gonzalez, W. D.; Lepping, R. P. Interplanetary causes of great and superintense magnetic storms. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 24, n.1/3, p 101-105, 1999c.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. Magnetic Storm. In: Suess, S. T.; Tsurutani, B. T. (ed.) **From the Sun**, Washington DC: American Geophysical Union (AGU), 1998. p. 57-66.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. The interplanetary causes of magnetic storms: A review. In: Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Kamide, Y.; Arballo, J. K. **Magnetic Storms**, Washington DC: American Geophysical Union (AGU), 1997. p 77-90.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Tang, F.; Lee, Y. T. Great Magnetics Storms. **Geophysical Research Letters**, v. 19, p. 73-76, 1992b.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Tang, F.; Akasofu, S.-I.; Smith, E. J. Solar Wind Southward B_z Features Responsible for major Magnetic Storms near Solar Maximum (1978-1979). **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 93, p. 8519-8531, 1988.

Vasyliunas, V. M.; Kan, J. R.; Siscoe, G. L.; Akasofu, S.-I. Scaling relations governing magnetospheric energy transfer. **Planetary and Space Science**, v. 30, n. 4, p. 359-365, 1982.

Vieira, L. E. A.; Gonzalez, W. D.; Echer, E.; Tsurutani, B. T. Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures. **Solar Physics**, v. 223, n.1/2, p. 245-258, 2004.

Vieira, L. E. A.; Gonzalez, W. D.; de Gonzalez, A. L. C.; Dal Lago, A. A Study of the Geoeffectiveness of Southward Interplanetary Magnetic Field Structures. **Advanced in Space Research**, v. 30, n. 10, p. 2335-2338, 2002.

Vieira, L. E. A.; Gonzalez, W. D.; Clua de Gonzalez, A. L.; Dal Lago, A. A study of magnetic storms development in two or three steps and its association with the polarity of magnetic clouds. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, p. 457-461, 2001.

Zhou, X. Y.; Tsurutani, B. T. Interplanetary shock triggering of nightside geomagnetic activity: Substorms, pseudobreakups and quiescent events. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 106, n. A9, p. 18957-18967, Sep. 2001.

Watari, S.; Vandas, M.; Watanabe, T. Formation of a strong southward IMF near the solar maximum of cycle 23. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 673-687, 2004.

Webb, D. F.; Cliver, E. W.; Crooker, N. U.; St. Cyr, O. C.; Thompson, B. J. Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 105. p. 7491-7508, 2000.

Wygant, J.; Rowland, D.; Singer, H. J.; Temerin, M.; Mozer, F.; Hudson, M. K. Experimental evidence on the role of the large spatial scale electric field in creating the ring current. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 29.527-29.544, 1998.

Wolf, R. A., Magnetospheric Configuration. In: Kivelson, M. G.; Russel, C. T. (ed.). **Introduction to Space Physics**, United Kingdom: Cambridge University Press, 1995. p. 288-329.

Shine, GEM, and CEDAR Joint Campaign

http://data.engin.umich.edu/intl_space_weather/sramp/SHINE_GEM_CEDAR.html.

Acesso em: 20 fev. 2005.

Properties of M-M (or Repetitive) SEC Events. Disponível em:

http://solar.scs.gmu.edu/research/cme_storm/event_repeat.html. Acesso em: 20 fev. 2005.

Properties of 5 Questionable SEC Events. Disponível em:

http://solar.scs.gmu.edu/research/cme_storm/event_question.html. Acesso em: 20 fev. 2005.

Solar Wind. Disponível em:

<http://www.igpp.ucla.edu/mpg/lectures/mkivelson/faculty97/12solarwind.jpg>. Acesso em: 24 mar. 2005.

Solar Wind. Disponível em: <http://faculty.rmwc.edu/tmichalik/images/solarwind.jpg>. Acesso em: 2 set. 2004.

Magnetosphere. Disponível em

http://space.rice.edu/image/livefrom/5_magnetosphere.jpg. Acesso em 12 mar. 2005.

Solar Wind Interacting with the Magnetosphere. Disponível em:

http://www-spc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/solwind_interact_magsphere_tutorial.pdf. Acesso em: 14 ago. 2004.

APÊNDICE A – OUTROS EVENTOS DE TEMPESTADE MAGNÉTICA MUITO INTENSA

Abaixo seguem as principais características das tempestades selecionadas no grupo de supertempestades do Capítulo 3.

A.1 Tempestade de 12 a 17 de julho de 1982

Às 9h55min UT do dia 12 de julho de 1982, uma explosão solar do tipo 2/X7.1 foi observada na superfície do Sol. A Figura A.1 mostra a resposta do meio interplanetário a esta explosão. Não foi possível observar a ocorrência de choques devido às falhas nos dados de plasma, como se pode visualizar na Figura A.1. A provável causa da supertempestade foi uma região de bainha formada atrás do choque formado pela propagação da estrutura no meio interplanetário. Devido a este choque a magnetosfera foi fortemente comprimida. Na região da bainha, formou-se um intenso B_S , com valores de até -50 nT , e causou a grande tempestade, com mínimo de Dst em -325 nT . Esta tempestade também foi precedida por outra, com menor intensidade (pico do $Dst = -64 \text{ nT}$), e apresentou duas etapas.

O que se observa através da Figura A.2, é que devido à saturação dos equipamentos, não se pode fazer uma estimativa das energias que foram dissipadas na magnetosfera devido à injeção na magnetopausa diurna e aquela que foi dissipada na região da corrente de anel, devido à convecção na região da cauda. Nem ao menos o campo elétrico de convecção pode ser observado durante todo o período.

A Figura A.3 mostra que, durante a fase principal da tempestade, os índices geomagnéticos responderam à entrada de energia na magnetosfera: o índice do eletrojato auroral, AE, foi extremamente intenso durante este período, assumindo valores próximos a 1500 nT na maior parte do tempo; o K_p ficou em torno de valores de 8 a 9, indicando que a resposta nas altas latitudes foi intensa para o presente evento; já para a corrente assimétrica, medida através do índice Asy , alguns picos intensos foram identificados, chegando a valores de até 600 nT . Os valores do índice Asy foram elevados durante a fase de evolução da corrente de anel.

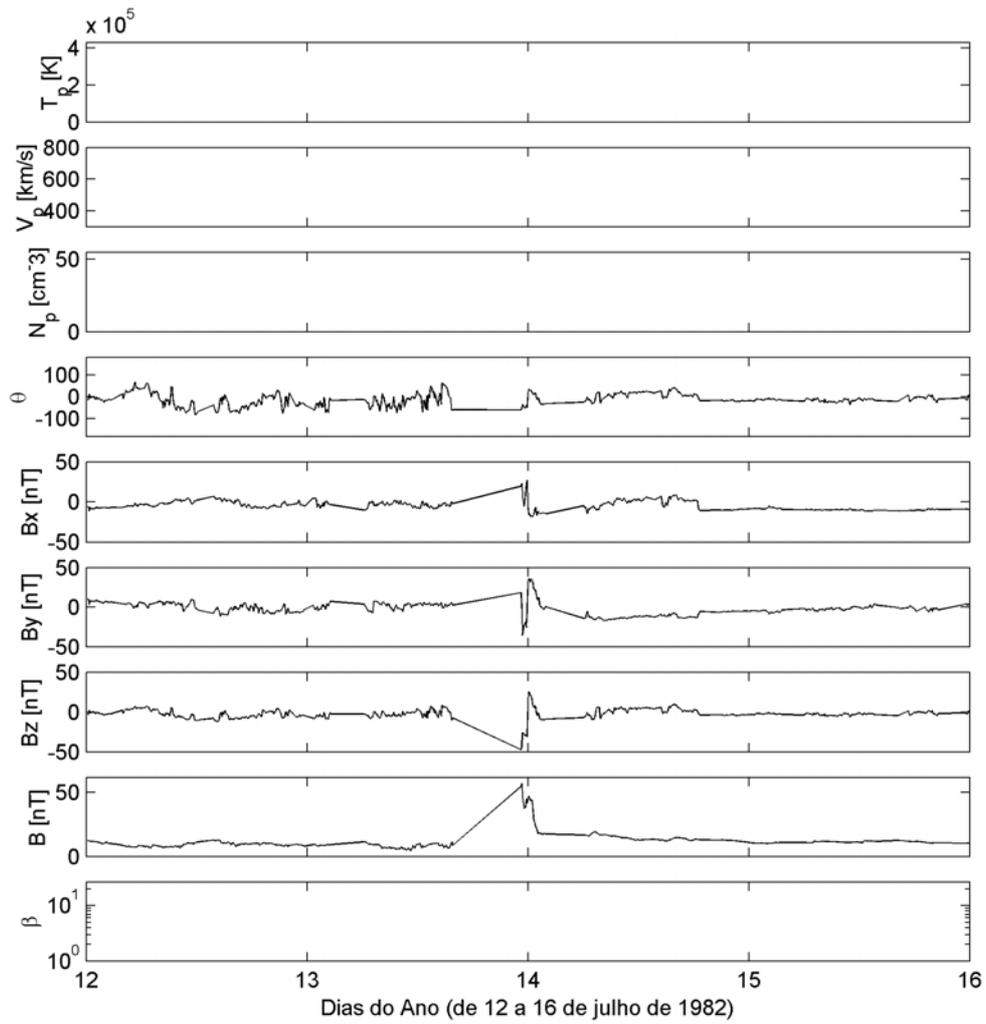


FIGURA A.1. - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ISEE-3 caracterizando a tempestade de 14 de julho de 1982. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF. No último painel não foi possível calcular o parâmetro β , devido à falta de observações de plasma.

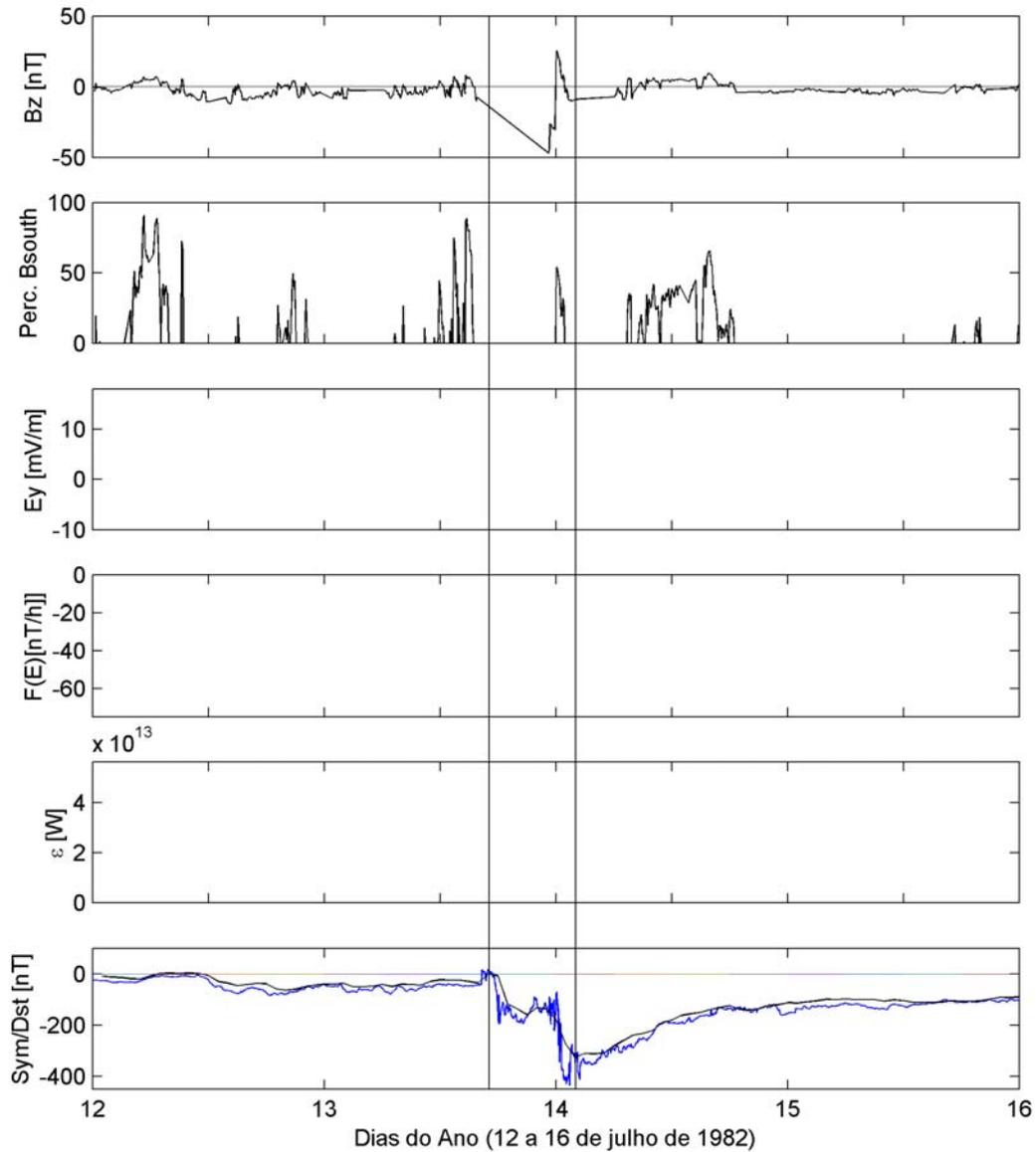


FIGURA A.2 - Dados do plasma do vento solar e a resposta na corrente de anel para o evento de 14 de julho de 1982. Para os dados de plasma, aparecem o IMF- B_z e o campo elétrico interplanetário, E_y , e para os índices geomagnéticos, o índice que mede a intensidade da tempestade, medido em intervalos de 1 hora (Dst) e o medido em períodos de 1 minuto (Sym). As linhas verticais identificam a fase principal.

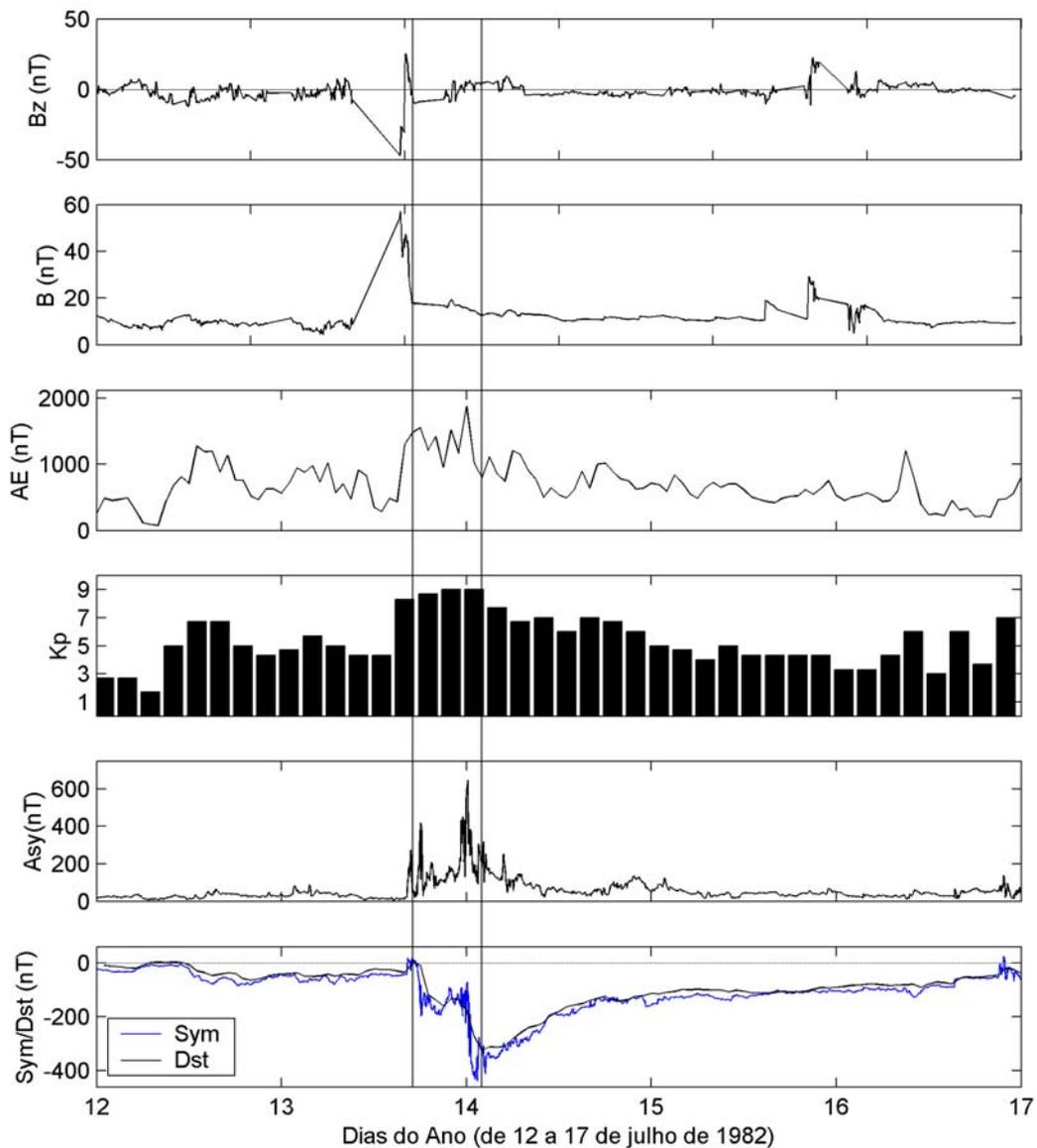


FIGURA A.3 - Nos painéis superiores aparecem o componente B_z e a magnitude B do IMF, além dos índices geomagnéticos AE (nT), K_p , Asy e Sym (ambos os últimos dados em nT). Os índices geomagnéticos são obtidos do WDC-Kyoto (AE , AU , AL , Sym e Asy) e do SPIDR (K_p e Dst), mostrando a intensidade da tempestade muito intensa ocorrida no dia 14 de julho de 1982. As linhas verticais identificam a fase principal.

A.2 Tempestade de 5 a 9 de setembro de 1982

O evento solar relacionado aos fenômenos interplanetários que levaram à ocorrência da tempestade magnética muito intensa foi provavelmente uma CME associada à explosão do tipo 3/M4 observada às 2h UT do dia 4 de setembro. Para este período não há observações de CMEs disponíveis. Conforme *Tsurutani et al.* (1992b), nas proximidades da Terra, já sob a ação do IMF, a compressão de choques e o empilhamento do IMF, devido à alta velocidade do vento solar, intensificaram o componente B_S . Os dados de plasma do vento solar não foram observados para este período pelo satélite ISEE-3, mas os componentes do IMF podem ser vistos na Figura A.4. Mais tarde, uma interação entre uma ICME e um feixe rápido intensificou ainda mais este componente. O mecanismo de compressão de B_S é uma forma de gerar intensos campos magnéticos sul que levam à fase principal (*Tsurutani et al.*, 1988; *Tsurutani et al.*, 1992b; *Gonzalez et al.*, 2002).

A energia estocada na cauda, decorrente da reconexão no lado diurno não pôde ser estimada por causa das falhas nos dados do satélite ISEE-3 durante a ocorrência do evento. Conforme se observa na Figura A.5, não foi possível estimar o comportamento das funções do E_y , da função $F(E)$ e do parâmetro ε devido à falta de dados para o período avaliado.

Esta tempestade foi um evento de SSC caracterizado por uma única etapa. O IS (impulso súbito) pôde ser visualizado pelo índice *Sym*, na Figura A.6, marcado pela passagem de um choque. O choque teria sido identificado aproximadamente às 21h UT do dia 5 de setembro, sendo identificado, também, pelo abrupto aumento da velocidade de ~500 km/s para ~800 km/s e pela magnitude do campo geomagnético, que aumentou de ~8 nT para ~26 nT (*Tsurutani et al.*, 1992b). Tanto aqui como em todos os gráficos das outras tempestades, nota-se que há um intervalo de tempo entre os dados medidos pelo satélite e os dados geomagnéticos, ou seja, um tempo de propagação do vento solar até a região da corrente de anel, que, dependendo da estrutura e das condições magnetosféricas, varia de uma a duas horas.

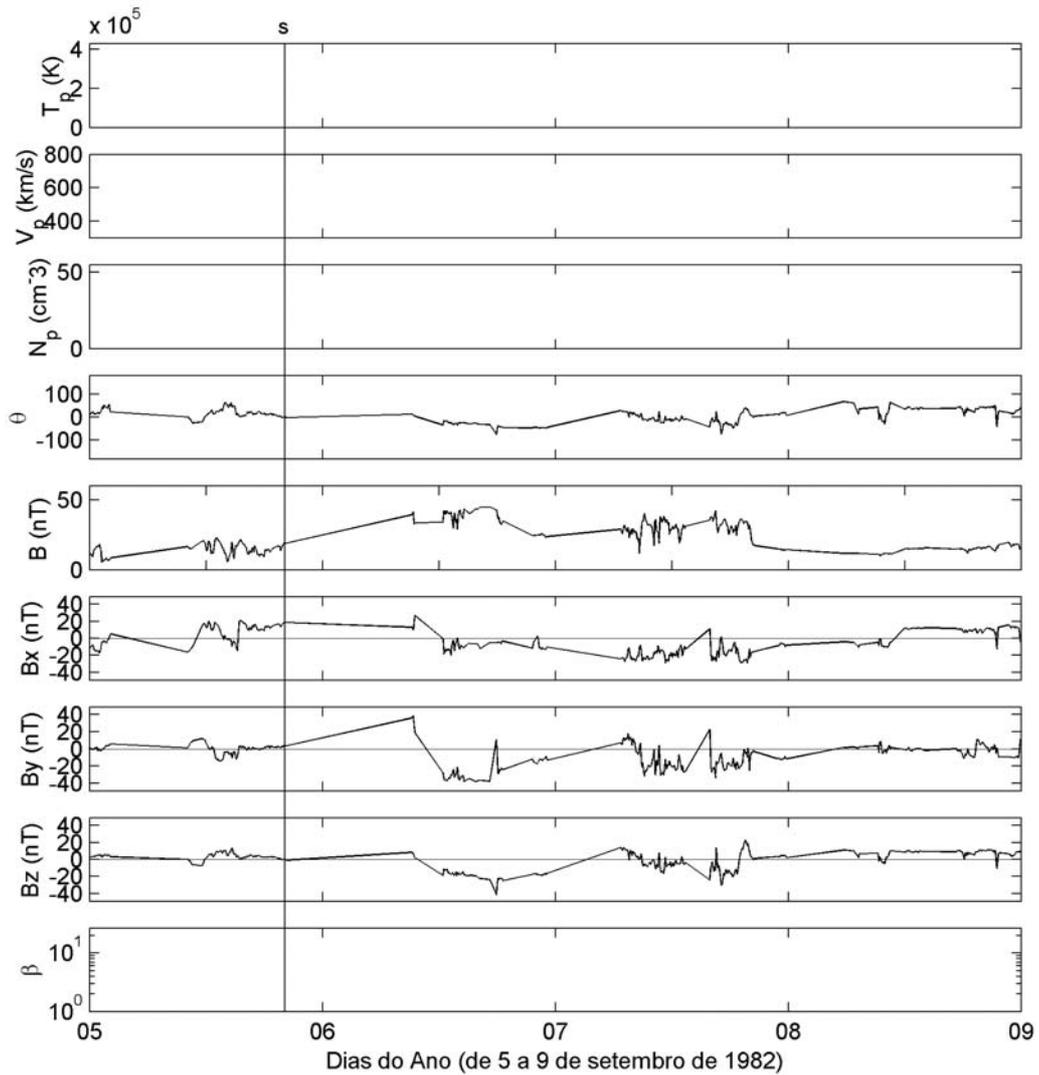


FIGURA A.4 - Parâmetros do plasma do vento solar caracterizando a tempestade de 6 de setembro de 1982. Do topo para baixo, nota-se que a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons não foram observadas pelo satélite ISEE-3 neste período. Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , aparecem na figura juntamente os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β , que também não pôde ser calculado por causa das falhas nos dados.

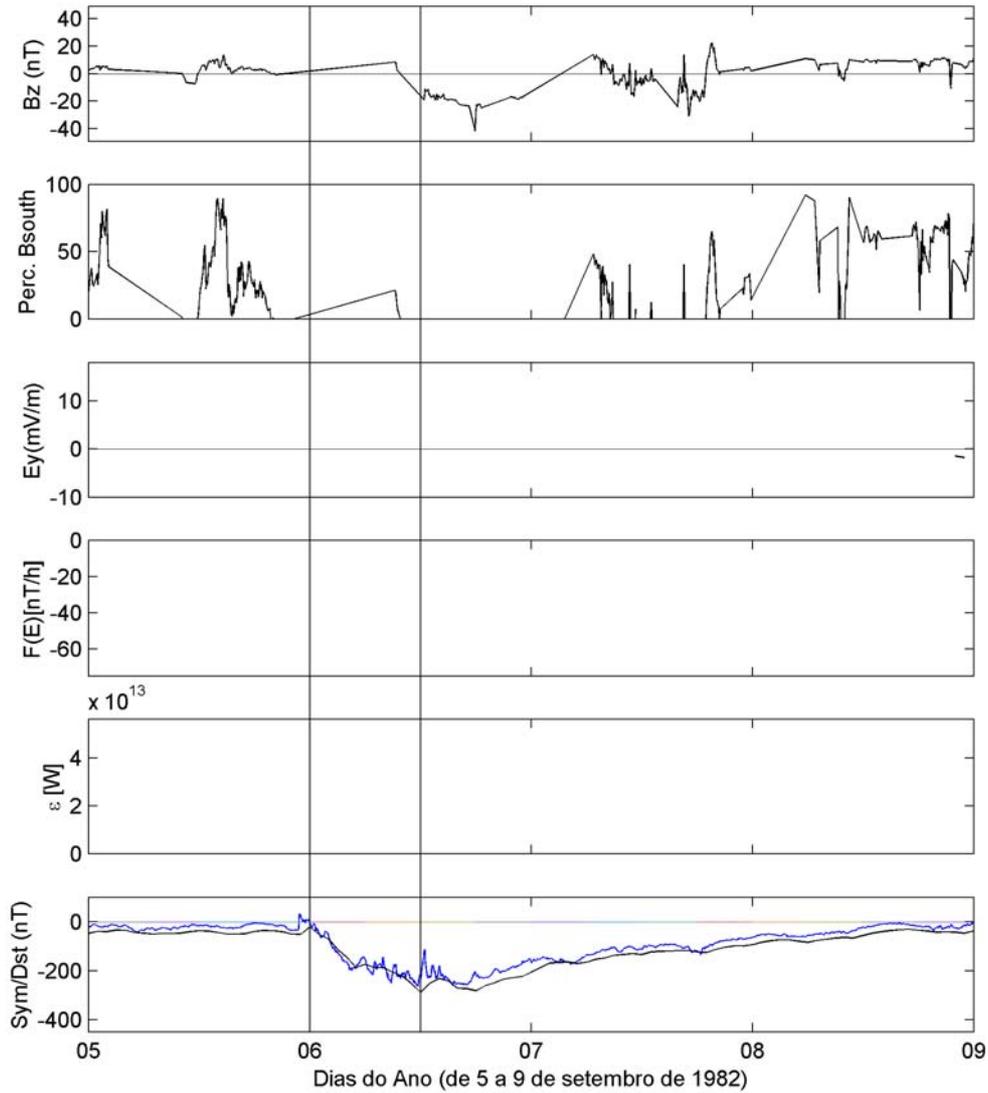


FIGURA A.5 - Dados do IMF- B_z e da porcentagem de B_s para a supertempestade do dia 6 de setembro de 1982. Além disso, as funções E_y , $F(E)$ e ε não apresentam valores durante o período. Por último, os índices Sym (resolução de 1 min do Dst) e Dst (dado em horas) são mostrados.

Como se pode observar na Figura A.6, a resposta magnetosférica à componente B_s atrás do choque levou o Dst a atingir valores negativos altos; também o índice AE respondeu com determinada intensidade, ficando com valores elevados durante a fase principal. A fase principal durou quase um dia, e pôde-se classificá-la em uma tempestade de três etapas, fazendo-se uma adaptação do critério proposto por Kamide *et al.* (1998), que propunha a classificação de tempestades de duas etapas (Gonzalez *et al.*, 2002).

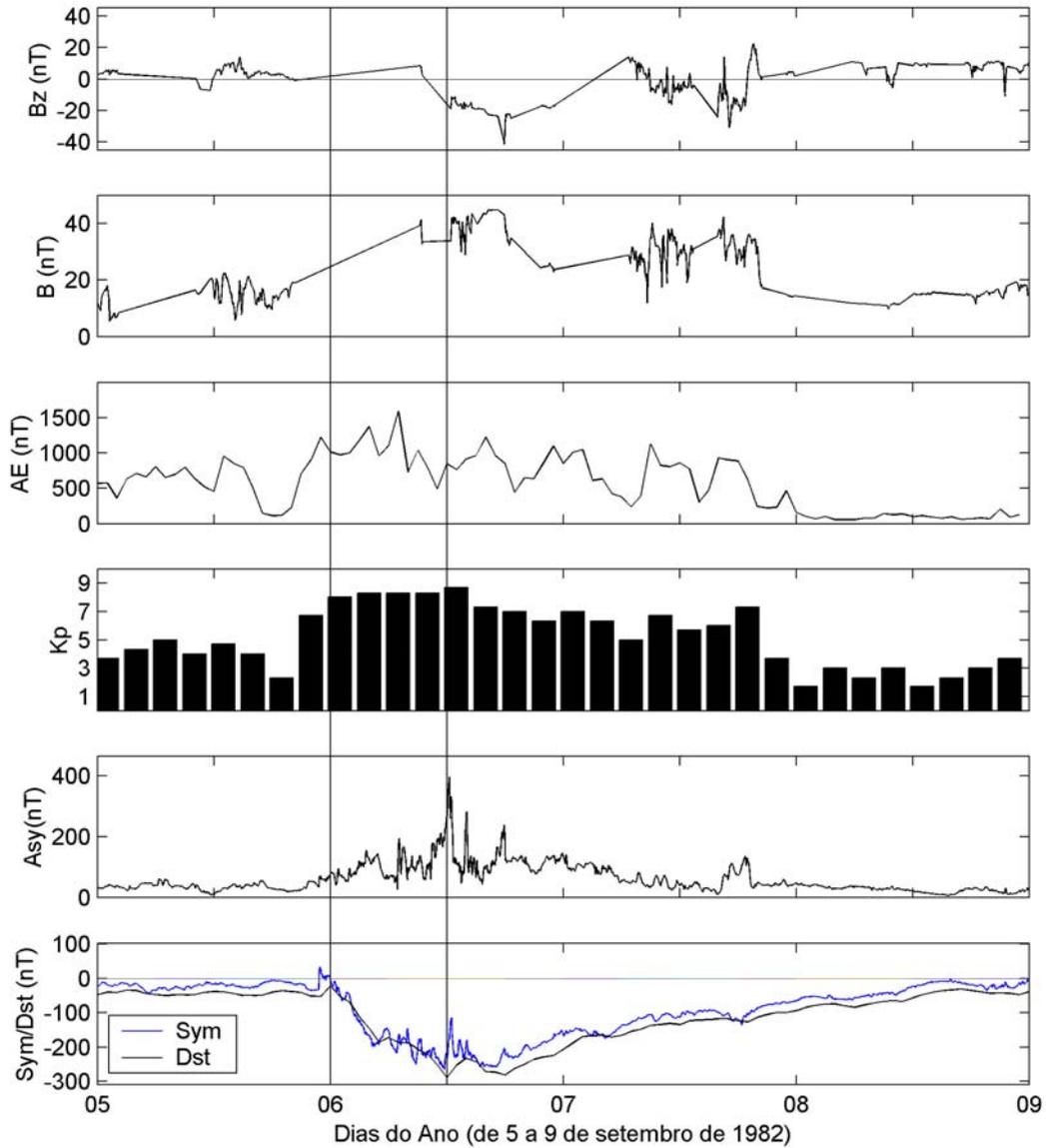


FIGURA A.6 - Dados do IMF observados pelo satélite ISEE-3 e índices geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para o evento de 6 de setembro de 1982. As linhas verticais identificam o início e o fim da fase principal da tempestade.

A.3 Tempestade de 9 a 13 de abril de 1990

A Figura A.7 mostra que, no dia 9 de abril, um choque interplanetário foi detectado. O perfil do IMF que levou à tempestade foi um B_z com direção sul durante um período superior a 12 horas no dia 10; na meia-noite do mesmo dia, e o IS marcou o começo de uma tempestade magnética cujo índice Dst alcançou $-280 nT$.

Não foi possível avaliar nem a entrada nem a perda de energia do vento solar, porque os parâmetros necessários para tais estimativas não foram avaliados durante o período considerado, como mostra a Figura A.8.

A Figura A.9 mostra que a fase principal foi longa – em torno de 18 horas de duração – correspondendo ao período no qual o índice K_p superou o valor de 7 por um tempo maior que 12 horas; para a recuperação, que prolongou-se por mais ou menos um dia e meio, o índice AE foi calmo. Durante a fase principal, o Asy foi crescendo, chegando, no pico da tempestade, a valores maiores que 300 nT. Na recuperação, assim como o AE, o índice Asy ainda variou entre valores intensos e baixos.

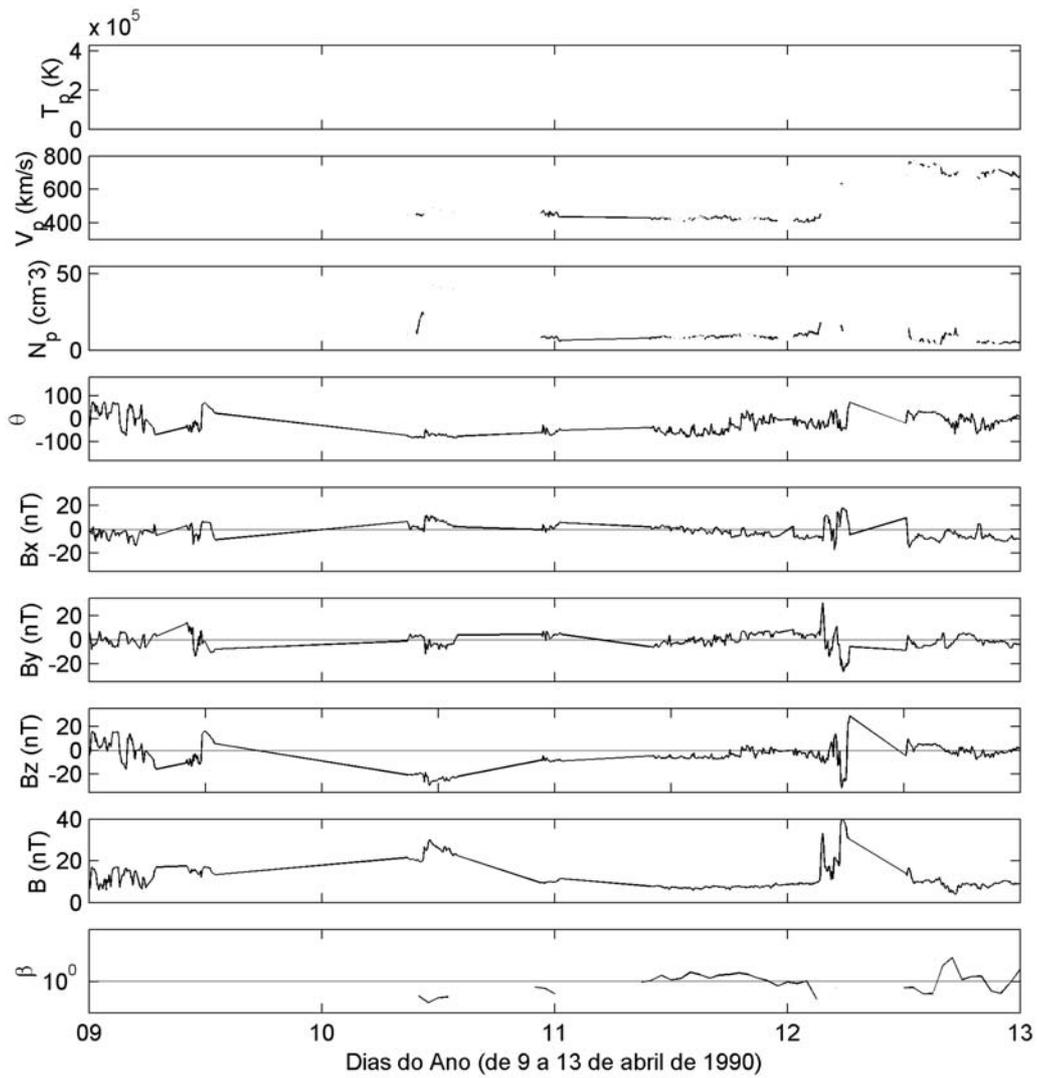


FIGURA A.7 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 10 de abril de 1990. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As falhas nos dados mostram que a intensidade do evento foi forte o suficiente para saturar os equipamentos.

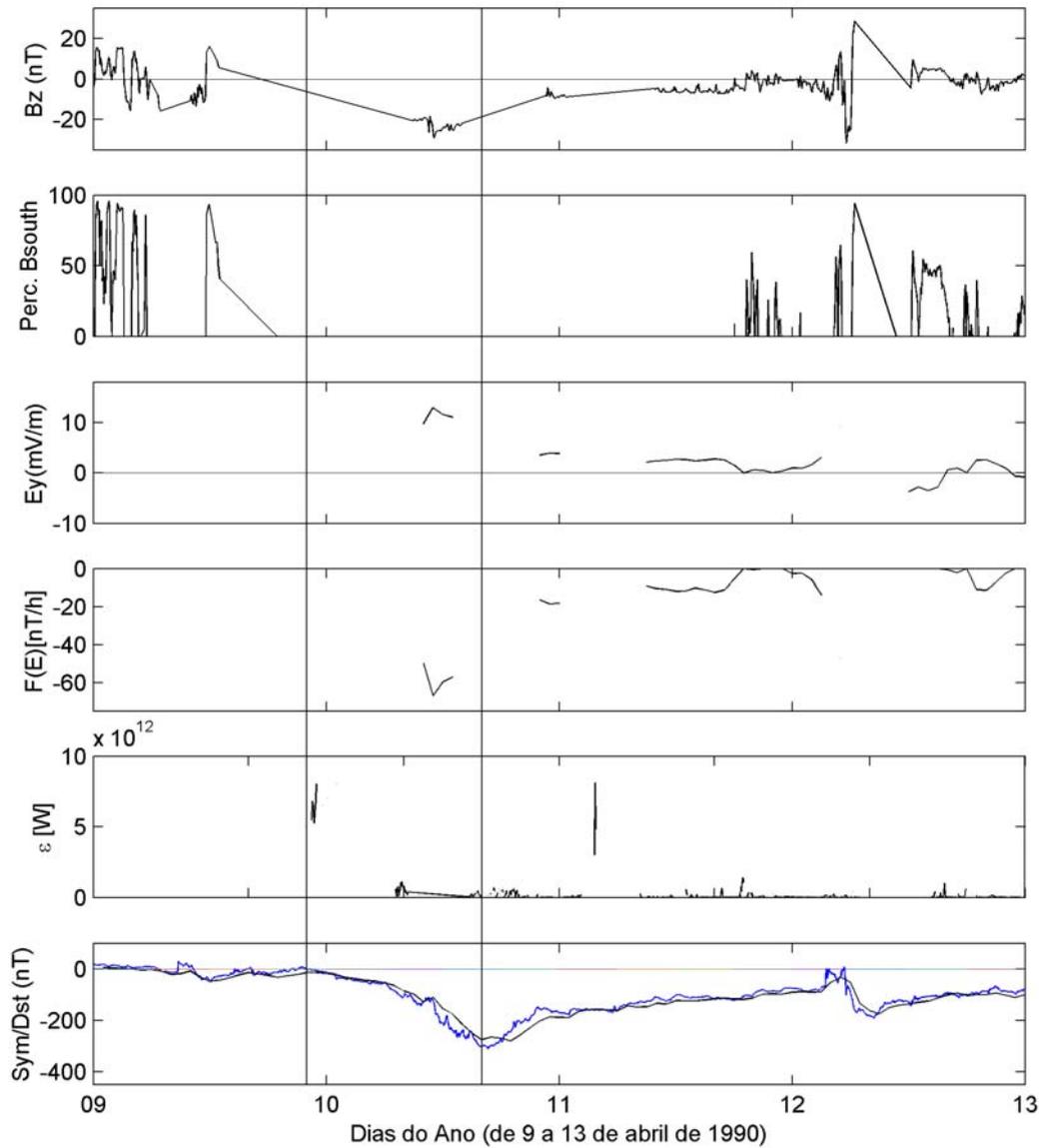


FIGURA A.8 - IMF- B_z e a porcentagem do B_S são plotados nos dois primeiros painéis da figura. Na seqüência, o campo elétrico E_y e as funções de injeção na magnetosfera e na corrente de anel, para o evento de 10 de abril de 1990, representadas por ε e $F(E)$, não puderam ser avaliados. No último painel, os índices Dst e Sym mostram o comportamento da corrente de anel durante a tempestade.

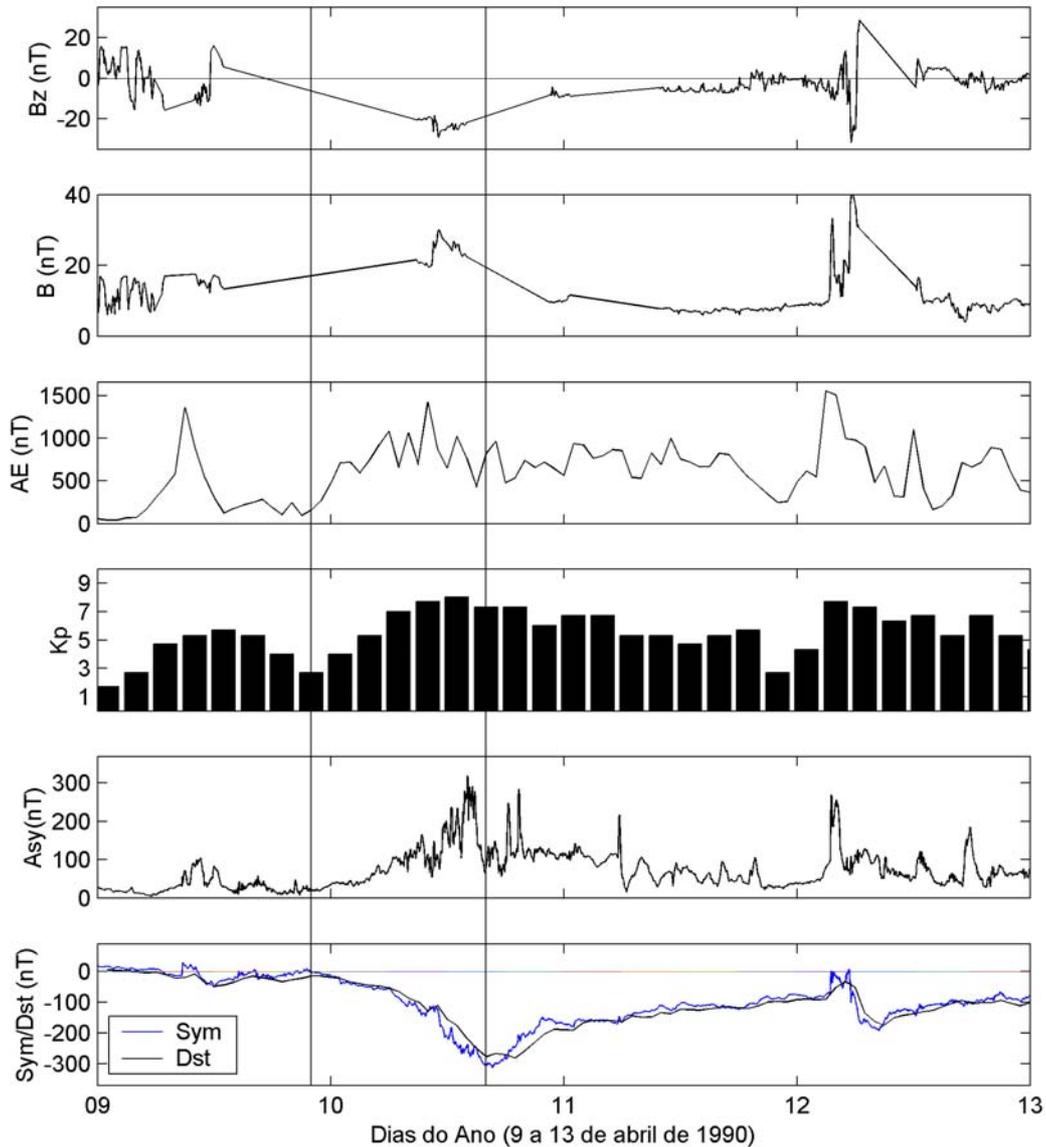


FIGURA A.9 - Dados do campo IMF observados pelo IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 10 de abril de 1990. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT. A fase principal é identificada pelas linhas verticais.

A.4 Tempestade de 23 a 29 de março de 1991

Como se vê na Figura A.10, às 3h41min UT do dia 24 de março, um choque interplanetário encontrou a magnetosfera terrestre causando uma grande compressão. Seguindo o choque, um IS foi identificado no mesmo dia, e, em seqüência, uma das

etapas da fase principal da tempestade foi marcada por uma injeção de energia, levando o *Dst* a atingir um pico de -100 nT ; logo na sequência, a segunda injeção causou um declive de -300 nT no *Dst*. Após quase um dia de prolongamento da fase principal, a fase de recuperação da tempestade passou a se desenrolar tomando mais de cinco dias (Wygant *et al.*, 1998).

Esta severa tempestade magnética teve uma máxima incursão do *Dst* de -300 nT . Durante a fase principal, a corrente de anel foi bastante intensificada, com uma taxa de injeção, $dDst/dt$, de -50 nT/h . Esta variação da energia na corrente de anel é influenciada pelos processos de perda das partículas mais do que pela própria injeção de partículas da lâmina de plasma (*plasmashet*). Devido às falhas nos dados, visíveis pelas Figuras A.10 e A.11, não foi possível ter-se uma idéia da quantidade de energia que foi depositada na região da cauda, devido á reconexão no lado diurno, nem ao menos da quantidade de energia que foi perdida na corrente de anel, através da convecção. Segundo Wygant *et al.* (1998), um campo elétrico de direção amanhecer-entardecer (*dawn to dusk*) foi observado, excedendo os 6 mV/m , e com um valor médio de 4 mV/m . Este período de intenso campo elétrico de convecção coincidiu com as maiores perturbações do campo magnético da corrente de anel. O período de duração destes campos elétricos compara-se com ou é maior ao período de deriva das partículas em torno da Terra com uma energia que varia entre $100\text{ e }300\text{ keV}$.

Na Figura A.12, observa-se um IS ocorrido no dia 24 de março. Tanto o K_p , como o AE, como também o índice *Asy* alcançaram valores de pico extremos, pode-se dizer os mais representativos valores comparados com o restante do período. O *Asy* ficou com valores acima de 600 nT , caindo após este instante, e subindo novamente para $\sim 400\text{ nT}$. O AE superou os 3000 nT no IS caindo para valores inferiores a 100 nT durante o restante do tempo. O índice K_p , durante o IS, ficou em 8, mas entre os dois picos caiu para 5. Ao longo do período, variou entre 1 e 9.

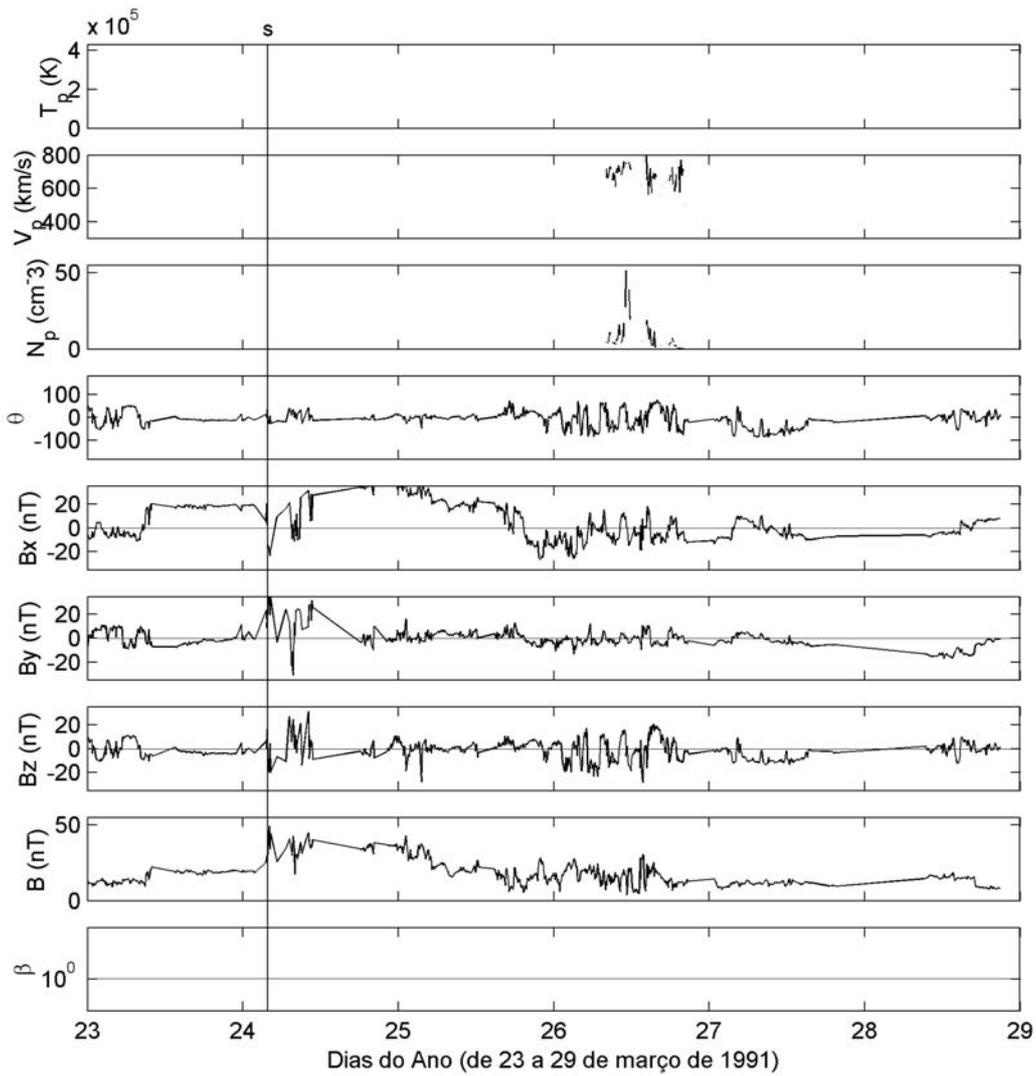


FIGURA A.10 - Parâmetros do plasma do vento solar do satélite IMP-8 caracterizando a tempestade de 25 de março de 1991. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF. No último painel, o beta de plasma, β não pode ser avaliado no período. O choque é identificado pela linha vertical.

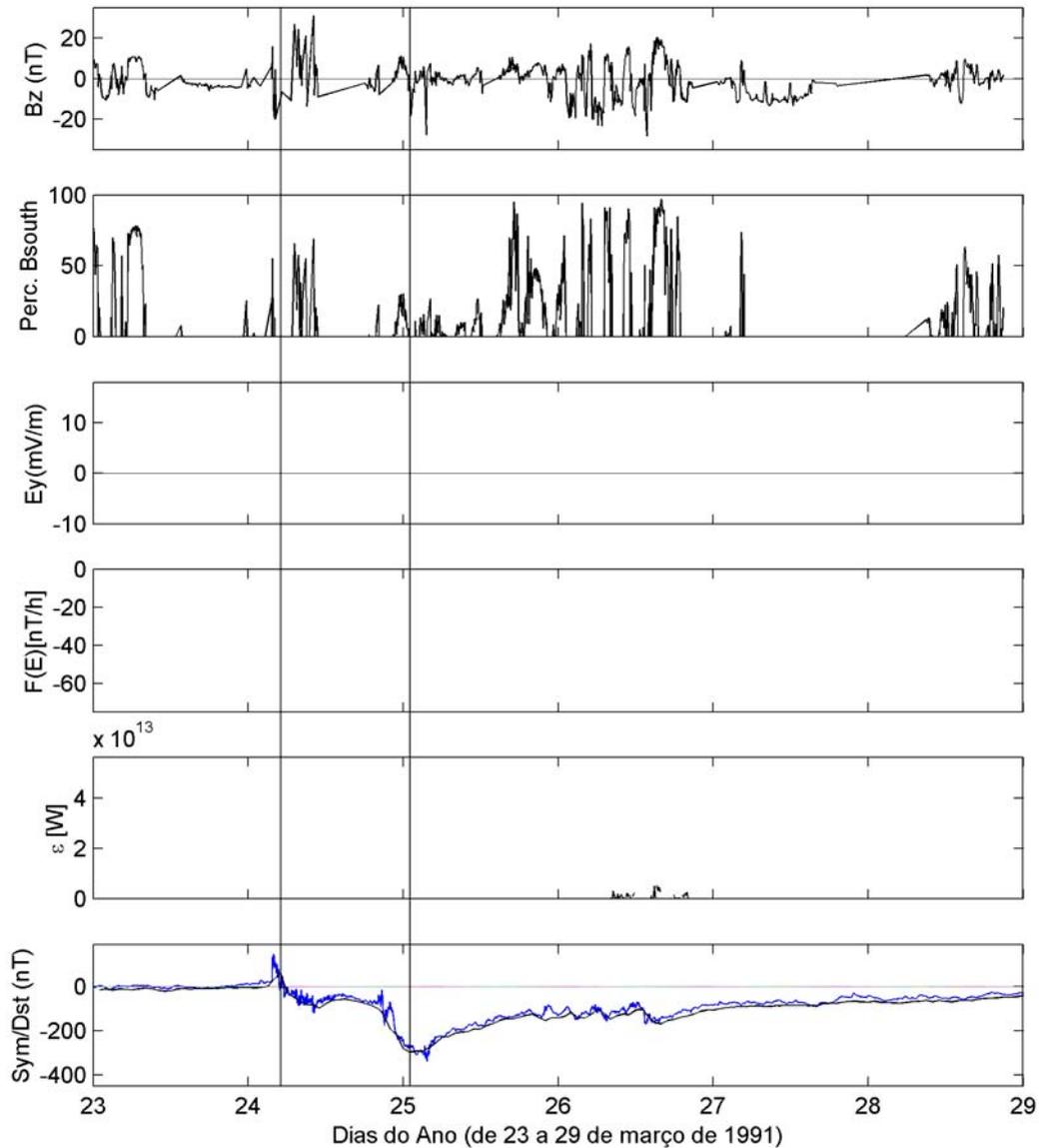


FIGURA A.11 - IMF- B_z e porcentagem de B_S para o evento de 25 de março de 1991 são mostrados nos dois primeiros painéis da figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção de energia, dadas por $F(E)$ e ε , não têm seus dados avaliados para esta época. No último painel, os índices Dst e Sym representam a resposta da corrente de anel para a injeção de energia.

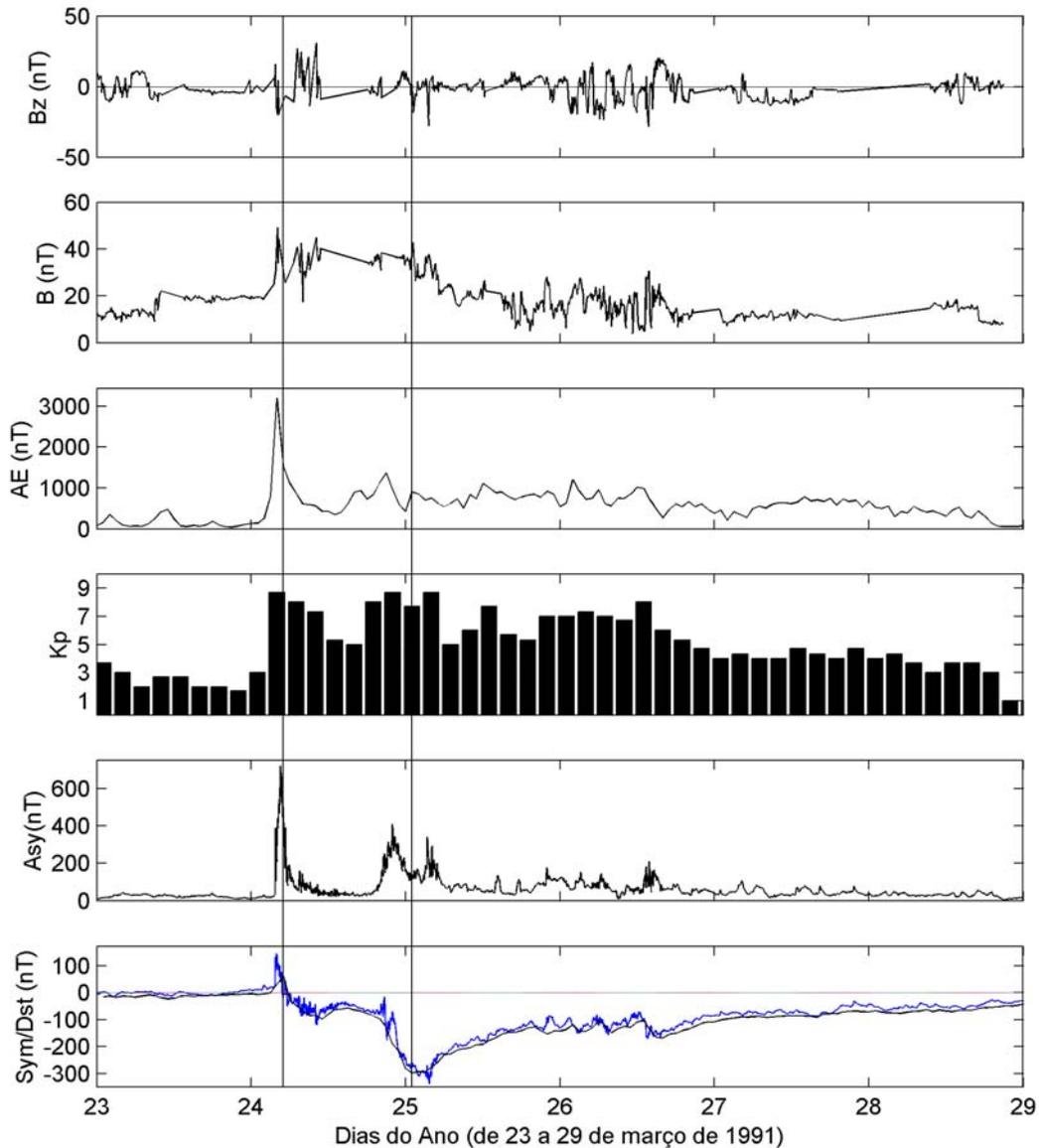


FIGURA A.12 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Sym e Asy) e do SPIDR (K_p e Dst) para a supertempestade do dia 25 de março de 1991. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE (em nT), o K_p , o Asy e o Sym/Dst , dados em nT .

A.5 Tempestade de 27 de outubro a 1 de novembro de 1991

Um choque é identificado, na Figura A.13, no dia 28 de outubro, pelo aumento abrupto em V_p , N_p e B , apesar de T_p não ser avaliado. Os dados do plasma são observados com certa resolução, que permite observar apenas os choques, mas não os detalhes do

evento, sendo que em alguns intervalos, observaram-se falhas nos dados do vento solar (plasma e campo magnético). A temperatura dos prótons não pode ser medida pelos instrumentos a bordo do satélite IMP-8, provavelmente pela saturação dos instrumentos. Pela mesma figura (Figura A.13), pode-se notar que o componente B_z do IMF mudou para -7 nT, correspondendo ao primeiro IS da tempestade de 28 de outubro. Para o segundo IS, o B_z mudou drasticamente durante o período das 22h UT do dia 28 de outubro para 2h UT do dia 29 do mesmo mês, permanecendo com valor de -17 nT das 0h10min às 2h UT no dia 29 (Srivastava *et al.*, 1999).

Na Figura A.14, pode-se observar que o início súbito desta tempestade aconteceu às 10h53min do dia 28 de outubro, com o componente-H variando até 438 nT. O segundo IS foi registrado às 15h37min do mesmo dia e causou uma variação no componente-H de +148 nT durante a fase principal. A fase principal começou com o segundo IS, reduzindo o Dst até -360 nT dentro de 12 horas, e estendeu-se por 20h (Srivastava *et al.*, 1999). A primeira injeção de energia teve um pico de Dst de -200 nT, e prolongou-se por 9h, sendo que o Dst recuperou até -120 nT e foi sucedido por uma nova injeção de energia na corrente de anel. As funções de injeção de energia na magnetosfera e na corrente de anel não puderam ser calculadas durante todo o intervalo. O que se observa é que, devido ao campo elétrico, E_y , ter valores durante alguma parte do intervalo, foi possível estimar-se a taxa com que a energia foi injetada na corrente de anel neste mesmo período. O mesmo aconteceu com o parâmetro epsilon, pois os dados do vento solar foram parcialmente obtidos, por causa das falhas que foram observados durante o período.

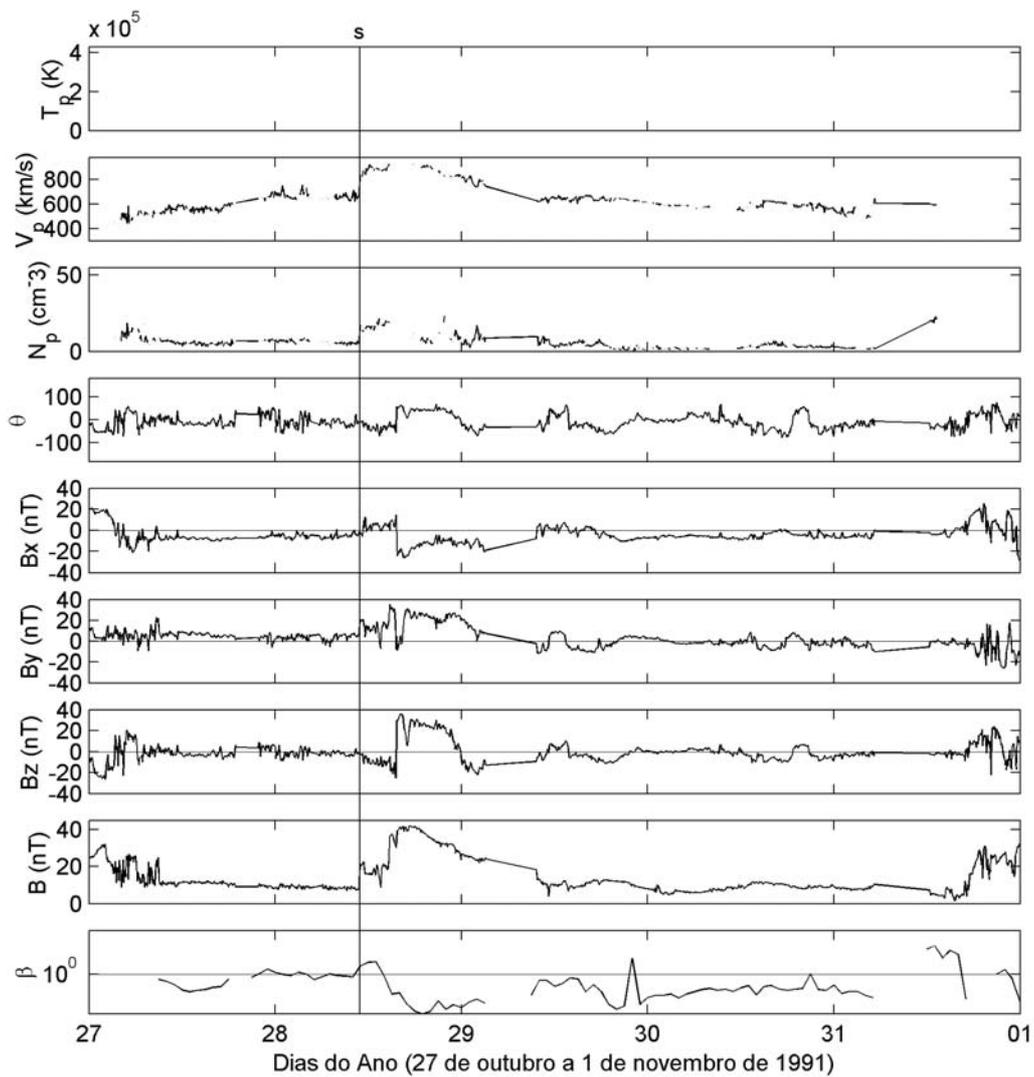


FIGURA A.13 - Dados do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 para o evento de 29 de outubro de 1991. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β , obtido com os dados disponíveis do IMP-8, no OMNI. O choque é identificado pela linha vertical.

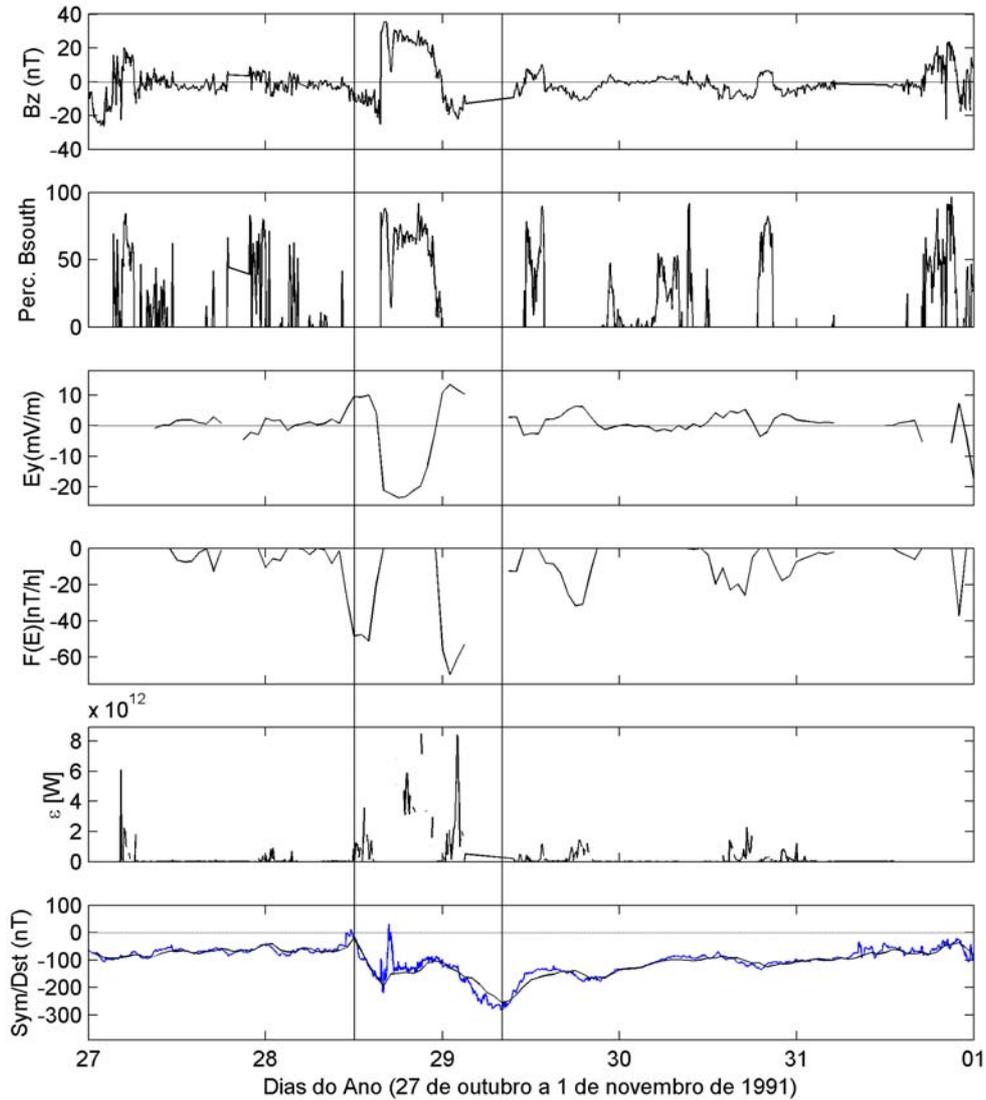


FIGURA A.14 - IMF- B_z e percentual de B_S para o evento de 29 de novembro de 1991.

Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e a função de injeção na corrente de anel apresentam seus dados em parte do intervalo, enquanto que o parâmetro ε , devido as falhas nos dados do vento solar, não pôde ser avaliado. O Dst e o Sym representam, no último painel, a resposta da corrente de anel para a injeção de energia.

Conforme se observa na Figura A.15, na primeira etapa, o índice A_{sy} mostrou um pico agudo, e caiu durante a recuperação parcial da corrente de anel. Sobee novamente para valores moderados, ~ 180 nT, durante a segunda etapa. Para o AE, observa-se que, na primeira etapa, este índice fica em torno de 1700 nT, volta a valores reduzidos durante a recuperação parcial e volta a subir até valores acima de 1200 nT no pico da tempestade.

Na seqüência, seguindo a recuperação, os valores oscilam entre altos e baixos. Já o índice K_p , no primeiro IS fica em torno de 6, e aumenta para ~ 8 na primeira etapa; cai novamente, e volta a subir até 7 ou 8 na segunda etapa. Nova queda é observada seguida de novo crescimento durante a fase de recuperação da tempestade.

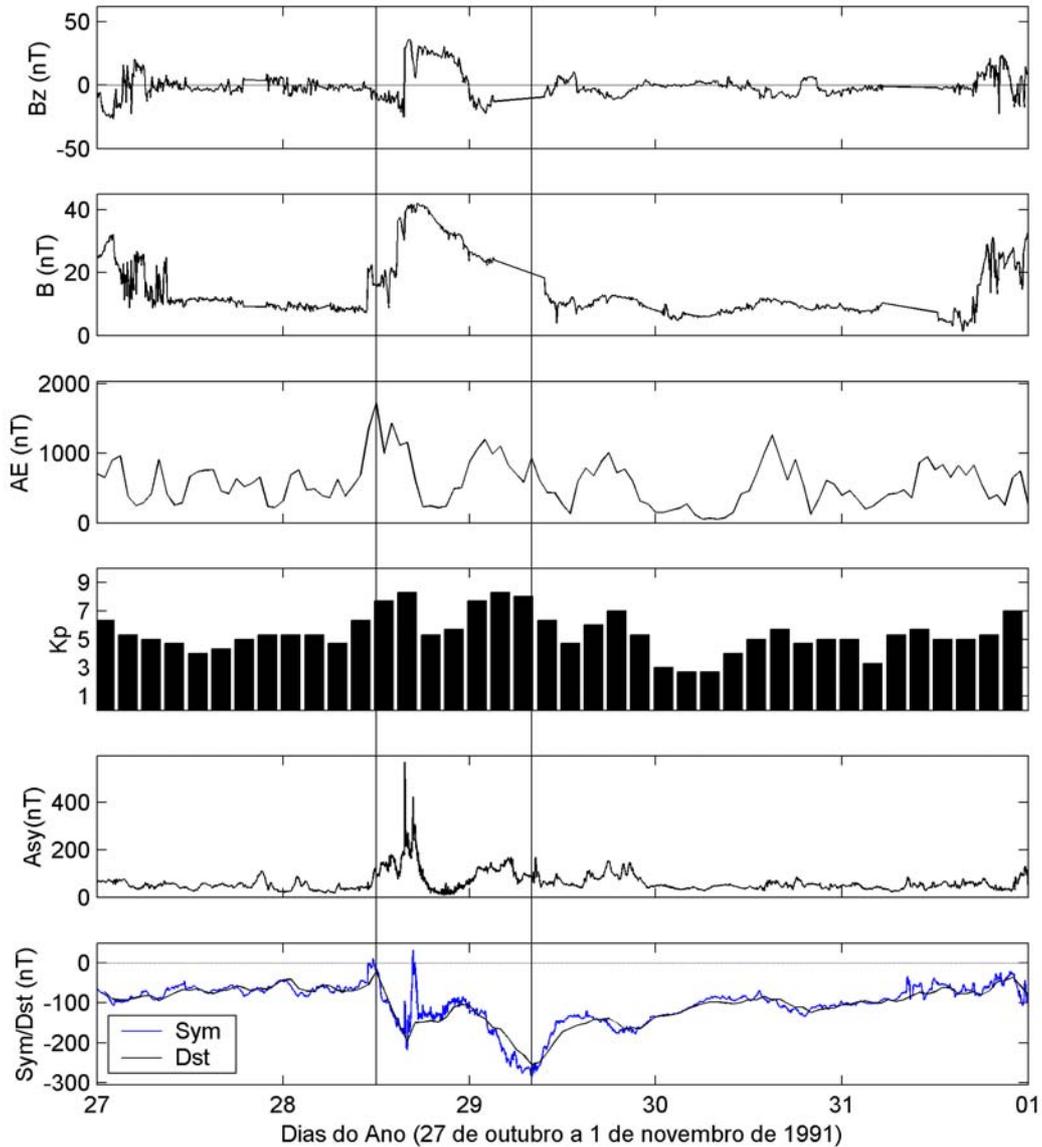


FIGURA A.15 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 29 de outubro de 1991. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em bnT . A fase principal é localizada a partir das linhas na vertical.

A.6 Tempestade de 8 a 17 de maio de 1992

Dois inícios súbitos ocorreram simultaneamente no dia 10 às 15h41min e às 19h56min UT, e a eles corresponderam duas ondas de choque. No Sol, uma explosão do tipo 2F/C3.4, foi observada às 6h43 min UT do dia 7, enquanto a segunda explosão 4/M7.4, apareceu na latitude heliográfica 26° Sul e 8° Leste, em RA 7154 – classificação feita pelo NOAA – às 15h12min UT do dia 8 de maio (Kozuka *et al.*, 1995).

A Figura A.16 mostra, através do aumento nos dados de B , V_p e N_p , a ocorrência de dois choques interplanetários neste período. Os dados de T_p não puderam ser avaliados para este período, provavelmente devido à saturação nos equipamentos do satélite IMP-8. E, em decorrência disso, na Figura A.17, o campo elétrico foi parcialmente observado no período considerado, e as funções de injeção na magnetosfera e na corrente de anel, dadas por, $F(E)$ e ε , respectivamente, não puderam ser medidas em todo o período, principalmente na fase de interesse (fase principal).

Na Figura A.18, a primeira deflexão de H levou a um valor de Dst de pico em $-75 nT$, e a segunda, em $-288 nT$. A duração da fase principal foi de 15 horas, sendo que neste tempo a corrente assimétrica oscilou entre valores baixos e valores elevados, de até $400 nT$, permanecendo com valores significativos até mesmo na fase de recuperação e caindo já no final da mesma. Conforme mostra a Figura A.18, tanto o índice K_p quanto o AE apresentaram picos durante o IS – o AE chegou em torno de $1000 nT$ – depois ambos caíram e atingiram novos picos na fase principal: o K_p aproximou-se de 8, enquanto que o AE atingiu um máximo perto de $1500 nT$, mas permaneceu elevado até mesmo na fase de recuperação.

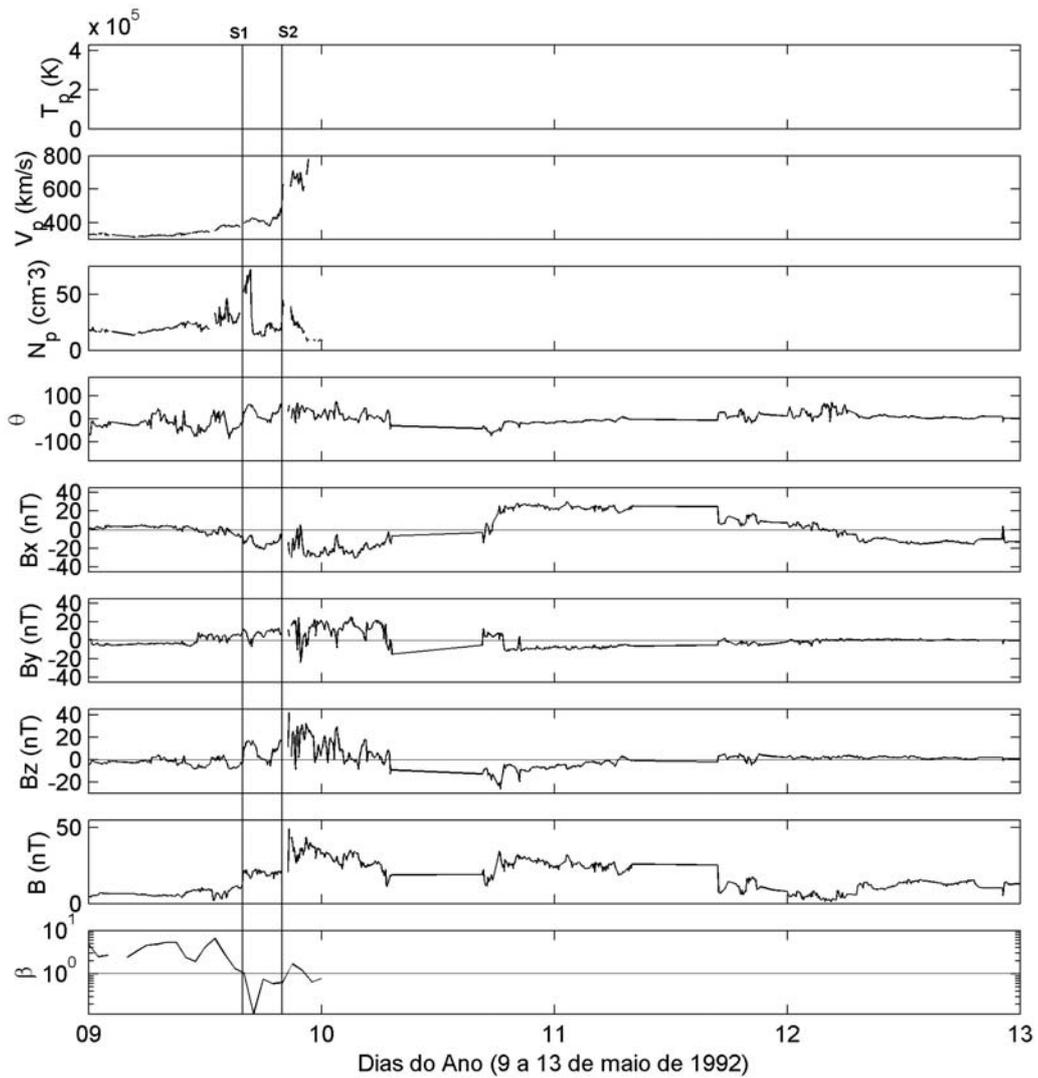


FIGURA A.16 - Dados do plasma do vento solar observados pelo satélite IMP-8 para o evento de 10 de maio de 1992. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , que não pôde ser avaliada para o período em questão, a velocidade, V_p , e a densidade, N_p , dos prótons. Logo em seguida, o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . Os choques são identificados pelas linhas verticais.

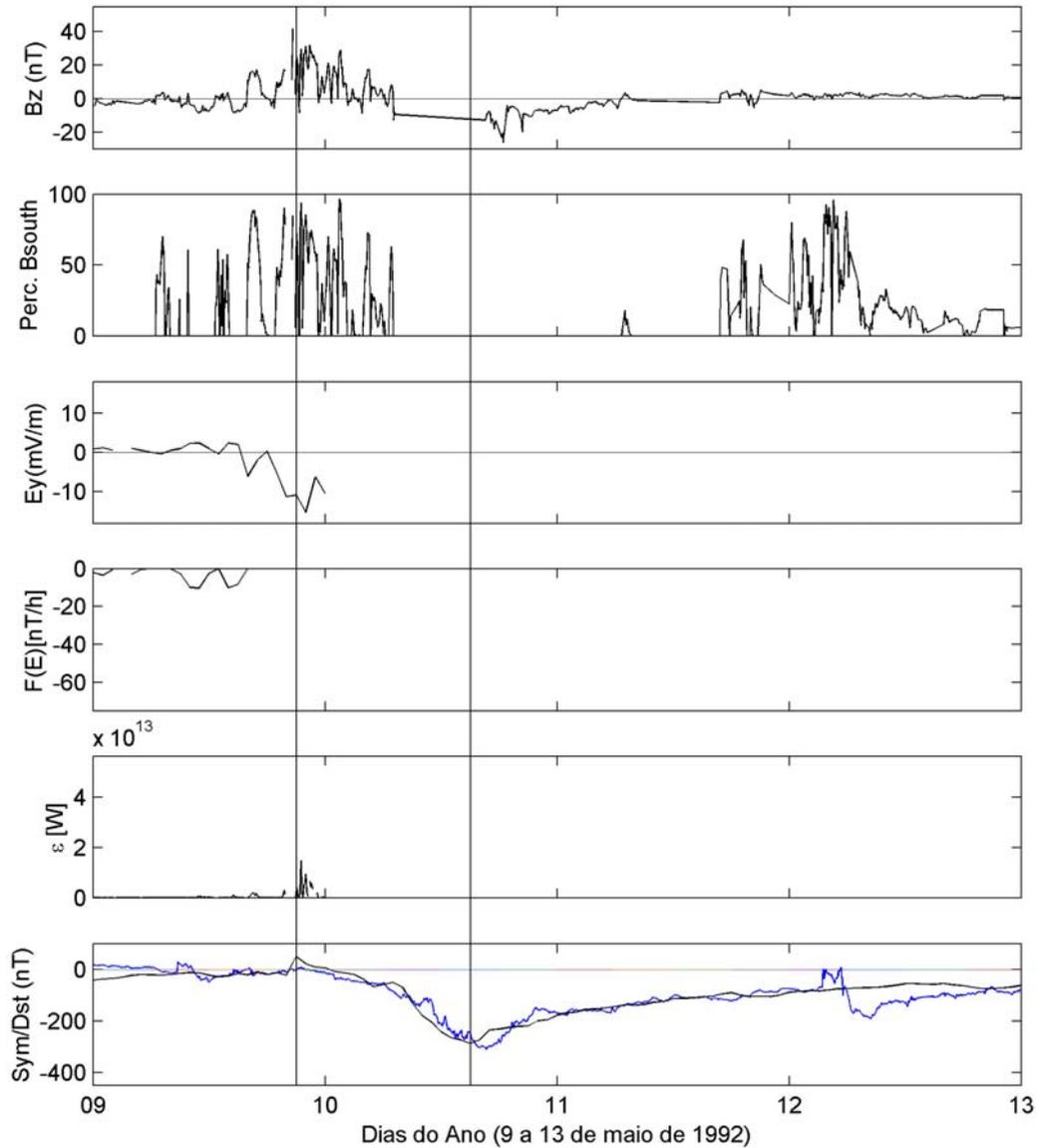


FIGURA A.17 - IMF- B_z e percentual de B_S para o evento de 10 de maio de 1992. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e a função de injeção na corrente de anel apresentam seus dados em parte do intervalo, enquanto que o parâmetro ε , devido as falhas nos dados do vento solar, não pôde ser avaliado. O Dst e o Sym representam, no último painel, a resposta da corrente de anel para a injeção de energia. A fase principal está localizada entre as duas linhas verticais.

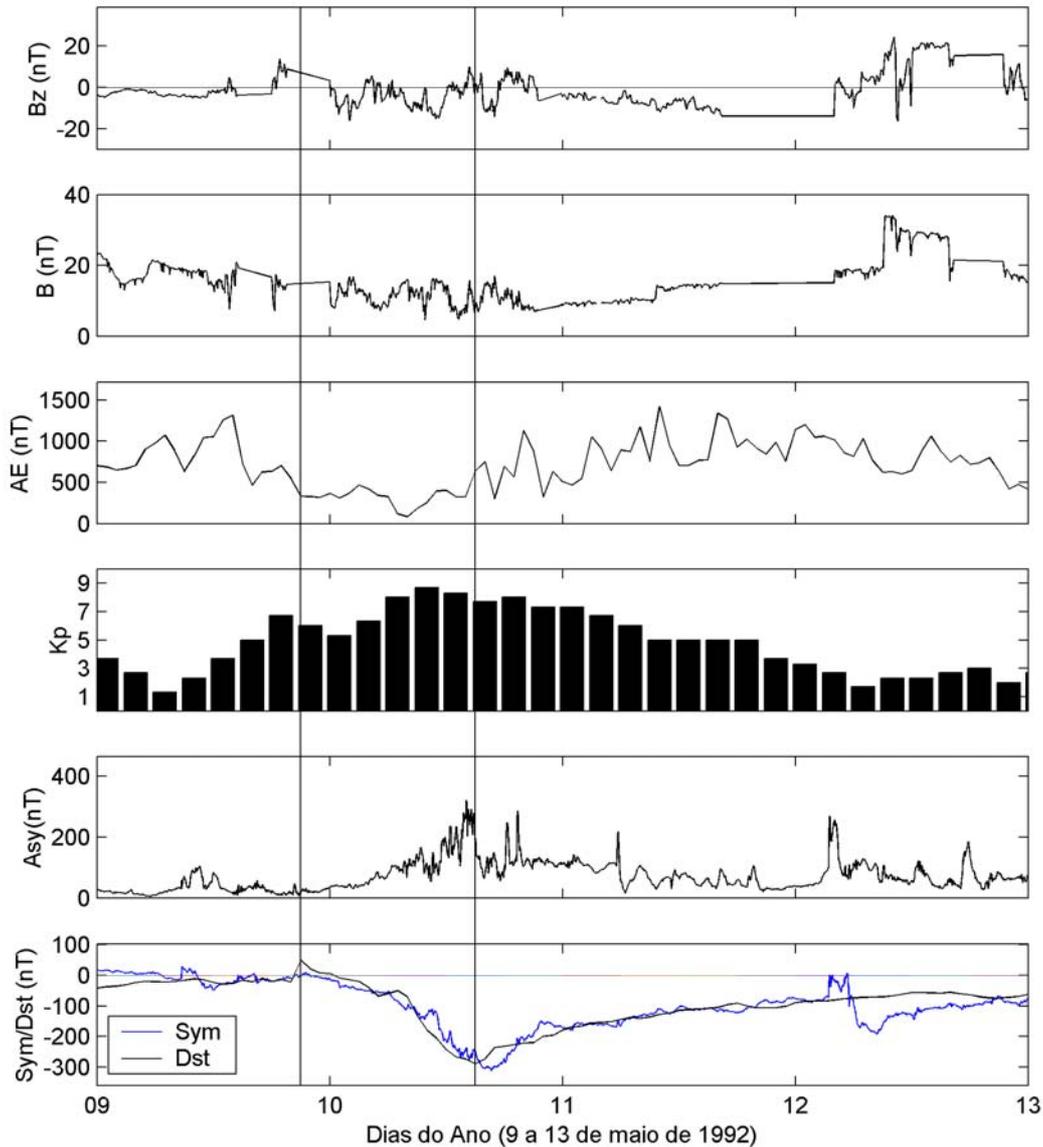


FIGURA A.18 - Dados do campo IMF observados pelo satélite IMP-8 e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 10 de maio de 1992. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, o índice K_p e os índices AE, *Asy* e *Sym/Dst* (dados em nT). O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas na vertical.

A.7 Tempestade de 30 de março a 3 de abril de 2001

Segundo *Richardson e Cane (2003)*, uma CME foi observada no dia 28 de março, às 12h50min UT, causando um choque às 0h52min UT do dia 31. Esta ICME foi

inicialmente detectada às 5h UT e estendeu-se até 22h UT do mesmo dia 31. O segundo choque observado aconteceu às 22h UT do mesmo dia em que aconteceu o primeiro IS. A CME, que foi a causa da propagação da segunda onda de choque no meio interplanetário, foi observada nas imagens de LASCO C2, sendo que o IS foi às 4h do dia 1 de abril e o fim da estrutura no dia 3 de abril às 3h. Relacionada a este evento, uma explosão ocorreu no dia 29, às 9h57min UT, emitindo em raios X da classe X6.7. Na Figura A.19, pode-se visualizar a detecção dos choques ocorridos durante o período avaliado.

O componente B_z foi positivo de 3h até 2h40min UT no dia 31 de março, sendo que depois deste período ficou oscilando entre valores positivos e negativos até aproximadamente 3h30min quando a direção mudou para sul por aproximadamente 4 horas. Valores altos negativos de B_z , menores que -40 nT , foram observados em torno das 6h UT. A velocidade do vento solar cresceu em duas etapas de 400 km/s para aproximadamente 750 km/s . A pressão dinâmica do vento solar, principalmente seguida por mudanças na densidade do vento solar mostrou grandes variações durante as seis primeiras horas do dia 31, sendo que em longos períodos apresentou grandes valores. Todas estas condições interplanetárias levaram à geração da grande tempestade ocorrida neste período com uma fase principal rápida que começou às 4h UT do dia 31, e terminou 4 horas depois. Ao considerar-se o tempo de atraso entre o vento solar com o IMF e a resposta magnetosférica como sendo em torno de 30-40 min, nota-se que o fim da tempestade corresponde com a incursão de B_z para valores positivos. Depois de um longo período de $B_z > 0$, novamente, próximo às 14-22h UT B_S voltou a dominar causando um segundo mínimo no Dst de -285 nT (Asikainen et al., 2004).

Para os dados de plasma tomados alguns dias antes da ocorrência do evento, foi observado, além da ICME, um feixe rápido, que interagiu com ela. Como se observa na Figura A.20, apesar da fase principal ter sido rápida, foi forte o suficiente para causar uma grande redução no componente- H . A energia total, que entrou do vento solar, foi de $2,5 \times 10^{17} \text{ J}$, sendo que, desta, $4,95 \times 10^{16} \text{ J}$ foi dissipada na corrente de anel. Isso foi possível também pela permanência de B_S abaixo de -30 nT por um período de 2 horas, alcançando picos de até -47 nT . O campo elétrico E_y respondeu a essa incursão de B_z ficando por duas horas com valores superiores a 20 mV/m . O pico do parâmetro epsilon foi de $5,34 \times 10^{13} \text{ W}$.

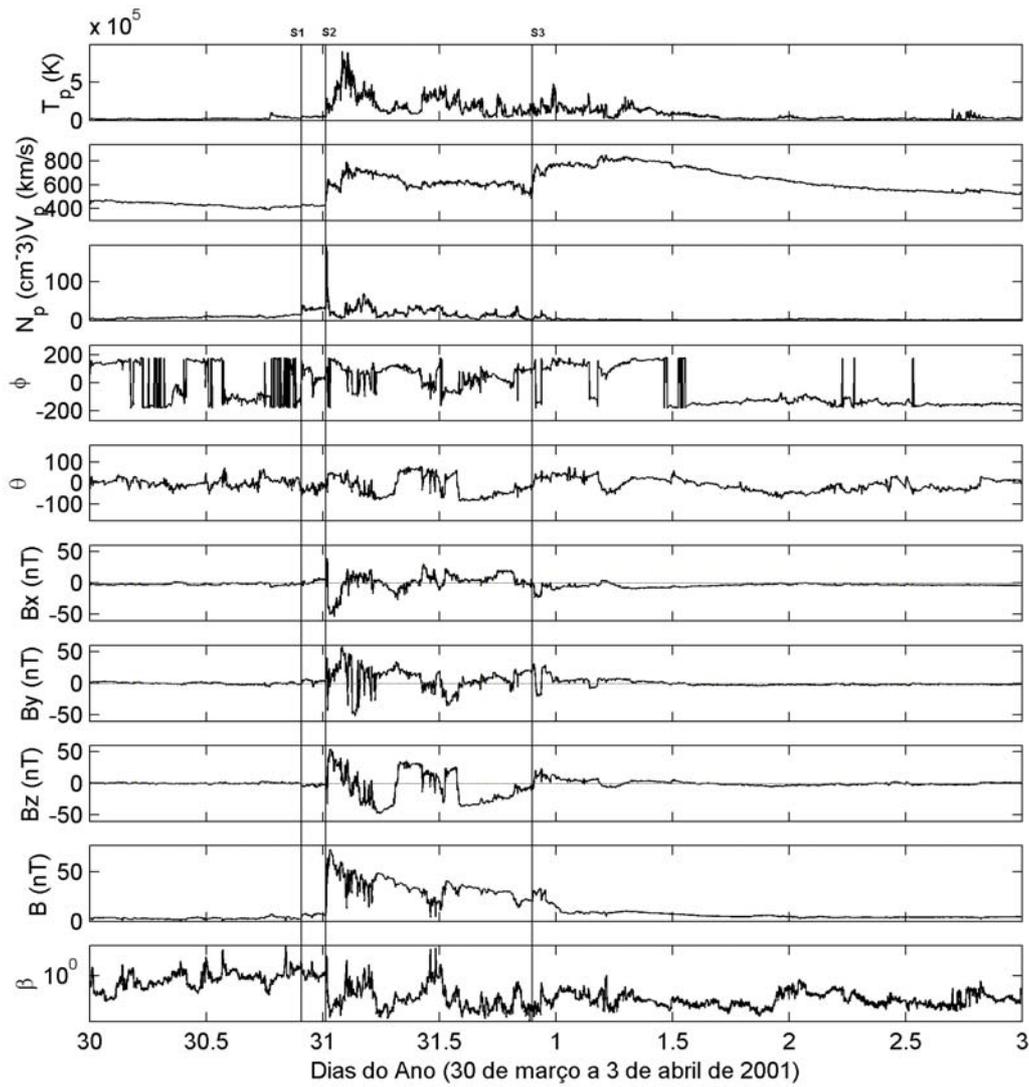


FIGURA A.19 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 31 de março de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas na vertical identificam os choques ocorridos durante o evento.

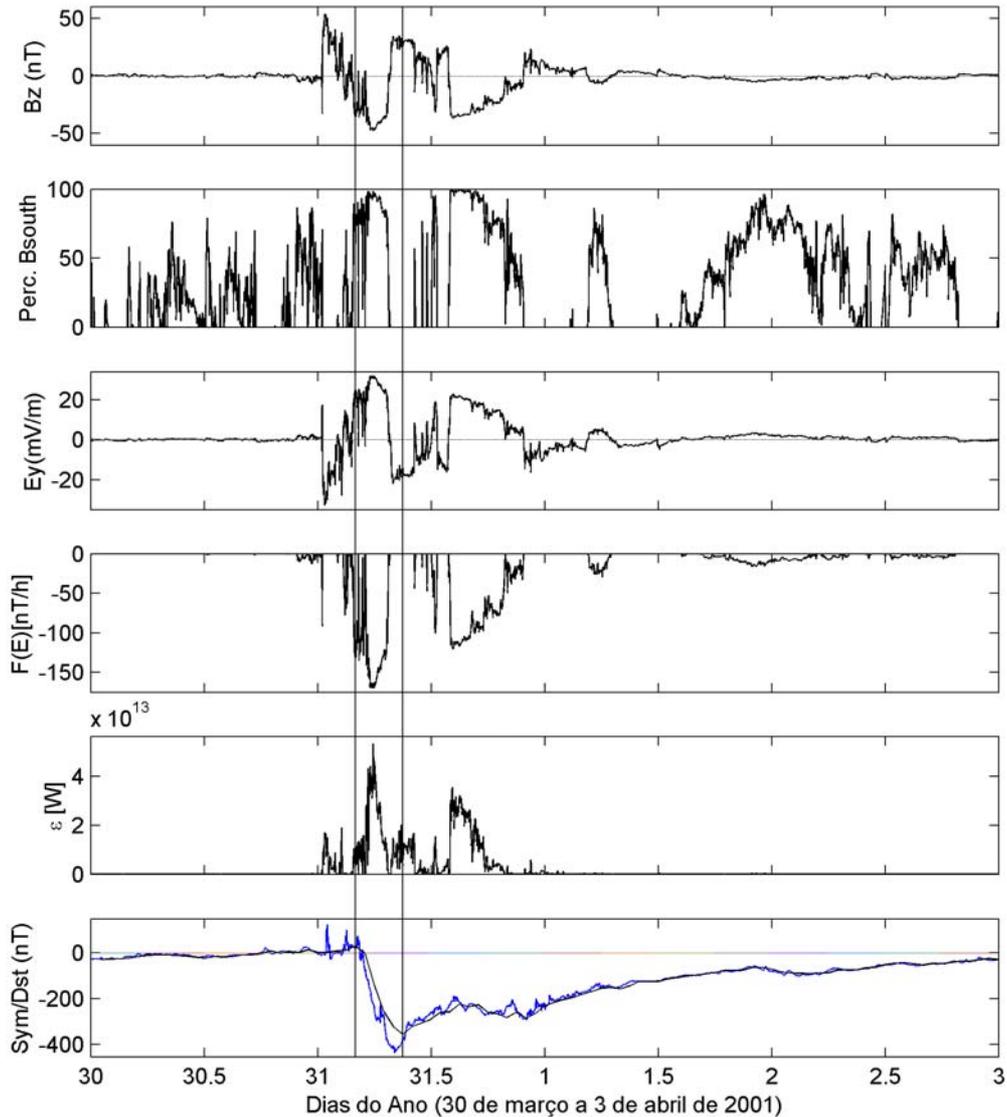


FIGURA A.20 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_s é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 31 de março de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

Os índices geomagnéticos para este evento estão representados na Figura A.21. O índice AE mudou drasticamente na intensidade durante o dia 31, alcançando altos valores no início do dia, maiores que 1000 nT poucas vezes durante as primeiras horas do dia.

Nota-se que durante a fase principal os valores de AE não foram tão significativos, mas depois das 22h UT, alcançou os valores mais representativos, em torno de 2000 nT . Mas é importante observar-se que durante as fases principais das tempestades o que pode acontecer é um deslocamento das correntes aurorais em direção ao Equador, distanciando-o das estações que medem o AE. Com isso, o AE é superestimado. Para o índice K_p , medido em estações de média-latitude, o valor máximo foi de 9 em torno das 6h UT do dia 31.

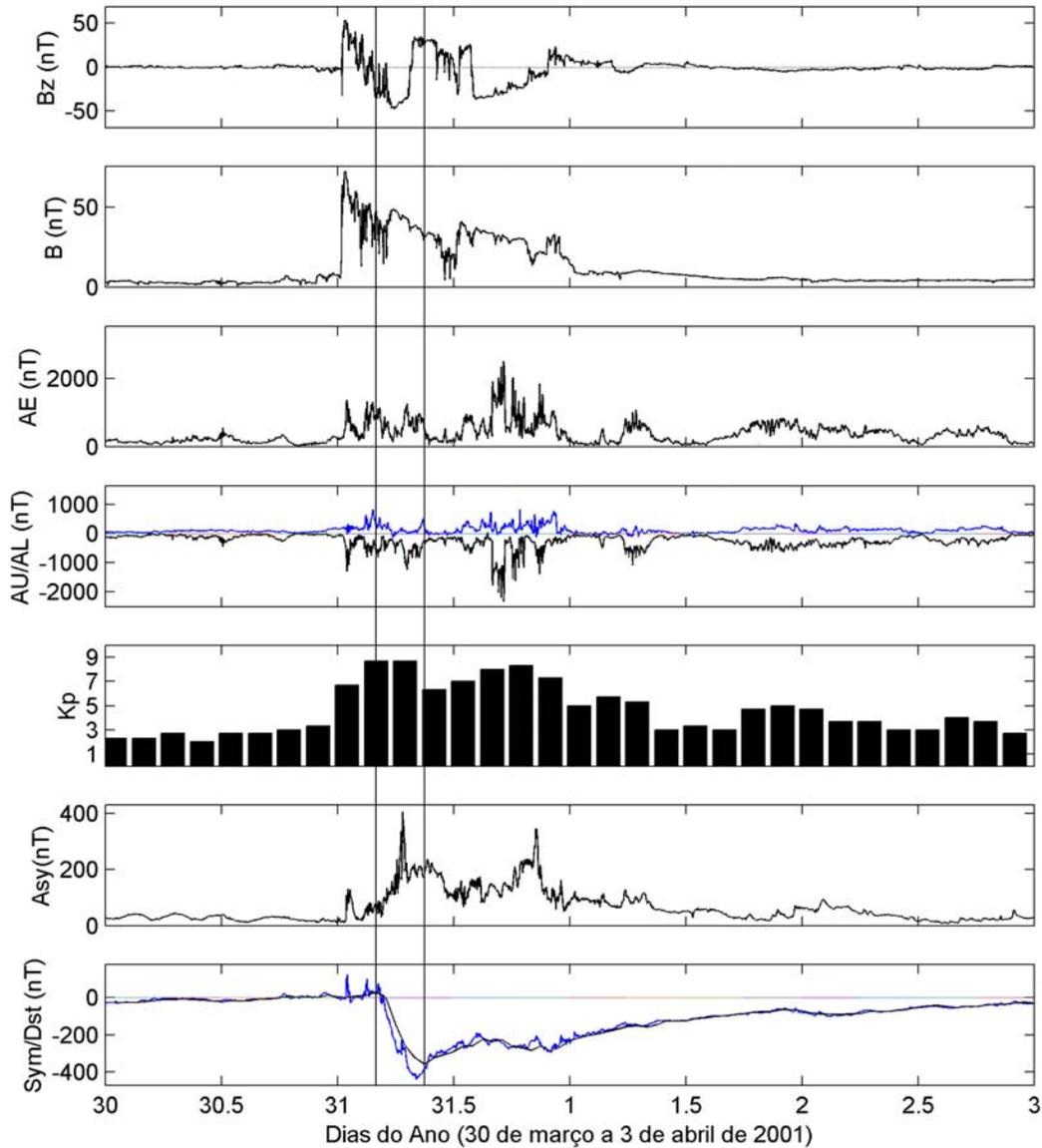


FIGURA A.21 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 31 de março de 2001. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT, além do K_p , do *Asy* e do *Sym/Dst* também dados em nT. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

A.8 Tempestade de 11 a 15 de abril de 2001

Às 13h14min e às 15h28min UT do dia 11 de abril dois choques foram detectados pelos instrumentos a bordo do satélite ACE. Dois dias depois, um novo choque foi observado às 7h06min UT, causando um abrupto aumento na temperatura e na velocidade dos prótons. A densidade não apresentou uma variação considerável neste instante, nem mesmo a magnitude do IMF. Segundo as observações feitas pelo monitor de prótons CELIAS/MTOF a bordo da espaçonave SOHO, houve uma explosão solar do tipo M8/2B que surgiu da RA 9415 localizada em 21° Sul e 4° Oeste, no dia 9 de abril, às 15h34min UT. Associada à explosão, LASCO observou uma CME “halo” a partir das 16h UT. O tempo que a estrutura associada a esta explosão demorou a atingir os instrumentos do ACE foi de 45 horas e meia. Para o segundo choque, a provável origem solar foi a mesma região ativa, com uma explosão do tipo X2/3B na latitude heliográfica de 23° Sul e 9° Oeste, às 5h26min UT do dia 10. Associada a esta explosão, LASCO observou uma CME do tipo “halo” a partir das 5h30min UT. O tempo necessário para que o choque fosse detectado foi de 34 horas. A última explosão para o período proveniente da mesma região ativa foi do tipo M2.3/1F, à latitude de 22° Sul e 27° Oeste no dia 11 de abril às 13h26min UT. A esta explosão, uma CME “halo” estava associada, segundo as observações de LASCO. A viagem até os sensores do ACE foi de aproximadamente 42 horas, causando o terceiro e último choque para o período.

O que se observa pela Figura A.22 é que, no período do dia 12 até meados do dia 13, o beta de plasma foi baixo, e que neste período, também a temperatura de prótons era baixa. Além disso, há uma rotação suave do campo B_z , devido a uma nuvem magnética, confirmada pelo catálogo de Lepping e por *Cane e Richardson* (2003), que começou às 22h do dia 11 e terminou às 7h UT do dia 13. Pode-se observar a rotação lenta de B_z dentro da estrutura. SWEPAM e MAG detectaram um choque neste mesmo dia, e devido a este choque que podem ter ocorrido estas flutuações no campo B_z .

A estrutura não é conhecida, mas provavelmente tenha sido devido a um feixe rápido. Logo após, uma outra ICME, detectada pelo ACE às 9h do dia 13 e terminando às 12h do dia posterior, interagiu com a primeira, intensificando o componente B_S anterior, e dando origem a uma estrutura interplanetária complexa. Isso fez com que se observasse uma incursão suave, e às vezes oscilante, de B_z para a direção sul, provavelmente devido ao campo da bainha formado atrás do choque da estrutura complexa. O campo

B_z alcançou um pico negativo de $-36,63 \text{ nT}$; e durante 4 horas ficou abaixo dos -10 nT – por mais de uma hora permaneceu abaixo de -20 nT .

Como a velocidade depois do primeiro choque ficou em volta dos 750 km/s , o campo elétrico foi intensificado, permanecendo, durante a fase principal, com valores acima de 15 mV/m , mas oscilando intensamente neste período. Com tais características, a taxa de injeção de energia na magnetosfera variou na mesma intensidade, alcançou um valor máximo de $2,91 \times 10^{13} \text{ W}$. Para o intervalo de maior injeção, obteve-se um valor de energia de $1,11 \times 10^{17} \text{ J}$, que foi dissipada nas regiões internas da magnetosfera, inclusive na corrente de anel, aproximadamente, $4,96 \times 10^{16} \text{ J}$. Tais funções de energia podem ser visualizadas a partir da Figura A.23.

O K_p durante a tempestade alcançou 8 e permaneceu alto (>5) por muitas horas. A Figura A.24 mostra o índice AE, que apresentou grandes elevações, seguidas por decréscimos. Tais aumentos foram um indicativo de que a convecção magnetosférica cresceu nos seguintes horários: 15h, 20h e 22h para o dia 11 de abril, e 0h20min para o dia 12 – todos os horários foram tomados em UT. As elevações estavam diretamente associadas com muitas flutuações de B_z , incluindo entre estas, duas claras incursões do componente que levaram a um grande e duradouro K_p e a grandes e negativos valores de Dst .

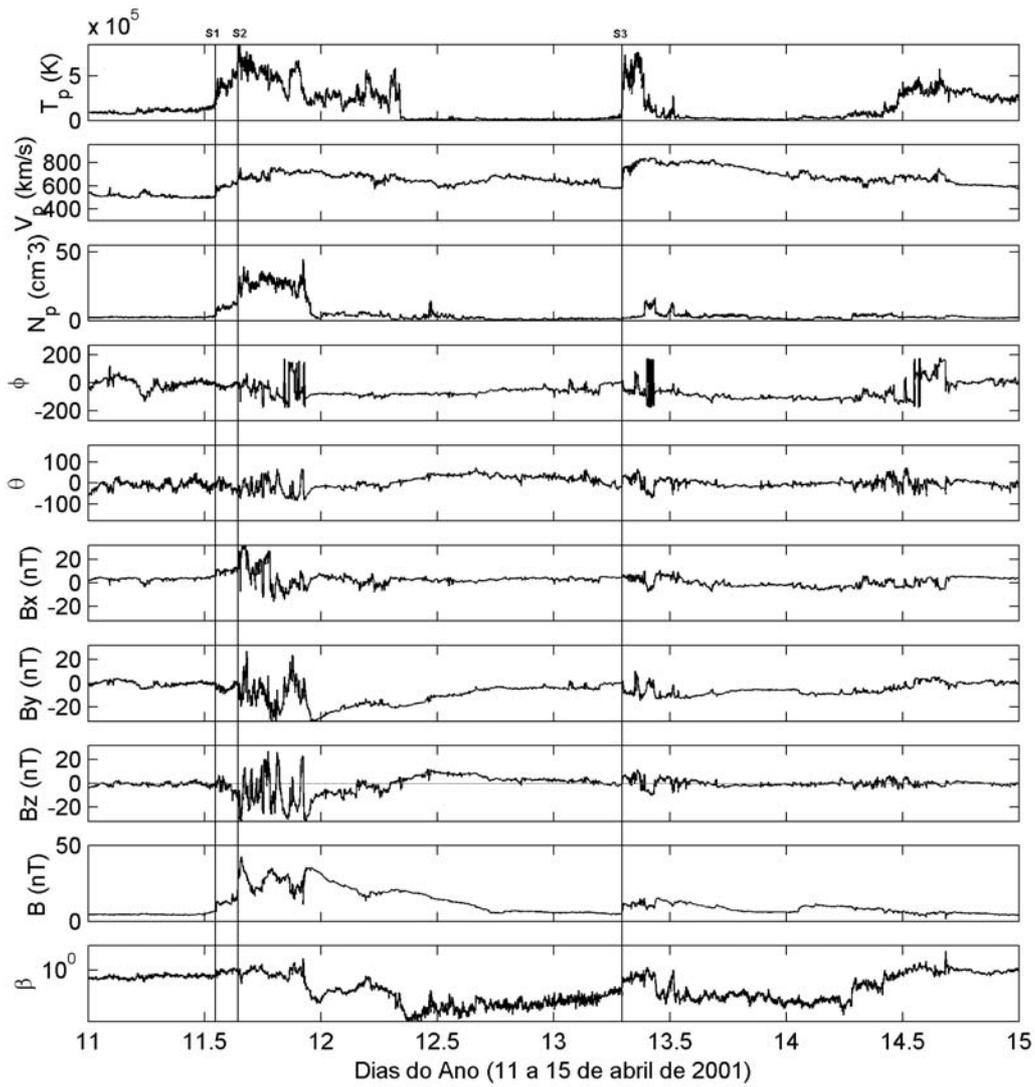


FIGURA A.22 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 12 de abril de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas na vertical identificam os choques S1, S2 e S3 ocorridos durante o evento.

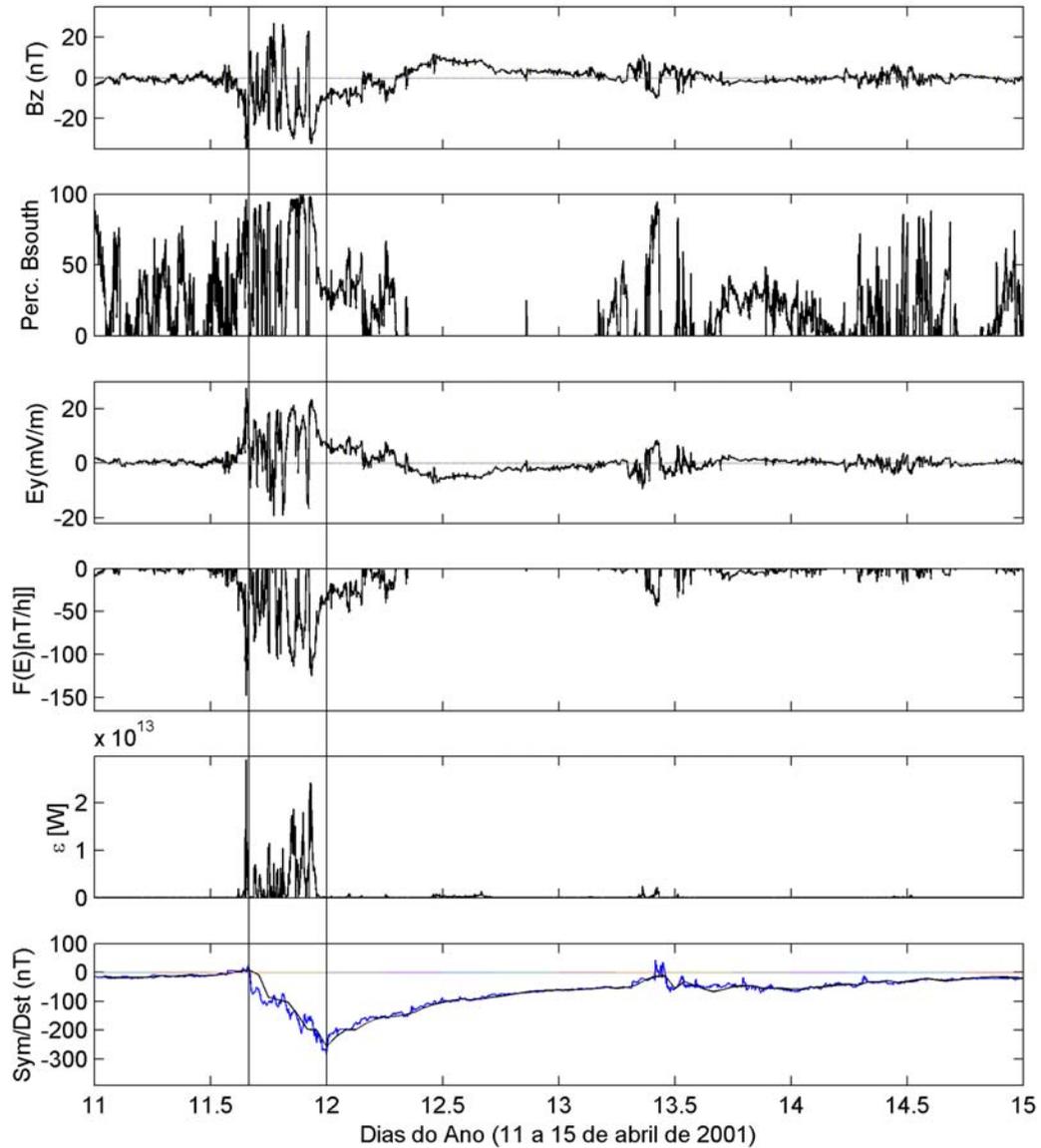


FIGURA A.23 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 12 de abril de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

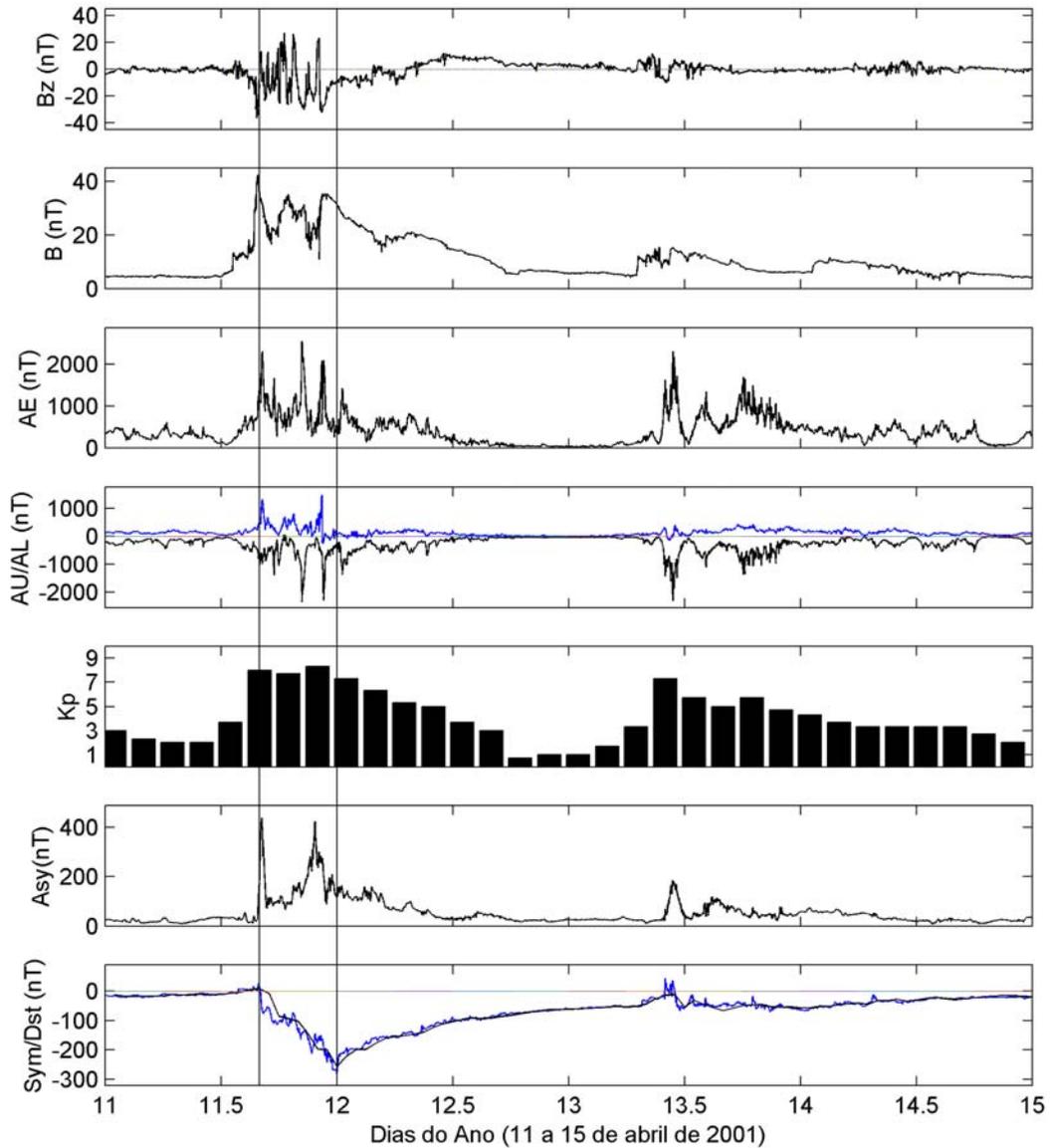


FIGURA A.24 - Dados do campo IMF observados pelo ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a supertempestade do dia 12 de abril de 2001. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL, dados em nT, além do K_p , do *Asy* e do *Sym/Dst* também dados em nT. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

APÊNDICE B – OUTROS EVENTOS DE TEMPESTADE MAGNÉTICA INTENSA

Abaixo seguem as principais características das tempestades selecionadas no grupo de tempestades magnéticas intensas do Capítulo 4.

B.1 Evento de 2 a 8 de maio de 1998

A atividade dos dias 29 de abril e 1 de maio de 1998 contribuiu para a primeira injeção de energia na corrente de anel, identificada através do Dst, que assumiu um mínimo de -100 nT. No dia 29 de abril, uma CME/nuvem magnética foi observada às 16h58min UT, expandindo-se radialmente a 360°. Associadas a CME, explosões foram observadas pelo satélite GOES às 16h15min UT com intensidade M7 em raios-X e 3B em H-alpha, provavelmente com origem da região ativa localizada nas latitudes de 16° Sul e 22° Leste. A propagação desta estrutura levou a um choque interplanetário detectado às 21h56min UT do dia 1 de maio.

A segunda injeção de energia, que levou a uma deflexão de mínimo em -205 nT, foi causada por uma CME do tipo halo observada às 14h06min do dia 2 de maio por LASCO. No ponto L1, foi detectada às 10h UT do dia 4 de maio e terminou ao início do dia 8 de maio (*Cane e Richardson, 2003*). A explosão associada a esta CME, que foi observada pelo satélite GOES, ocorreu às 13h31min com intensidade X1 em raios-X e 3B em *H-alpha*, e teve origem na região ativa localizada a 15° Sul e 15° Oeste (http://data.engin.umich.edu/intl_space_weather/sramp/SHINE_GEM_CEDAR.html). O choque causado pela propagação da estrutura foi identificado às 2h15min do dia 4 de maio, conforme se observa na Figura B.1.

A velocidade do vento solar às 2h30 min UT do dia 4 de maio aumentou, e o campo magnético cresceu até aproximadamente 40 nT, com um forte componente sul, permanecendo nesta direção até 5h UT do mesmo dia. O mais intenso período de atividade ocorreu durante o dia 4 de maio, onde o componente-sul do IMF alcançou valores em torno de -30 nT por um período de mais de 4 horas e a velocidade do vento solar apresentou um aumento de até 200 km/s. No dia 5, houve um período maior de B_S no início do dia, mas no restante do tempo, ele permaneceu pequeno e positivo (*Pulkkinen et al., 2002*). A causa para esta tempestade foi o B_S do choque.

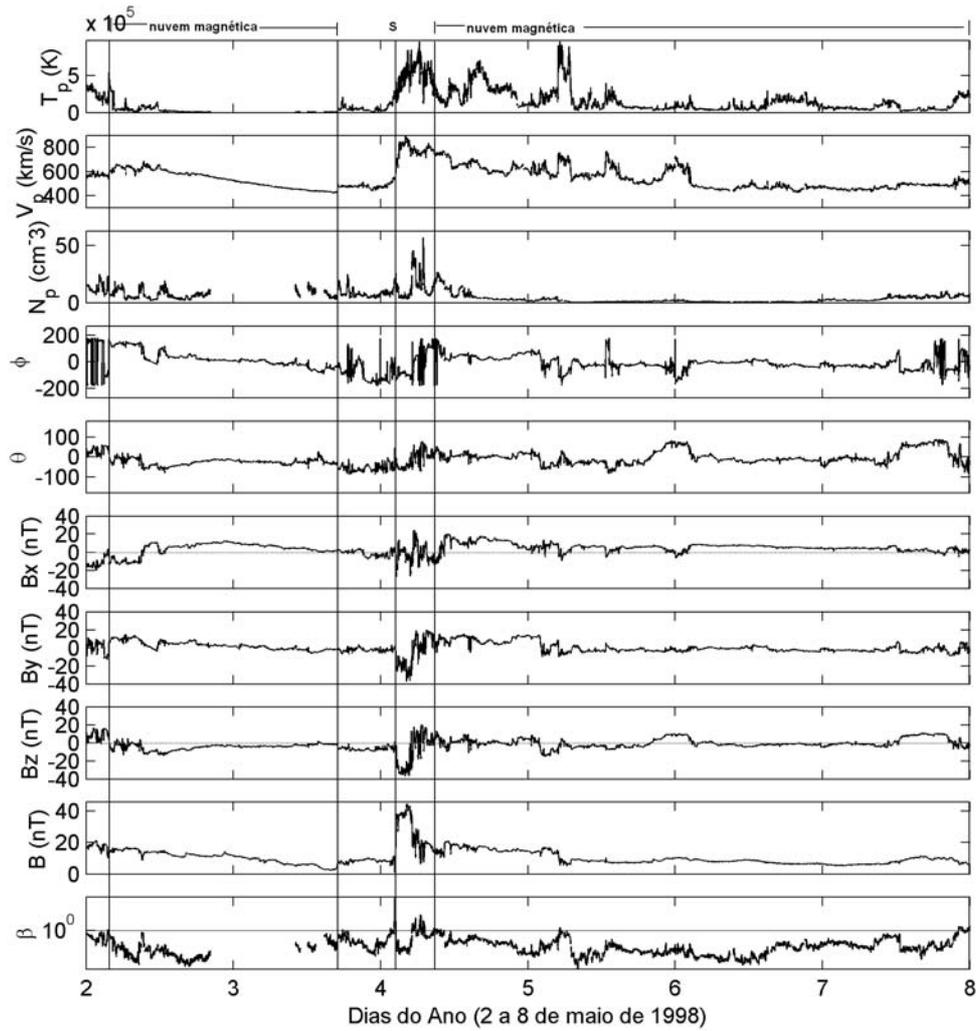


FIGURA B.1 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 4 de maio de 1998. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os dois choques ocorridos neste período.

Conforme se observa na Figura B.2, a taxa de injeção de energia durante a fase principal teve um pico em $2,68 \times 10^{13} W$. A integração desta taxa de energia durante a fase principal, ou seja, durante o período de maiores valores para o parâmetro de acoplamento, ε , resultou em uma energia total de $8,39 \times 10^{16} J$ sendo que boa parte desta quantia foi direcionada para a corrente de anel, ou seja, $4,2 \times 10^{16} J$. No painel 3

da Figura B.2, pode-se perceber que o campo elétrico interplanetário permaneceu, dentro da fase principal, por mais de 2 horas com valores superiores a 15 mV/m , durante a fase principal da tempestade, decorrente da declinação do IMF- B_z para valores negativos. A taxa de injeção de energia para a corrente de anel teve um máximo em torno de -164 nT/h .

Na Figura B.3, a representação do AE mostra que este índice permaneceu intenso durante todo o período avaliado. Durante a primeira e a segunda injeções, os valores alcançados como máximos foram próximos de 2000 nT , e, no restante, oscilaram entre valores intensos - bem menores do que os valores de pico - e valores baixos. Neste mesmo período, o índice K_p apresentou valores intensos entre 5 e 9, sendo que, durante a fase principal da tempestade, variou de 6 a 9. No restante do tempo, já durante a fase de recuperação, diminuiu de intensidade. Quanto à corrente assimétrica, medida pelo A_{sy} , pode-se perceber uma grande resposta durante a principal injeção na corrente de anel, em torno de 400 nT , permanecendo por um período considerável de tempo com intensidade acima de 200 nT .

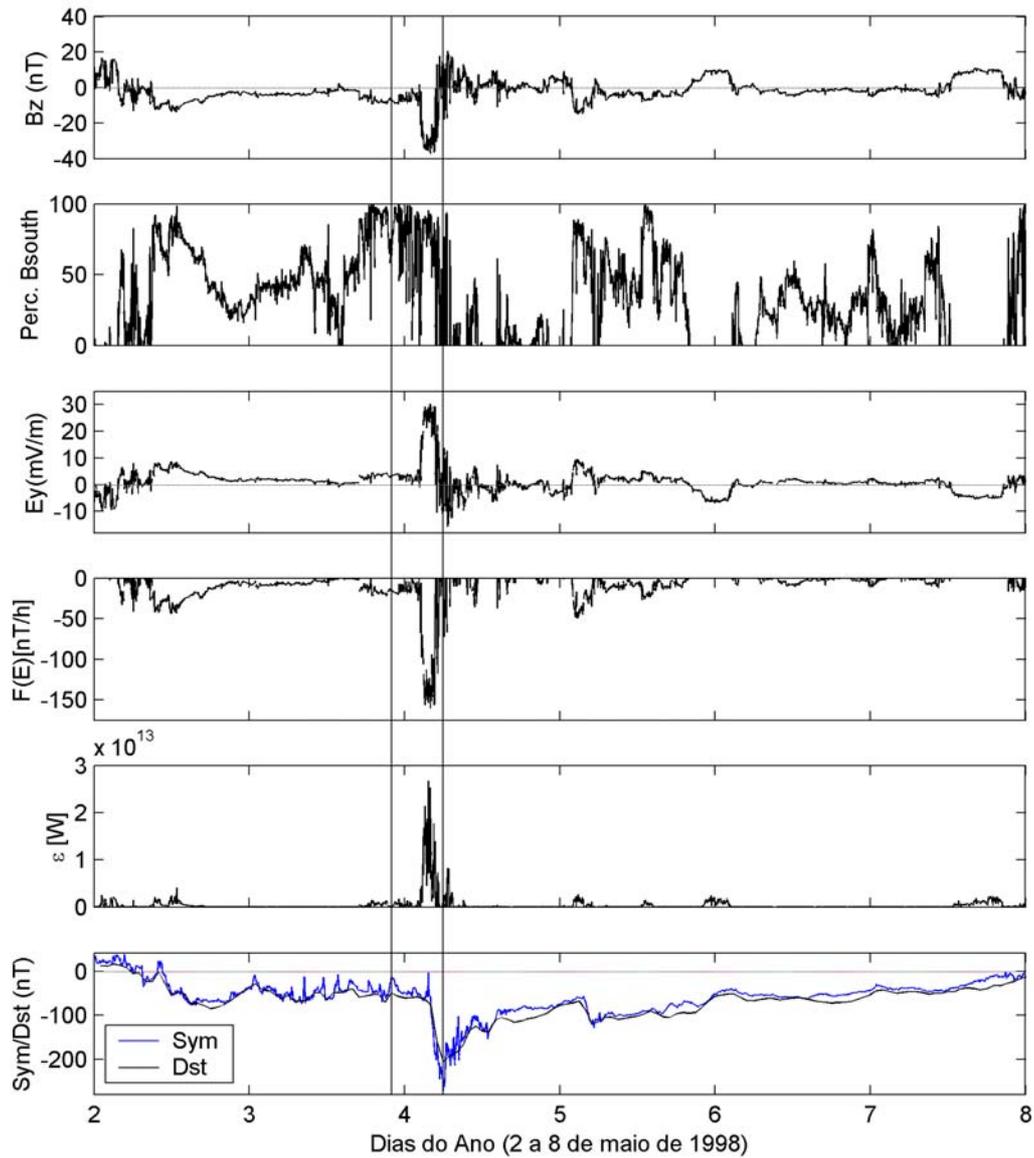


FIGURA B.2 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 4 de maio de 1998. Como resposta à injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

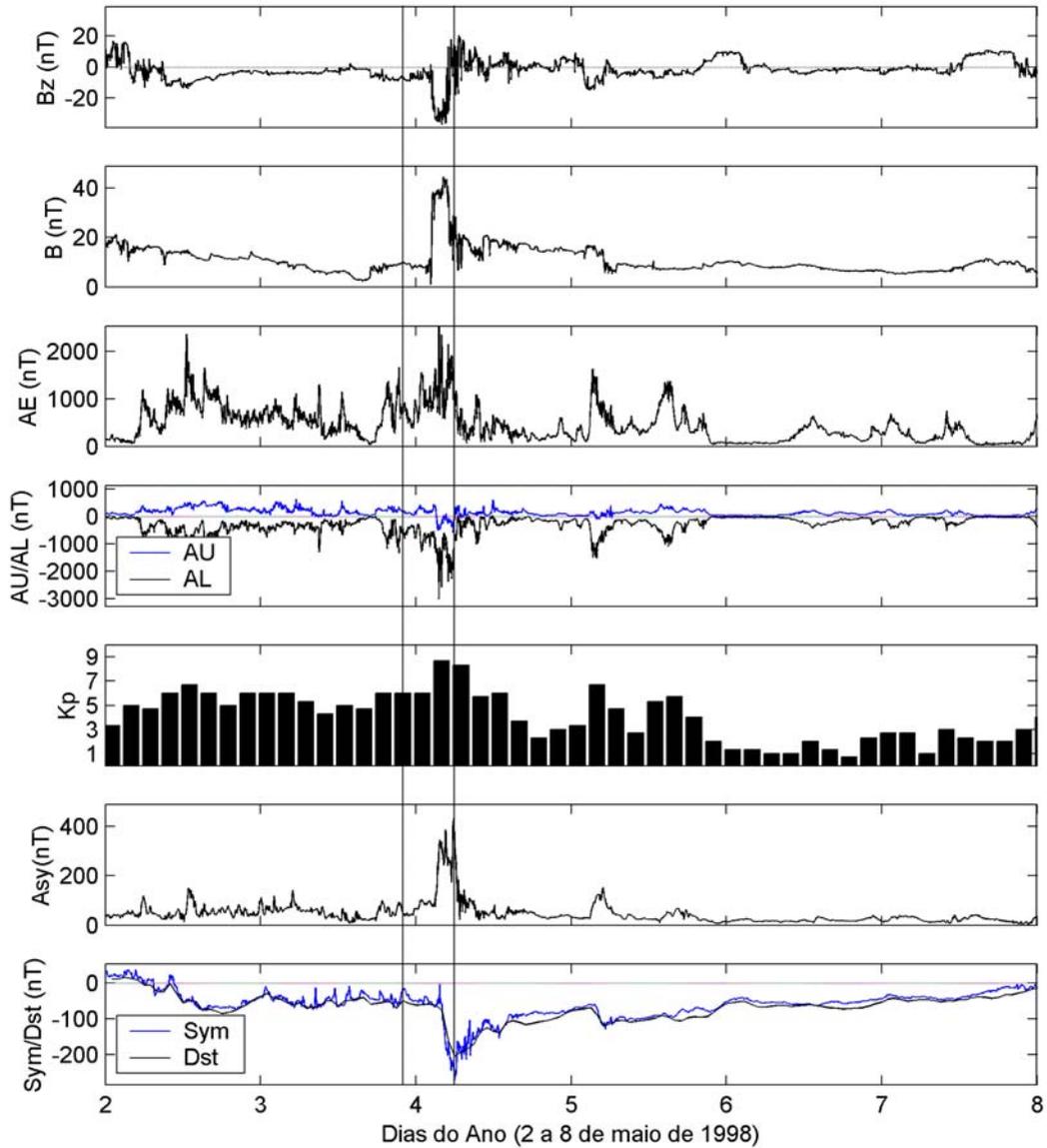


FIGURA B.3 - Dados do campo IMF obtidos através do satélite ACE e dados geomagnéticos para a tempestade do dia 4 de maio de 1998. De cima para baixo, observam-se o componente Bz do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o Kp, o Asy e o Sym/Dst, dados em nT. O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais. Os índices AU, AL, AE, Asy e Sym são obtidos através do WDC-Kyoto, enquanto que o Dst e o Kp, do SPIDR.

B.2 Evento de 4 a 11 de agosto de 1998

A Figura B.4 identifica os dois choques frontais neste período: o primeiro ocorreu às 6h44min do dia 6 de agosto e o segundo aproximadamente aos 15min UT do dia 10 do mesmo mês. No primeiro, a velocidade cresceu até valores em torno de 450 km/s, a densidade, até aproximadamente 40 cm^{-3} e a intensidade do IMF chegou a 20 nT. Para o último choque, o número de Mach calculado foi de 3,2. A causa deste evento foi uma região de bainha que se formou atrás do primeiro choque, como é mostrado na Figura B.4. Além de uma ICME observada para este período, uma estrutura de CIR foi identificada no dia 7 de agosto às 23 h UT.

A este evento estava associada uma explosão em raios-X do tipo C1.2, observada pelo satélite GOES no dia 5 de agosto, às 16h5min UT, segundo o método empírico de *Dal Lago et al.* (2004a). Nas observações do coronógrafo a bordo da espaçonave SOHO para esse período apareceram falhas, segundo *Cane e Richardson* (2003).

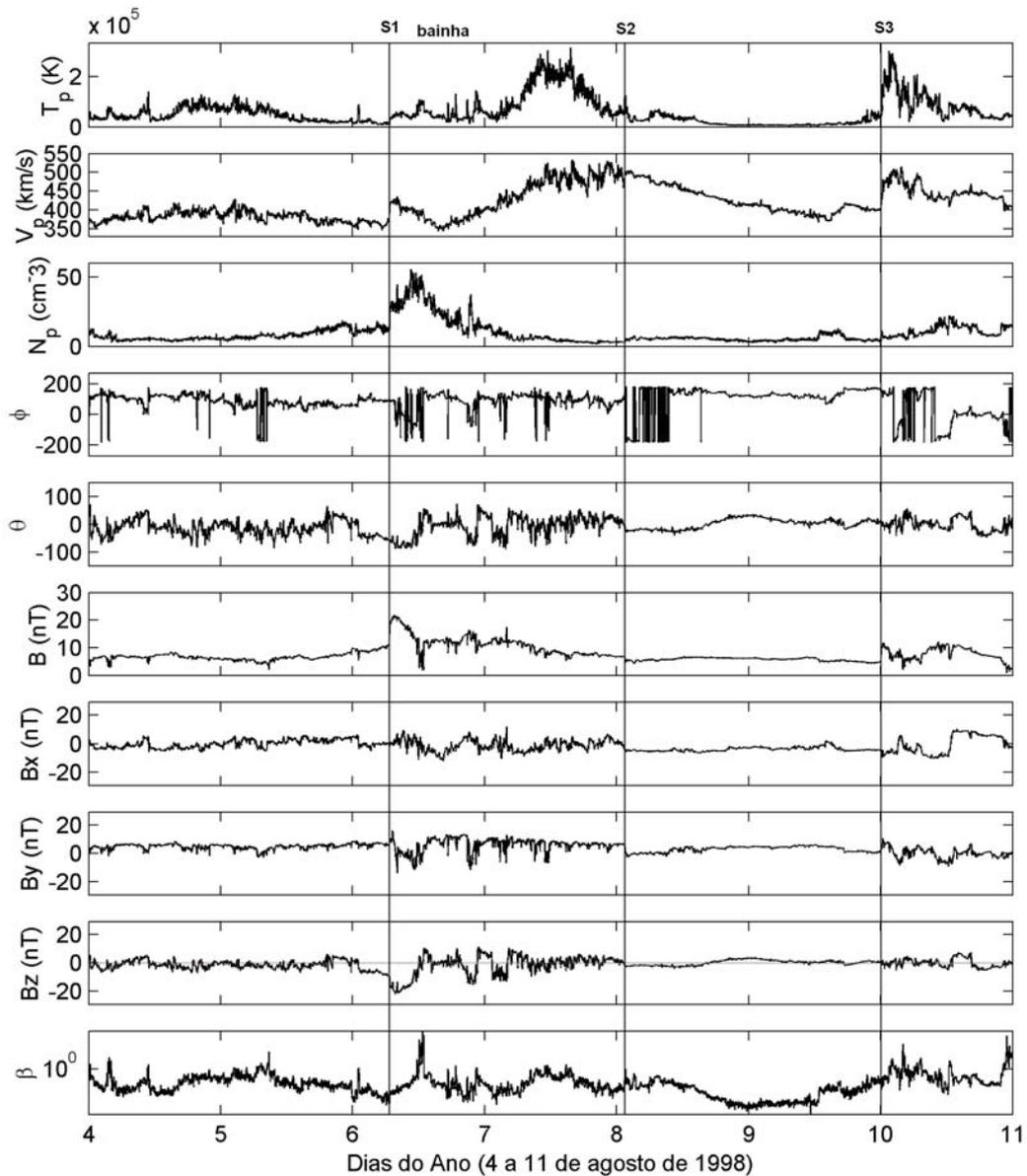


FIGURA B.4 - Parâmetros do plasma do vento solar medidos pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 6 de agosto de 1998. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam os três choques ocorridos neste período.

O campo já era sul quando o primeiro choque foi detectado, e a intensificação veio logo em seguida, fazendo com que o componente sul do IMF permanecesse com valores inferiores a -10 nT, por um período superior a 5 horas. Na Figura B.4, pode-se ver que o

campo elétrico interplanetário, E_y permaneceu muito oscilante durante todo o período da tempestade, mas, especialmente na fase principal, estendeu-se por mais de 4 horas excedendo os 5 mV/m . Em resposta aos altos valores do campo elétrico e do IMF- B_z , observados na Figura B.5, a taxa de energia que foi dissipada na região da corrente de anel atingiu um máximo de -47 nT/h , e, durante a fase principal da tempestade, resultou em uma injeção de energia de valor $2,33 \times 10^{16} \text{ J}$. Esta energia representa uma quantidade bem representativa da total que foi injetada na magnetosfera devido ao processo de reconexão no lado diurno. Tal energia contabilizou $8,11 \times 10^{16} \text{ J}$. O epsilon de Akasofu máximo observado para o período foi de $8,63 \times 10^{12} \text{ W}$.

Em termos da resposta magnetosférica, vista na Figura B.6, a estrutura levou a uma deflexão no componente- H do campo geomagnético com um pico de -138 nT . Antes desta deflexão, percebe-se que o Dst respondeu à primeira incursão de B_z para valores negativos, devido à região da bainha que se formou atrás do choque, e voltou a crescer de forma não-significativa, mas, com a intensificação de B_S , levou ao mínimo Dst observado para a tempestade estudada. Na região auroral, o K_p , por exemplo, variou entre 3 e 7, durante a fase principal, mas, após esta fase, permaneceu na maior parte do tempo com valores baixos (em torno de 3). Quanto ao eletrojato auroral AE, para esta tempestade, observa-se um comportamento oscilante dentro da fase principal, com um valor médio de $\sim 492 \text{ nT}$. Na fase de recuperação, o AE alcançou alguns picos mostrando que ainda havia atividade na região auroral, que perdurou mesmo até o fim da última etapa da tempestade.

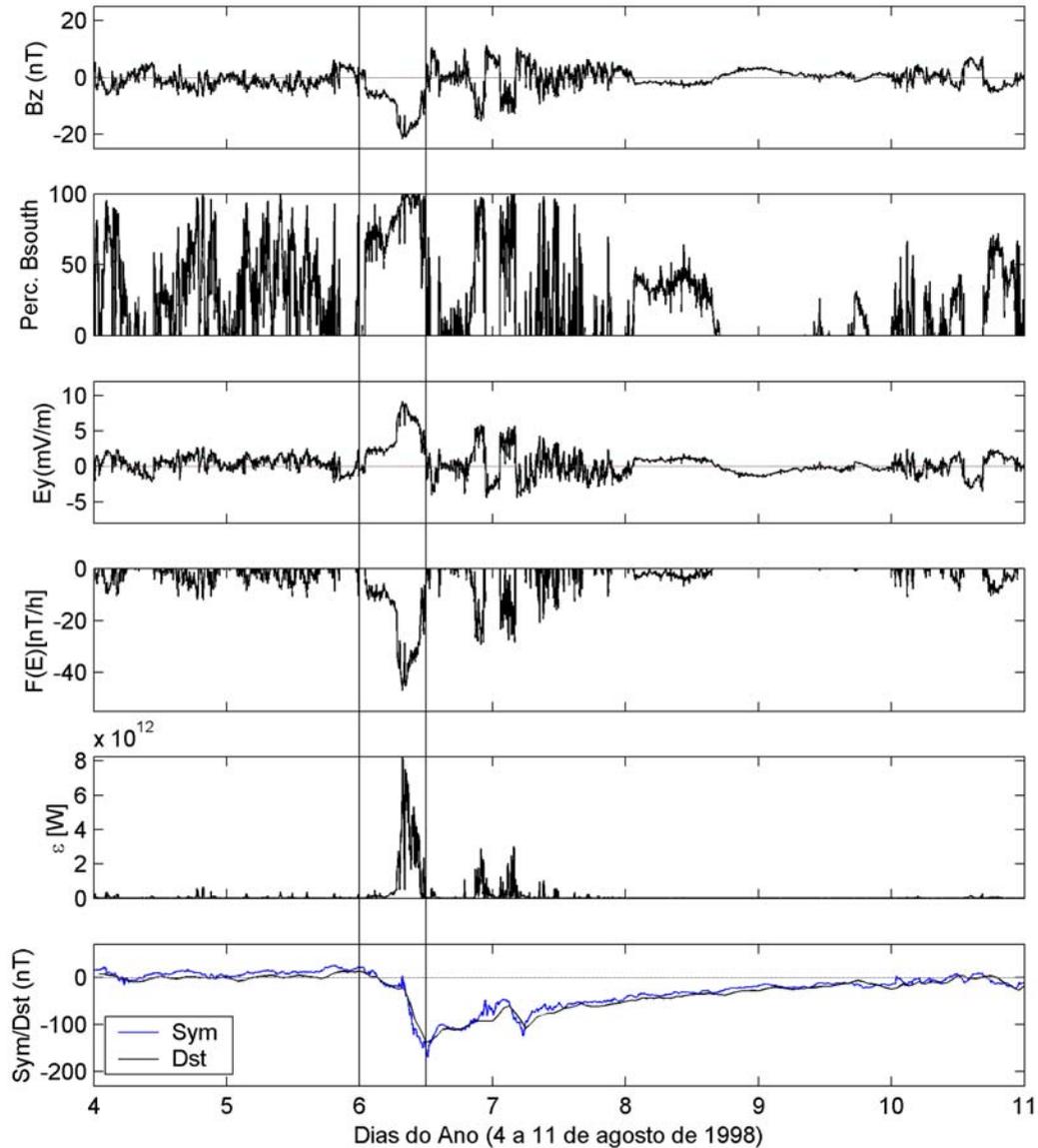


FIGURA B.5 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 6 de agosto de 1998. Como resposta da injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

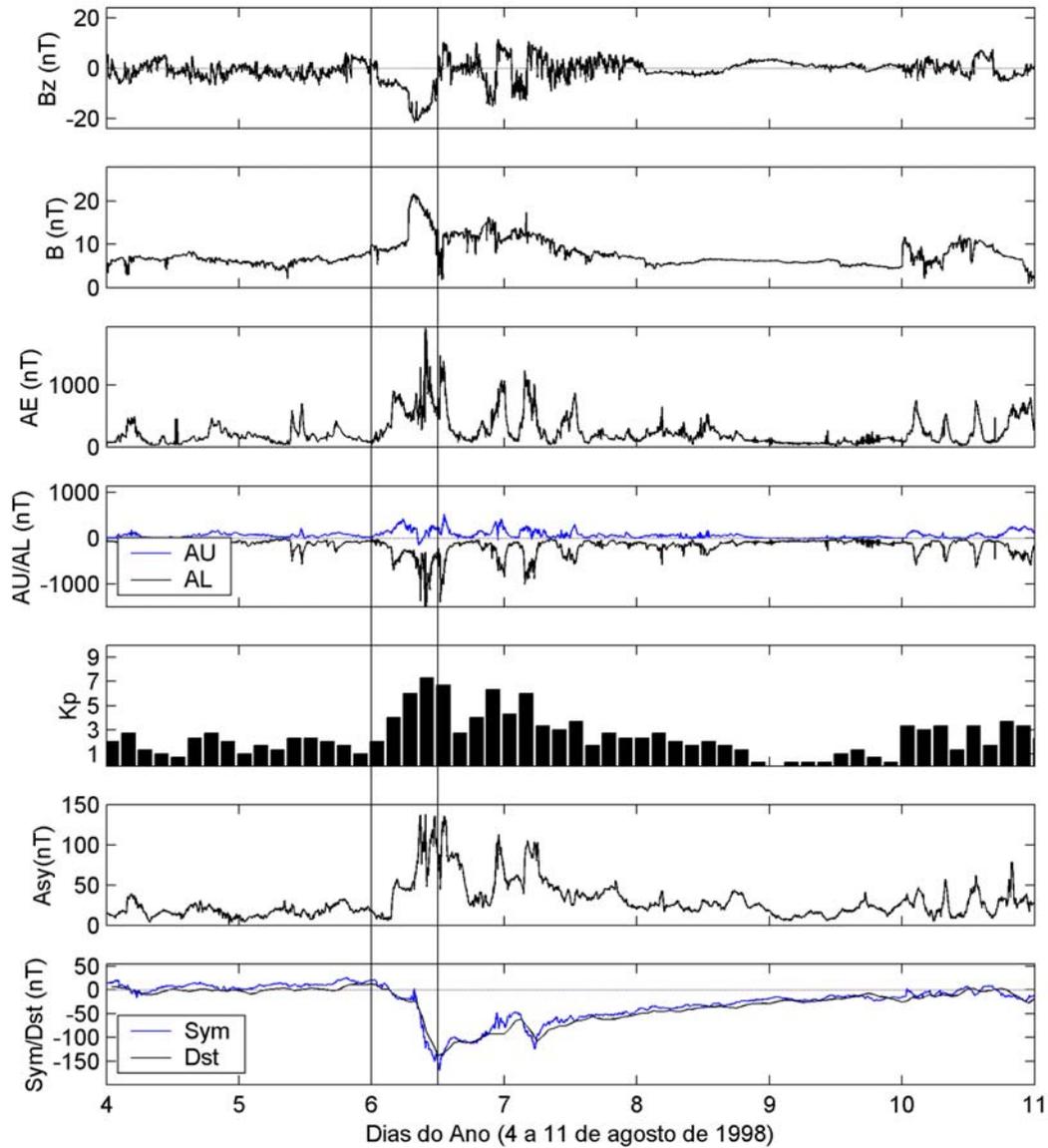


FIGURA B.6 - Dados do campo IMF do satélite ACE e dados geomagnéticos para a tempestade do dia 6 de agosto de 1998, obtidos do SPIDR (Dst e K_p) e do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Asy e Sym). De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o Asy e o Sym/Dst , dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

B.3 Evento de 15 a 20 de abril de 1999

A Figura B.7 identifica a estrutura de nuvem magnética com orientação sul-norte, ocorrida às 18h UT do dia 17, com duração até 19h UT do dia seguinte. A nuvem guiou no meio interplanetário um choque, detectado a ~ 1 UA, às 10h30min UT do dia 16 de abril de 1999, com um número de Mach de aproximadamente 2,5. Este evento ($Dst_p = -91$ nT) é classificado como uma tempestade magnética moderada ($-100 < Dst < -50$ nT), mas, como seu valor é aproximado aos valores das tempestades intensas, consideramos esta tempestade dentro da classificação feita.

Pode-se observar a temperatura baixa dos prótons dentro da estrutura, assim como a queda da densidade. A velocidade sofre um aumento, mas, à medida que a estrutura se propaga, vai diminuindo em intensidade. O que se observa também é um beta de plasma baixo entre as interfaces da nuvem, além de uma lenta e forte rotação do campo magnético B_z .

A Figura B.8 mostra que a lenta rotação do campo magnético B_z dentro da nuvem fez com que, durante a fase principal da tempestade, o campo sul dominasse. O componente B_S do IMF permaneceu com valores inferiores a -10 nT durante 4 horas, e seu valor de pico foi de -14 nT, já o componente-y do campo elétrico, durante 3 horas, permaneceu com valores acima de 5 mV/m. As funções de injeção de energia na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e ε , respectivamente, aparecem juntamente com a resposta da corrente de anel, medida através dos índices Dst e Sym . Durante a fase principal, o total de energia que entrou foi de $1,22 \times 10^{16}$ J, calculada através do parâmetro epsilon, ε , sendo que, desta, $8,6 \times 10^{15}$ J foi dissipada na corrente de anel. O valor de pico observado para o epsilon de Akasofu foi de $2,47 \times 10^{12}$ W.

A origem solar deste evento foi uma CME do tipo halo com direção para a Terra e observada pela primeira vez pelo coronógrafo de LASCO C2, às 3h30min UT do dia 13 de abril de 1999. Esta CME pareceu estar relacionada à atividade de explosões observadas na superfície solar. Na região ativa localizada nas coordenadas heliográficas 20° Norte e 2° Leste, uma ejeção que conduziu uma estrutura no meio interplanetário foi observada e estimou-se, considerando-se uma velocidade constante, que a ejeção ocorreu à 1h44min UT, conforme *Balmaceda et al.* (2004).

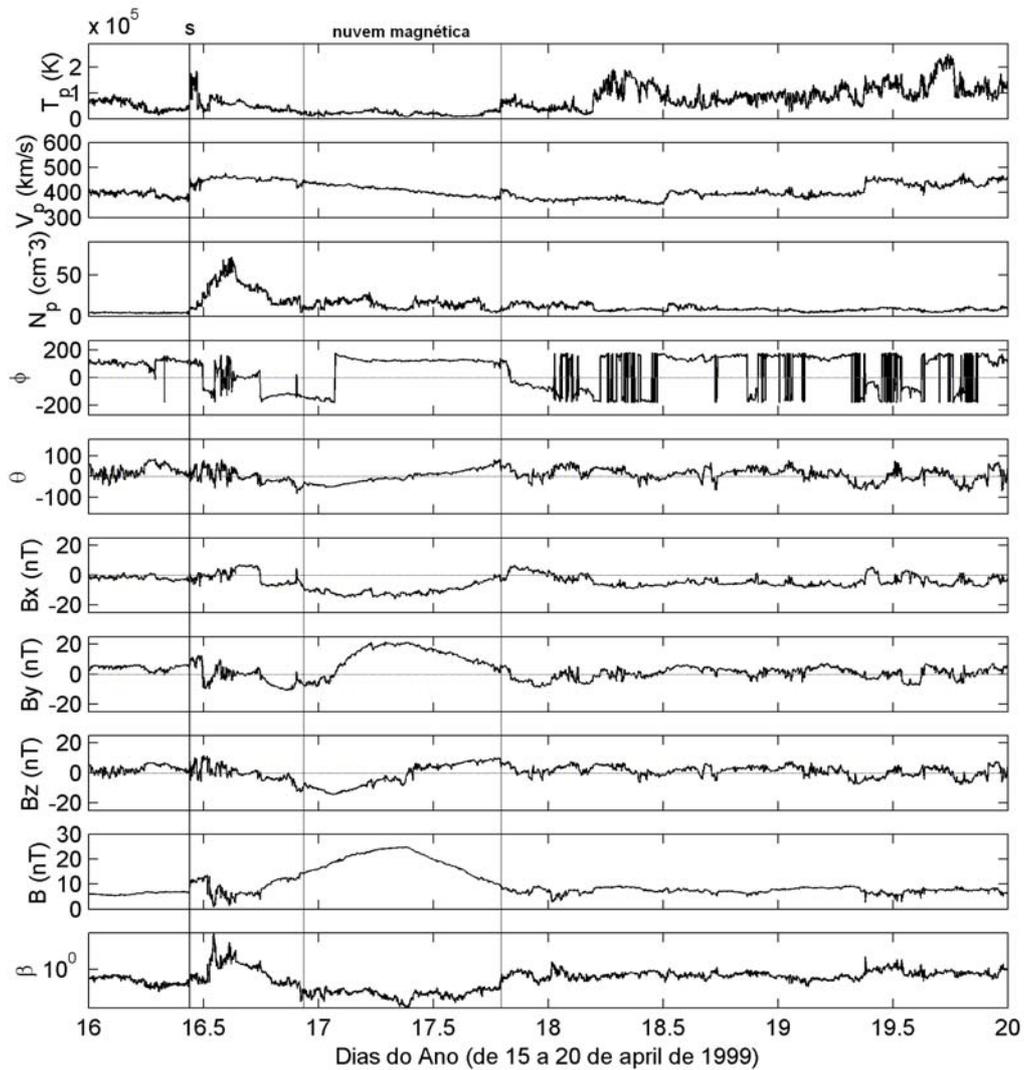


FIGURA B.7 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 17 de abril de 1999. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais localizam o choque ocorrido neste período e a estrutura que causou a tempestade.

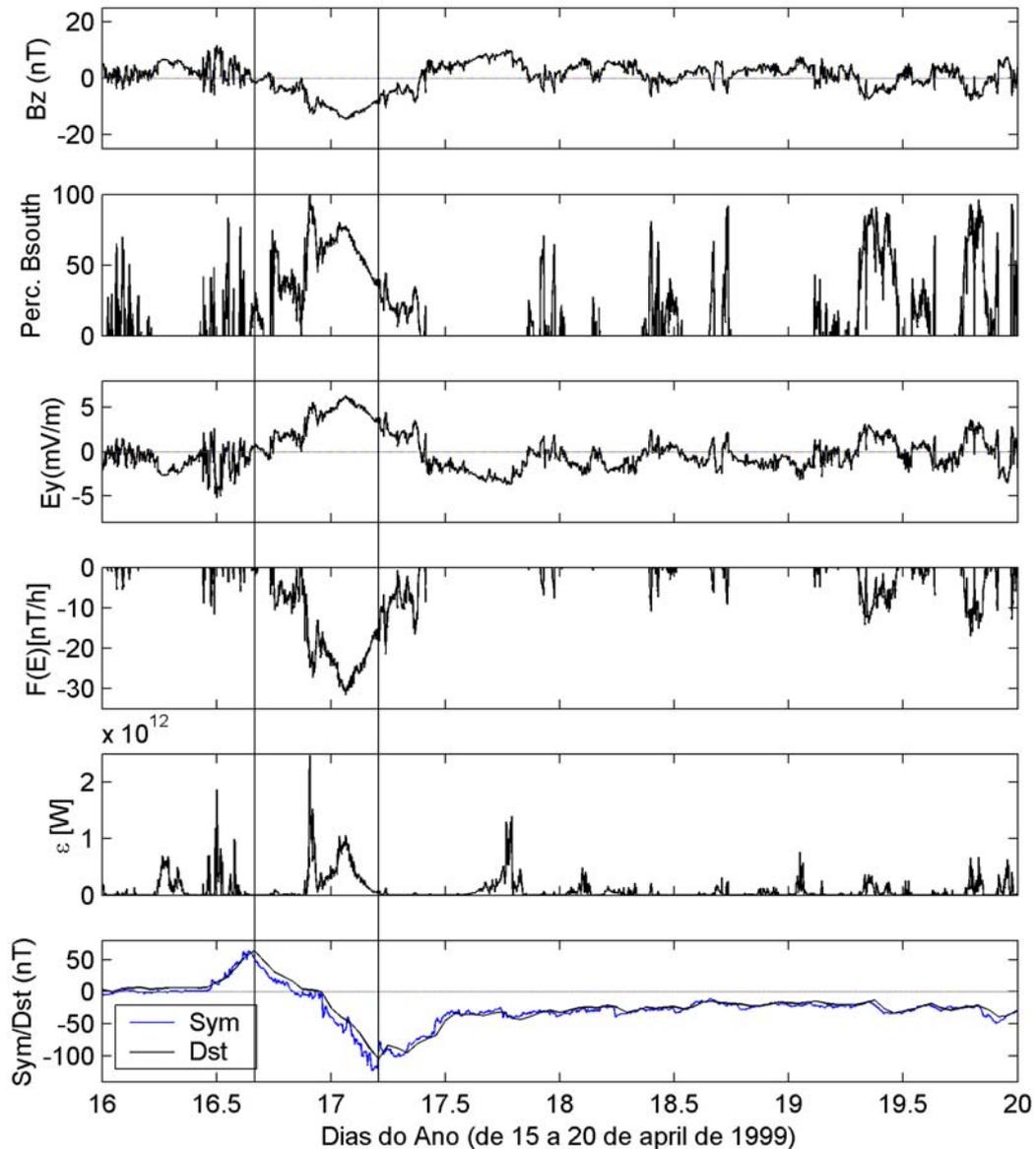


FIGURA B.8 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na sequência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 17 de abril de 1999. Como resposta à injeção na corrente de anel, os índices Dst e Sym são representados no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da supertempestade.

Em se tratando da resposta magnetosférica, o que se observou na Figura B.8 foi que o AE foi mais intenso durante a fase principal que no período que precedeu esta fase. Já na recuperação, houve outra resposta do eletrojato auroral, ainda mais intensa que a primeira. O índice K_p atingiu um máximo valor 7 e oscilou entre este máximo e 4 durante a fase principal. O A_{sy} excedeu os 100 nT no pico da tempestade, mas manteve-se com valores moderados no restante do intervalo.

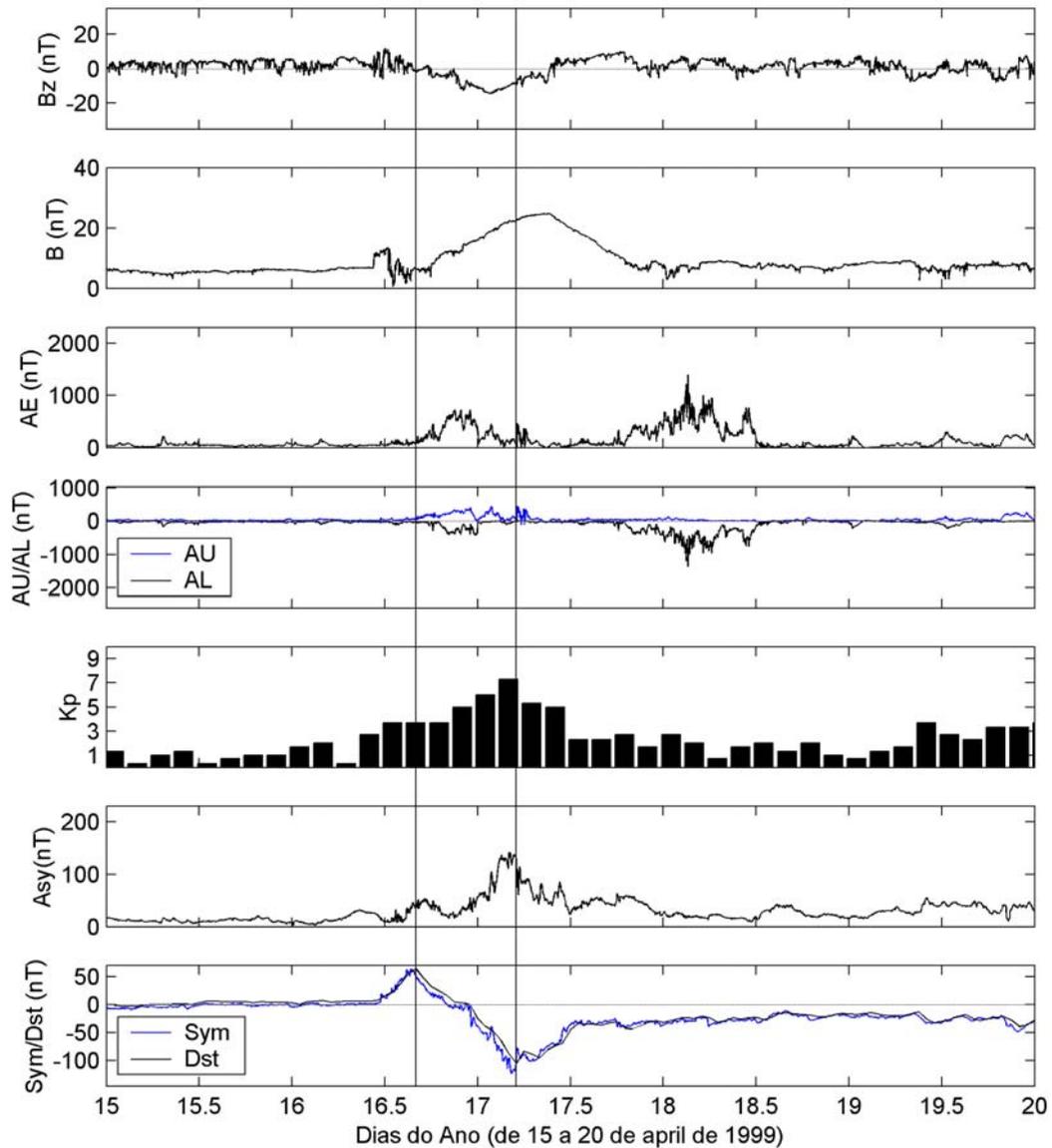


FIGURA B.9 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do SPIDR (Dst e K_p) e do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, Asy e Sym) para a tempestade do dia 17 de abril de 1999. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o Asy e o Sym/Dst , dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais. Os índices AE, AU, AL, Asy e Sym são obtidos do WDC-Kyoto, enquanto que K_p e Dst , do SPIDR.

B.4 Evento de 12 a 16 de agosto de 2000

A região RA 9114, na latitude 11° Norte e 11° Oeste, pode ter sido a causa solar da ICME observada às 16h30min UT do dia 9 de agosto, e causou um choque no dia 11 de agosto, às 18h10min UT, que teve um número de Mach de 1,7. A Figura B.10 mostra que a velocidade do vento solar ficou em torno de 700 km/s, a temperatura dos prótons caiu dentro da estrutura e a densidade dos prótons apresentou muitas variações, atingindo picos de até 30 cm^{-3} . Além disso, percebe-se a rotação lenta e intensa do IMF- B_z , característico das nuvens magnéticas, inclusive do componente B_y , além de um beta de plasma menor do que 1. O choque causado pela propagação da estrutura ocorreu ainda no dia 11 de agosto e durou aproximadamente 12 horas, sendo caracterizado pelos típicos aumentos na temperatura, densidade e velocidade dos prótons, assim como na magnitude do IMF.

Como se observa na Figura B.11, quando a maior injeção ocorreu na corrente de anel, tanto o componente sul do IMF permaneceu com valores acima de -15 nT , como o campo elétrico permaneceu acima de 10 mV/m por um intervalo de tempo superior a 6 horas. Observou-se uma taxa de injeção na corrente de anel de valor máximo em aproximadamente -97 nT/h , e um valor de pico do epsilon de $1,55 \times 10^{13} \text{ W}$. O conteúdo total da energia introduzida na magnetosfera via reconexão foi estimado ser em torno de $1,58 \times 10^{17} \text{ J}$, sendo que uma parcela desta energia, cerca de $4,79 \times 10^{16} \text{ J}$ foi direcionada para a região da corrente de anel.

Durante a fase principal e no período logo após esta fase, o AE respondeu intensamente atingindo dois picos de $\sim 2000 \text{ nT}$ (Figura B.12), sendo que, no restante do tempo, caiu bruscamente para valores muito baixos. O K_p assumiu valores entre 7 e 8 na fase principal, permanecendo por um período longo com estes valores, caindo na fase de recuperação. Em meados do dia 14, voltou a crescer (entre 4 e 5) e finalmente caiu. O A_{sy} também foi intenso durante o dia 12, com picos de 200 nT , mas, no dia 13, caiu e permaneceu com valores baixos no resto do período, como se vê na Figura B.12.

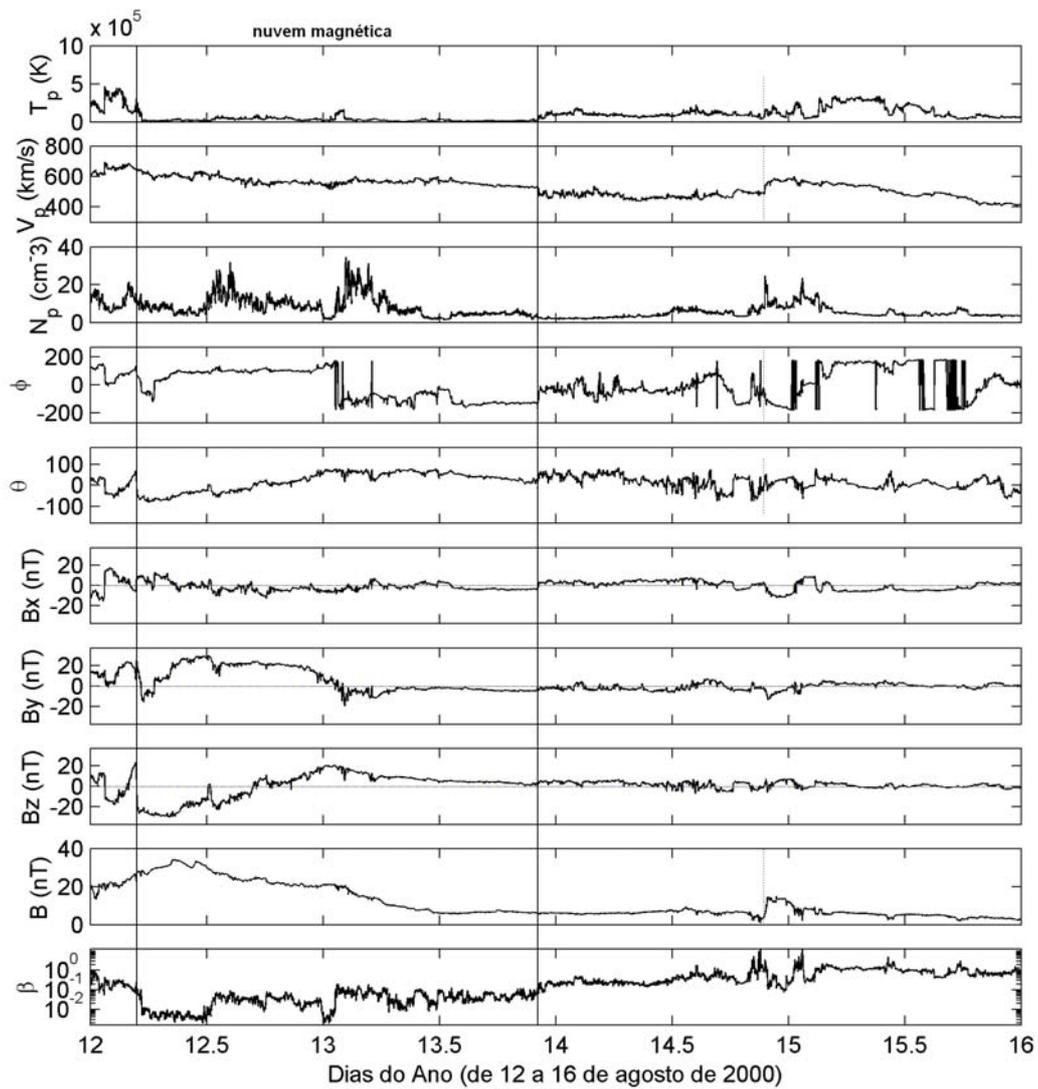


FIGURA B.10 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 12 de agosto de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

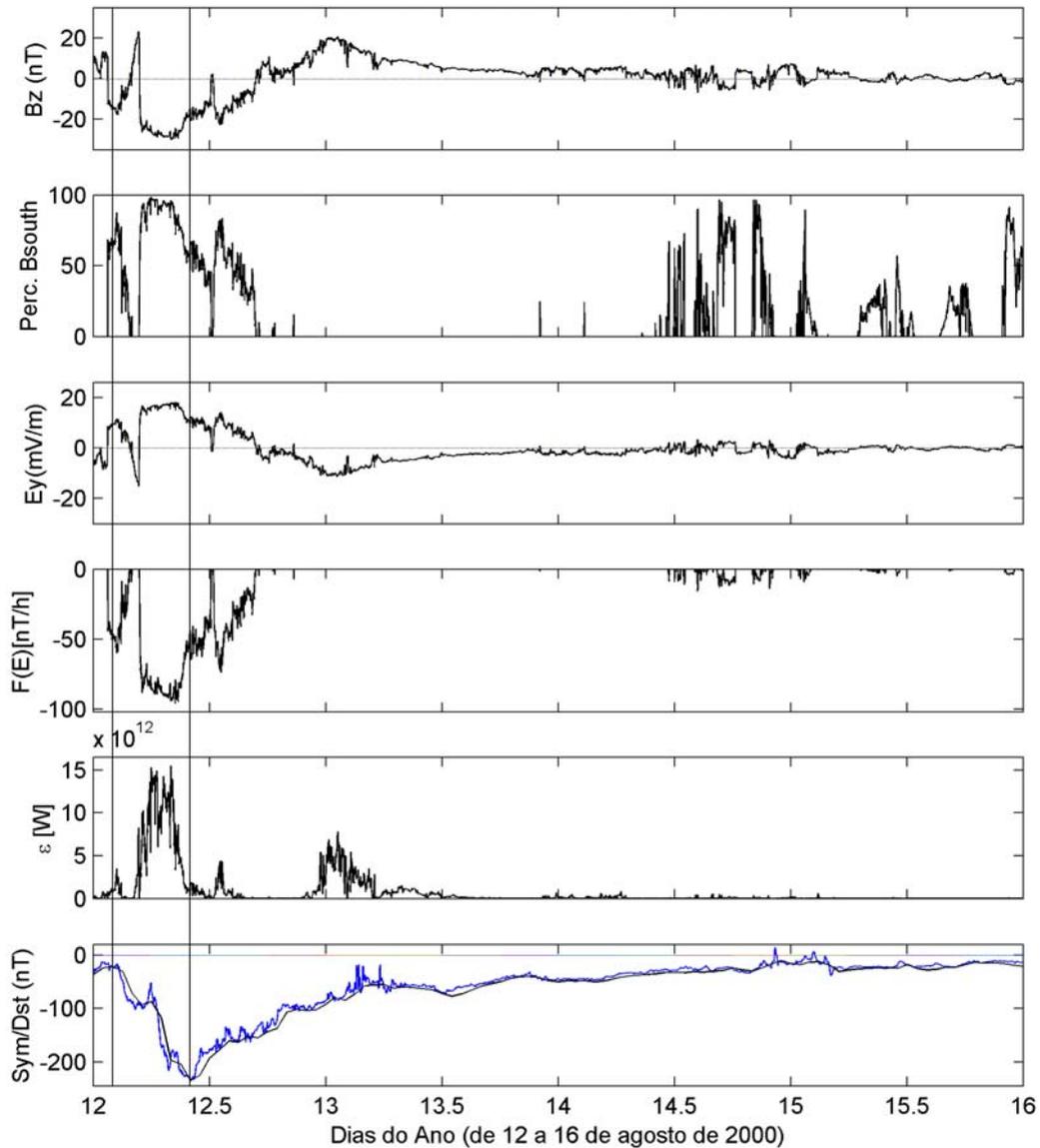


FIGURA B.11 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 12 de agosto de 2000. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

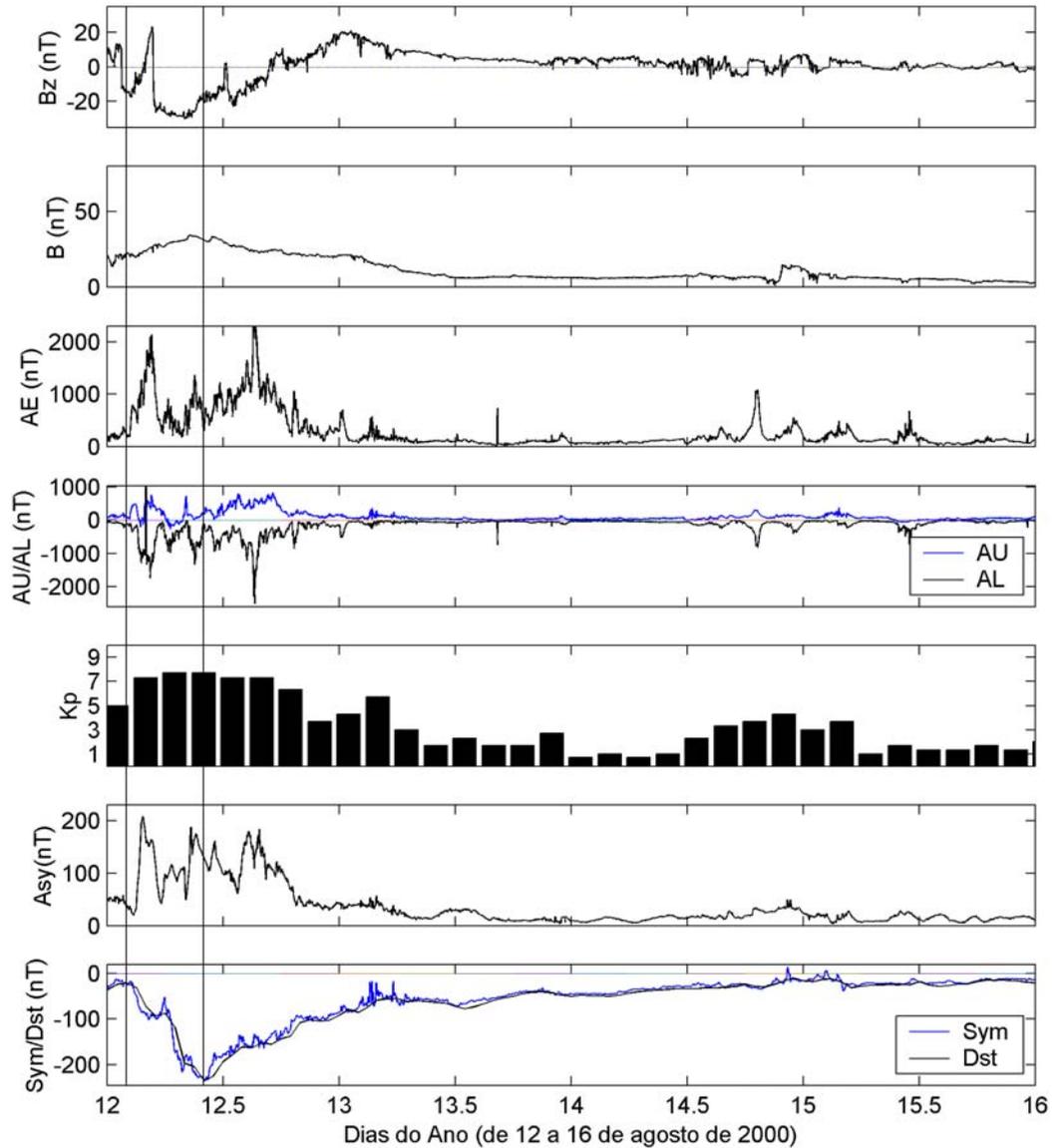


FIGURA B.12 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 12 de agosto de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

B.5 Evento de 2 a 10 de outubro de 2000

Na Figura B.13, uma CME foi observada no dia 1 de outubro, às 17h50min UT por LASCO e a ela pode estar associada a uma explosão do tipo C3 observada pelo GOES. Esta pode ter sido a causa da estrutura, que foi inicialmente detectada às 10h UT do dia 3 e terminou às 3h UT do dia 5 de outubro. No dia 2 de outubro, outra CME foi observada por LASCO, às 20h26min UT, com uma velocidade de propagação de 450 km/s e pode ter sido a causa da segunda estrutura, identificada às 13h do dia 5 e terminou às 11h do dia 7 de outubro. A ela, uma explosão do tipo M1.4, detectada pelo GOES, estava associada e sua origem provavelmente tenha sido da região NOAA 9177, nas latitudes heliográficas de 27° Norte e 51° Oeste.

A ICME, que foi detectada no dia 3 de outubro, causou a primeira injeção de energia da tempestade. Para a segunda injeção de energia nesta mesma tempestade, observou-se que a estrutura se propagou causando um choque de duração de 21 horas. Uma região de bainha formou-se pela interação ICME/nuvem magnética, levando à intensificação da componente B_S , e causando a última injeção de energia, que caracterizou a tempestade intensa deste período.

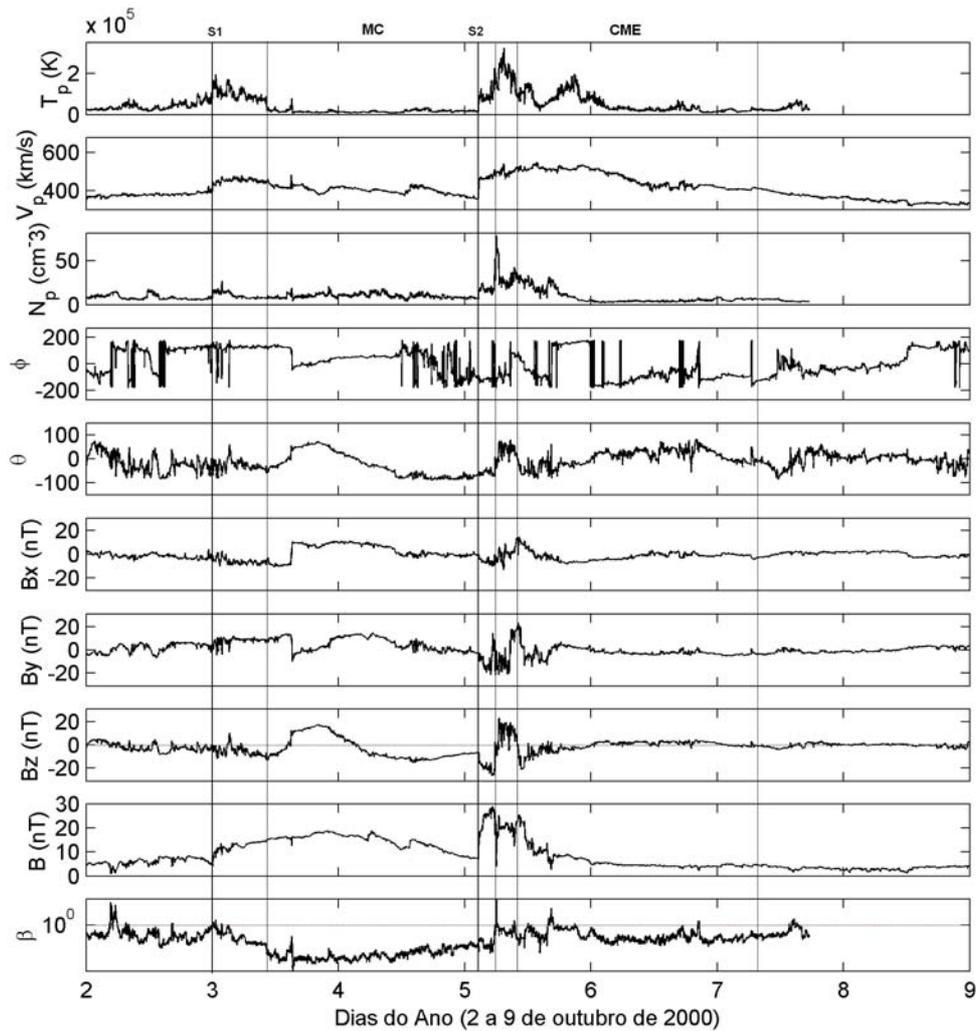


FIGURA B.13 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 5 de novembro de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e, por último, β . As linhas verticais identificam, além dos três choques identificados durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

Causada pela interação de duas ICMEs, sendo que uma era nuvem magnética, a propagação das duas estruturas, em tempos diferentes, causou mais dois choques, que foram detectados pelos instrumentos a bordo do satélite ACE nos dias 4 e 5 de outubro, respectivamente, às 13h36min e às 2h41min UT. O componente sul do IMF mostrou uma rotação forte e lenta durante a propagação da primeira estrutura – característico de

nuvem magnética, que iniciou no dia 3 de outubro às 10h UT e terminou às 3h UT do dia 5 de outubro – e foi intensificada a partir do momento que a outra ICME a envolveu, alcançando valores em torno de -26 nT.

Na Figura B.14, durante a fase principal da tempestade, se observa que o B_S apresentou três incursões para valores negativos, correspondendo às três inflexões no componente horizontal, H , registradas pelo índice Dst , onde aparece nítida a injeção de energia da corrente de anel em três etapas. Durante a fase principal, correspondente a um intervalo de 36 horas, B_S atingiu valores inferiores a -10 nT por um intervalo de tempo aproximado de 11 horas. O campo elétrico também demonstrou grande resposta devido à interação das duas estruturas, permanecendo com valores superiores a 5 mV/m por um intervalo de aproximadamente 3 horas. Estes dois parâmetros foram fundamentais na ocorrência da reconexão e na posterior estimativa da entrada de energia do vento solar usando-se o parâmetro ε . Em torno de $1,56 \times 10^{17} J$ entrou na magnetosfera e, desta energia, estima-se que $6,65 \times 10^{16} J$ tenha sido dissipada através da corrente de anel. O pico do epsilon ficou em torno de $8,63 \times 10^{12} W$.

Antes desta tempestade, uma primeira injeção de energia ocorreu ($Dst \sim -79$ nT), e com ela, observou-se a resposta de todos os índices. A Figura B.15 mostra que o índice AE atingiu seu pico quando a recuperação do Dst iniciou, mas no mesmo tempo em que o Sym alcançava seu mínimo valor para a última etapa da fase principal. O Asy , na primeira tempestade alcançou valores maiores que 100 nT, mas caiu novamente na recuperação. A partir do início da segunda tempestade, permaneceu novamente em torno de 100 nT por quase um dia. Percebe-se nitidamente a correspondência entre os picos e as três etapas que marcaram a fase principal. Seu maior valor ocorreu em resposta à última incursão mínima do Sym ($Asy \sim 250$ nT). O K_p , da mesma forma, oscilou nas duas tempestades: na primeira, assumiu valores em torno de 5 e, na segunda, oscilou entre 5 e 8. Já na recuperação, caiu muito em intensidade.

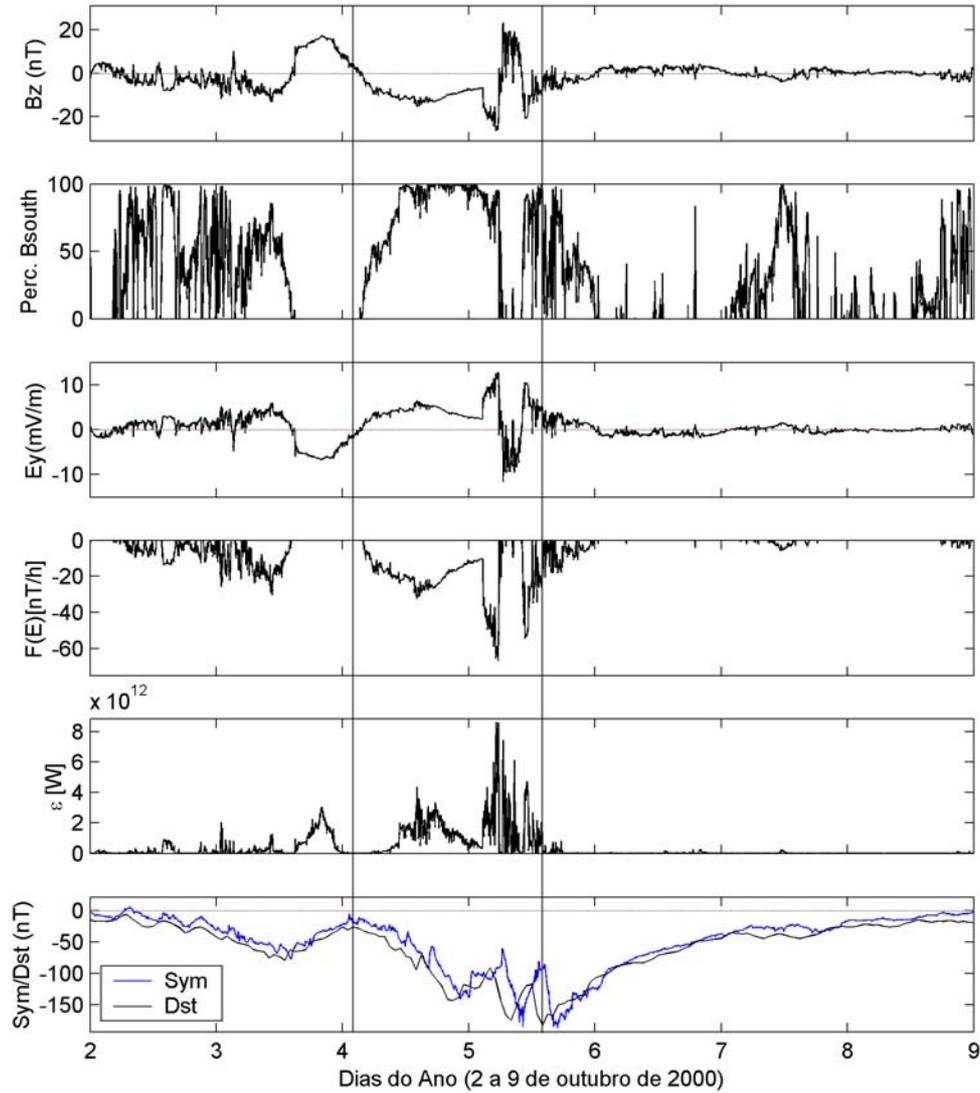


FIGURA B.14 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 5 de outubro de 2000. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

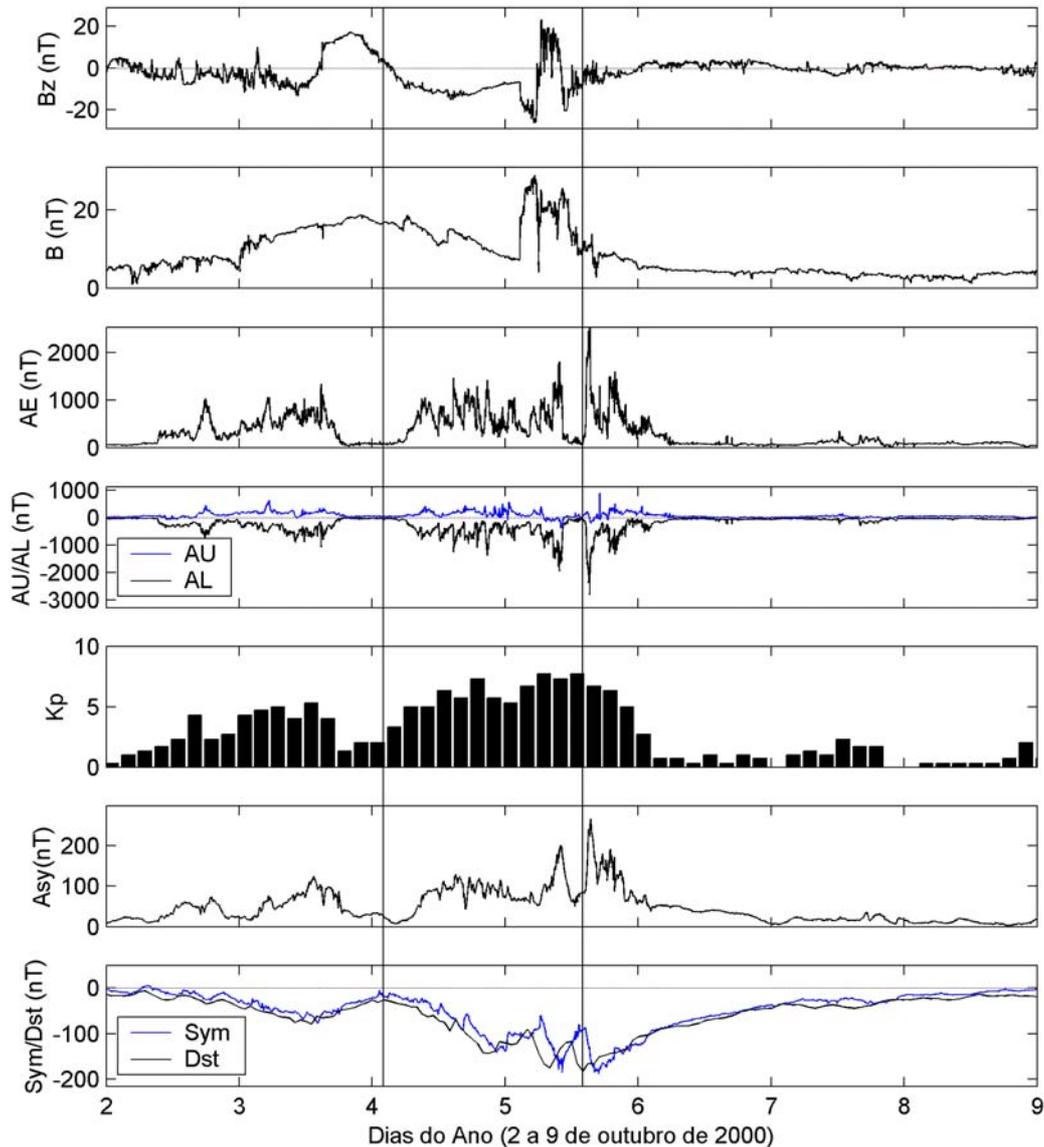


FIGURA B.15 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 5 de outubro de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

B.6 Evento de 3 a 9 de novembro de 2000

Conforme se observa na Figura B.16, três choques foram detectados neste período, sendo que o primeiro deles, às 01h29min UT do dia 4 de novembro. A CME associada a este choque interplanetário foi observada às 16h26min UT do dia 1 de novembro, com

uma velocidade de expansão de 940 km/s (*Schwenn et al.*, 2005). A esta CME estava associada uma explosão do tipo C1.1 em raios-X, que surgiu da RA 9210, localizada na latitude 28° Sul e 25° Oeste e foi detectada pelo satélite GOES, segundo o método empírico de *Dal Lago et al.* (2004a). O choque do dia 6 de novembro, às 09h48min UT, provavelmente esteja associado à propagação de uma nuvem magnética, que foi detectada pelo satélite ACE, com início às 22h do mesmo dia, como se observa pela Figura B.16. Os parâmetros interplanetários mostram que, dentro da estrutura, a temperatura dos prótons foi baixa, a densidade teve alguns picos, ao mesmo tempo em que a velocidade aumentou, e o beta de plasma foi relativamente baixo, caracterizando a estrutura interplanetária.

A Figura B.17 mostra que, durante 4 horas, B_S permaneceu abaixo de -10 nT, e E_y , dentro do mesmo intervalo de tempo, acima de 5 mV/m, e estes tempos foram suficientes para que a parcela de energia do vento solar contabilizasse os $2,98 \times 10^{16}$ J durante a fase principal. O interessante é que a energia dissipada somente na corrente de anel já excedeu a energia de entrada. A quantidade estimada para a corrente de anel foi de $4,54 \times 10^{16}$ J. Acredita-se que o epsilon precise de correções para estimar, com menor erro, a taxa de energia que é injetada na magnetosfera, conforme *Koskinen e Tanskanen* (2002). O parâmetro epsilon alcançou um pico em $4,52 \times 10^{12}$ W.

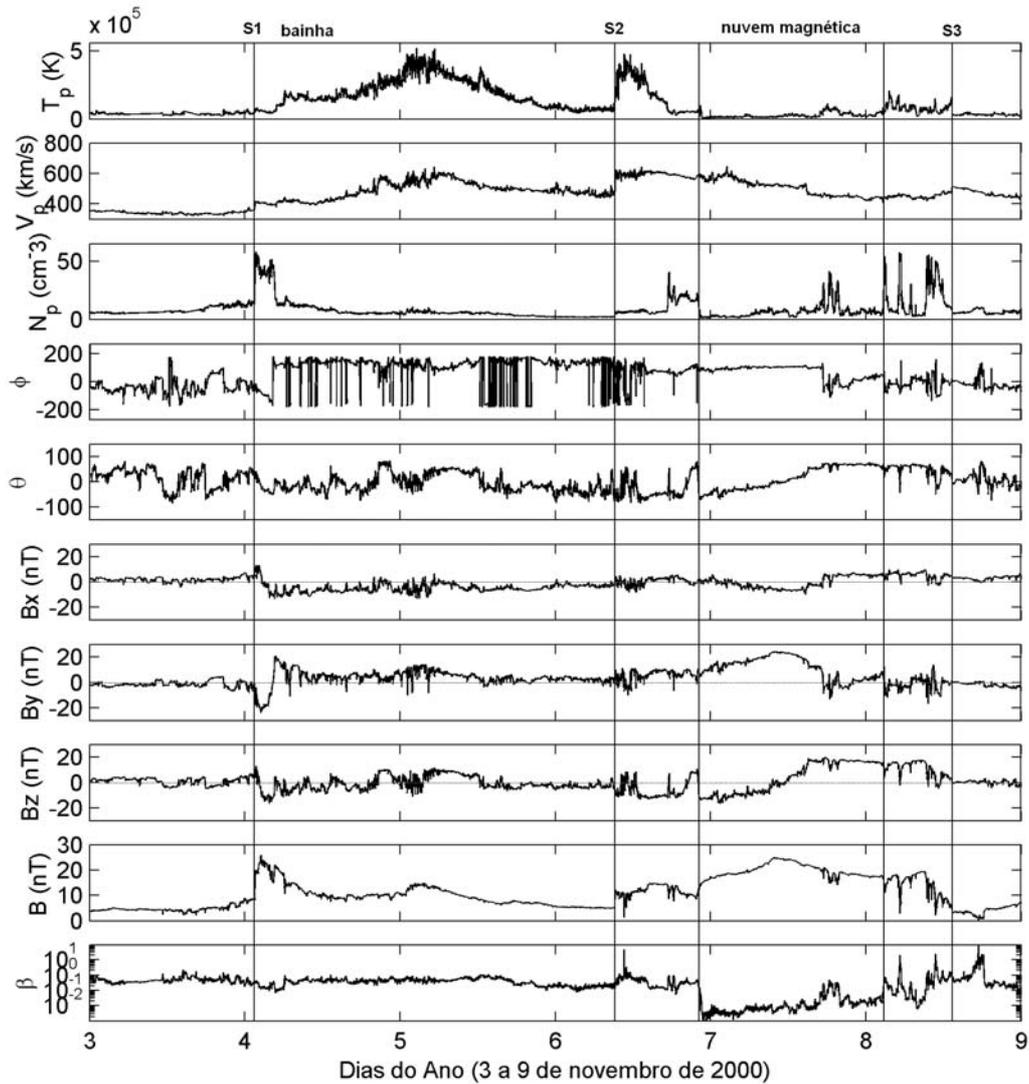


FIGURA B.16 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 6 de novembro de 2000. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além dos três choques identificados durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

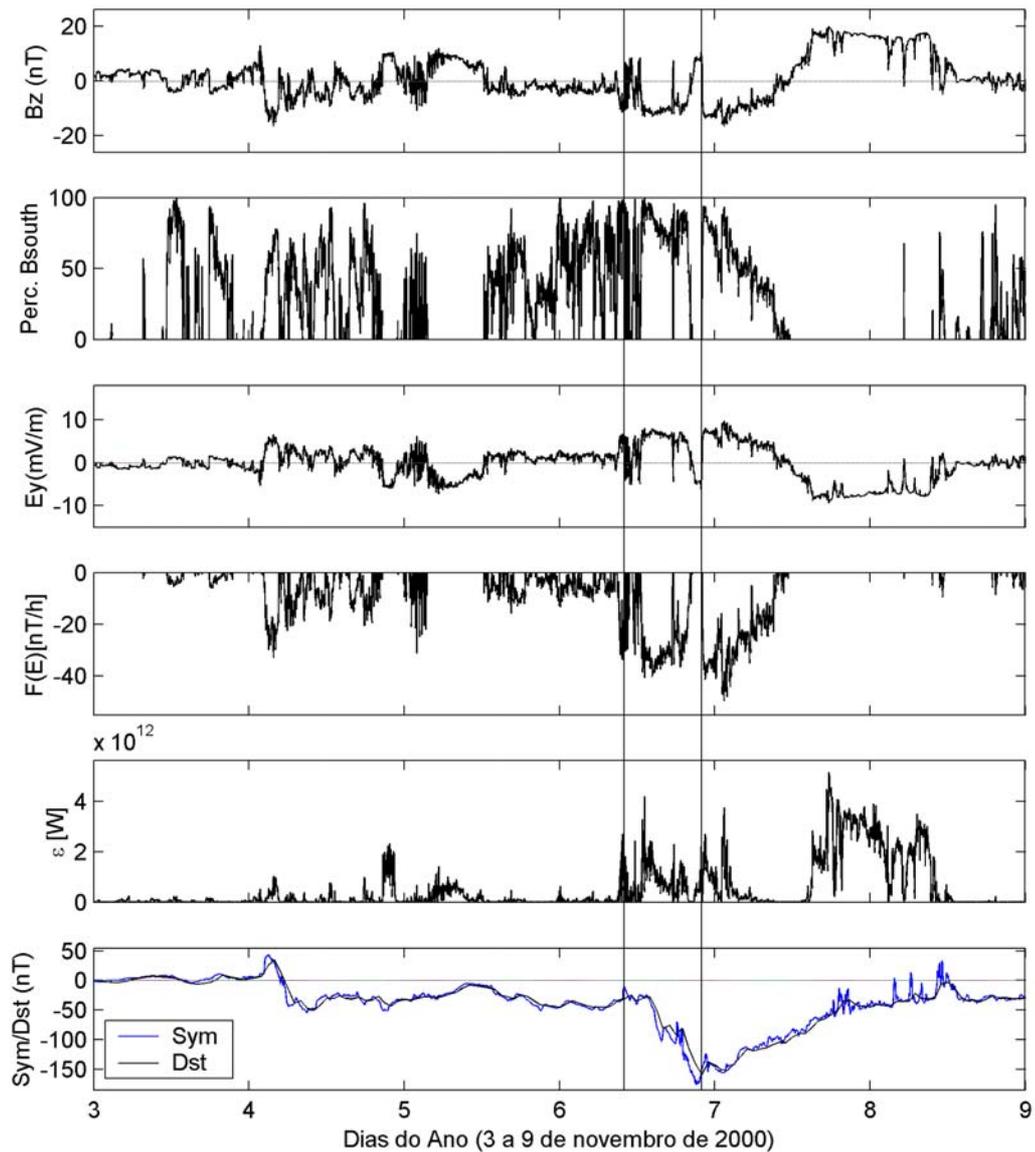


FIGURA B.17 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , e as funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, representadas por $F(E)$ e por ε , respectivamente, têm seus dados avaliados durante a tempestade de 6 de novembro de 2000. Como resposta à injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

Dentro da resposta magnetosférica, vista através da Figura B.18 o índice K_p apresentou valores durante as duas tempestades que foram observadas a partir do Dst/Sym . A primeira tempestade ($Dst \sim -50 \text{ nT}$) obteve resposta em todos os índices geomagnéticos,

mas pouco intensa. Durante a injeção na corrente de anel, o A_{sy} permaneceu com valores, em média, maiores do que 50 nT , e o K_p ficou em torno de 3. O AE oscilou bastante, e, entre quedas e subidas, manteve-se sempre abaixo de 1000 nT . Na segunda injeção, que caracterizou a tempestade intensa aqui estudada, o A_{sy} foi altamente oscilante e, em média, durante a fase principal ficou em 80 nT . É interessante observar que, um pouco adiante do início da recuperação do Dst , seus valores foram muito representativos, embora, no geral, esperar-se-ia que a corrente fosse mais simétrica com o fim da injeção de partículas. Para o AE, observou-se um máximo próximo a 2000 nT , enquanto que no restante da fase principal apresentou picos e depressões, em número considerável. O K_p manteve-se entre 3 e 7, caracterizando uma tempestade de moderada a intensa.

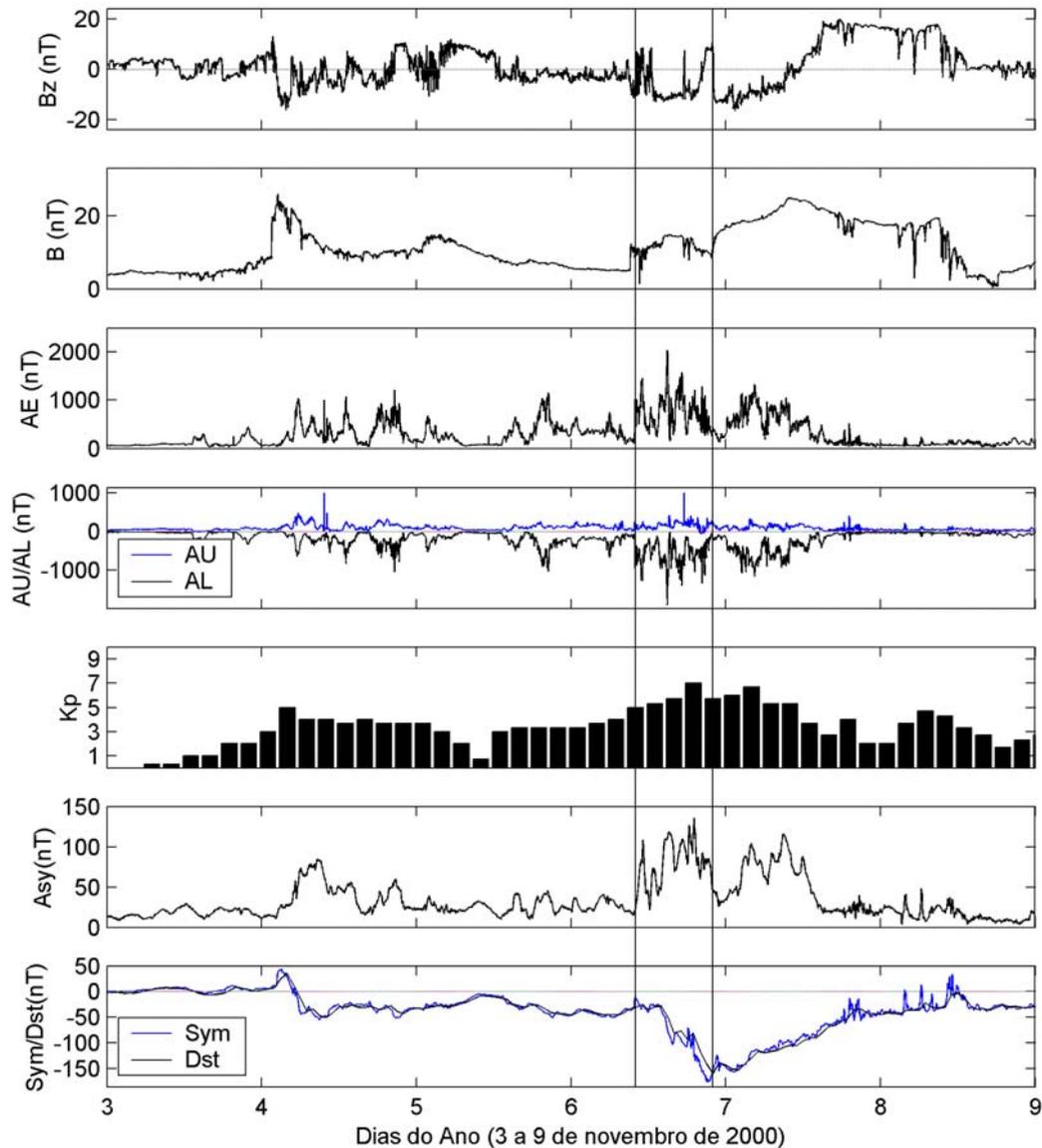


FIGURA B.18 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 6 de novembro de 2000. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.

B.7 Evento de 19 a 23 de março de 2001

Caracterizada por duas etapas, esta tempestade foi marcada por um índice *Dst* de -149 nT (pico). Na Figura B.19, observa-se que a estrutura, que causou um choque

identificado às 10h12min do dia 19 de março, provavelmente devido a uma CME observada pelo SOHO no dia 16 de março, às 03h50min UT, com uma velocidade de expansão de 544 km/s (*Schwenn et al.*, 2005). Esta ICME guiou no espaço uma nuvem magnética, que teve início no dia 19 de março de 2001, às 17h UT, e terminou às 22h UT do dia 21, com uma velocidade de propagação de 410 km/s.

Durante toda a fase principal, que durou em torno de 26 horas, B_S permaneceu com valores negativos inferiores a -10 nT por um período aproximado de 12 horas, intensificando o campo elétrico E_y acima de 5 mV/m por 11 horas. Quando se observa a Figura B.20, percebe-se que o campo sul predominou durante toda a fase principal, correspondendo a um campo elétrico positivo no mesmo período. Uma vez que o campo magnético sul é o fator que mais influencia na entrada de energia para dentro da magnetosfera, e que, como se pôde perceber ele predominou, foi possível estimar-se uma parcela da energia do vento solar, na primeira etapa, de $2,02 \times 10^{16}$ J, sendo que, na segunda injeção, a energia transferida para dentro da magnetosfera foi de $8,55 \times 10^{16}$ J, totalizando $1,1 \times 10^{17}$ J de energia no intervalo da fase principal. Para a corrente de anel, em relação à primeira etapa, cerca de $2,42 \times 10^{16}$ J foi dissipada para a corrente de anel, enquanto que, para a segunda injeção, em torno de $6,64 \times 10^{16}$ J. No total, ou seja, considerando-se todo o período da fase principal, estimou-se uma energia de $1,02 \times 10^{17}$ J. Um pico de $5,57 \times 10^{12}$ W foi observado para o parâmetro epsilon.

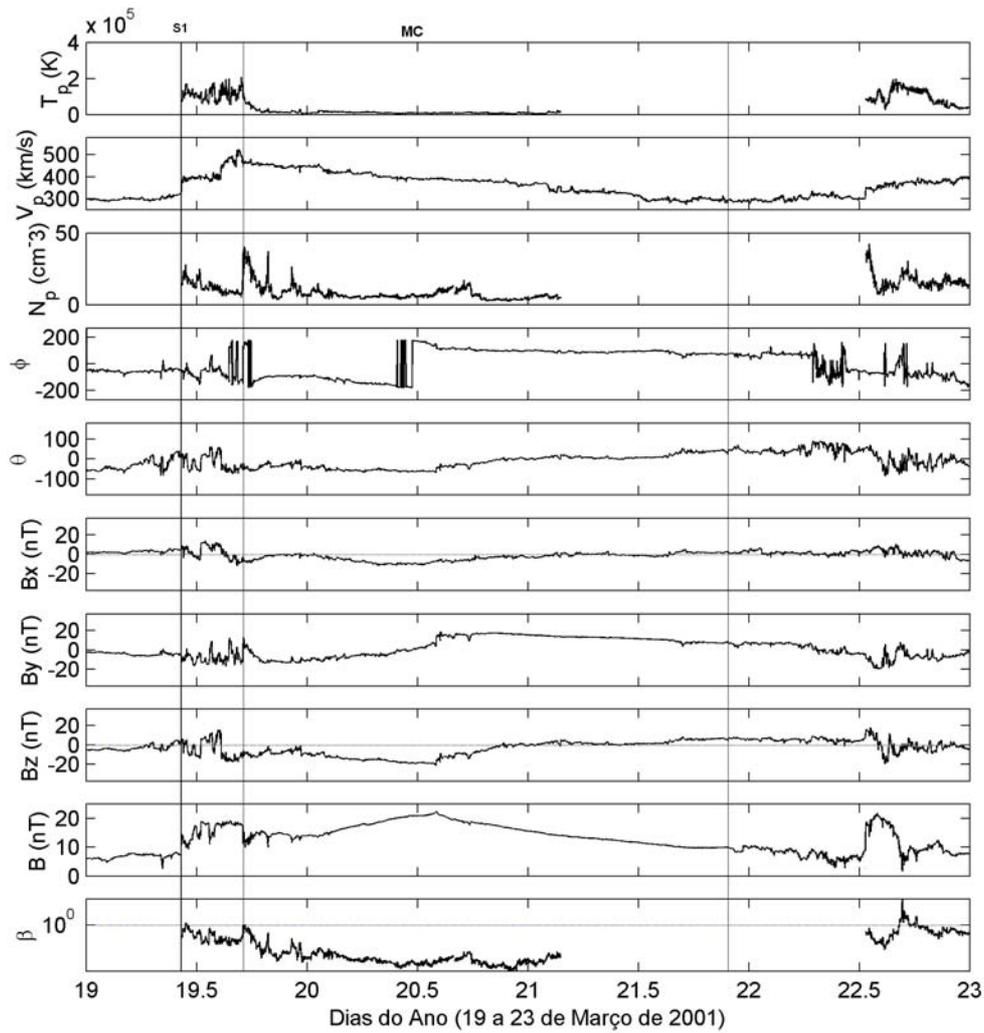


FIGURA B.19 - Parâmetros do plasma do vento solar observados pelo satélite ACE caracterizando a tempestade de 20 de março de 2001. Do topo para baixo, aparecem a temperatura, T_p , a velocidade, V_p , e a densidade dos prótons, N_p . Logo em seguida, o ângulo longitudinal, ϕ , o ângulo latitudinal, θ , os componentes B_x , B_y e B_z do IMF, e por último, o beta de plasma, β . As linhas verticais identificam, além do choque identificado durante o período, o início e o fim da estrutura que causou a tempestade.

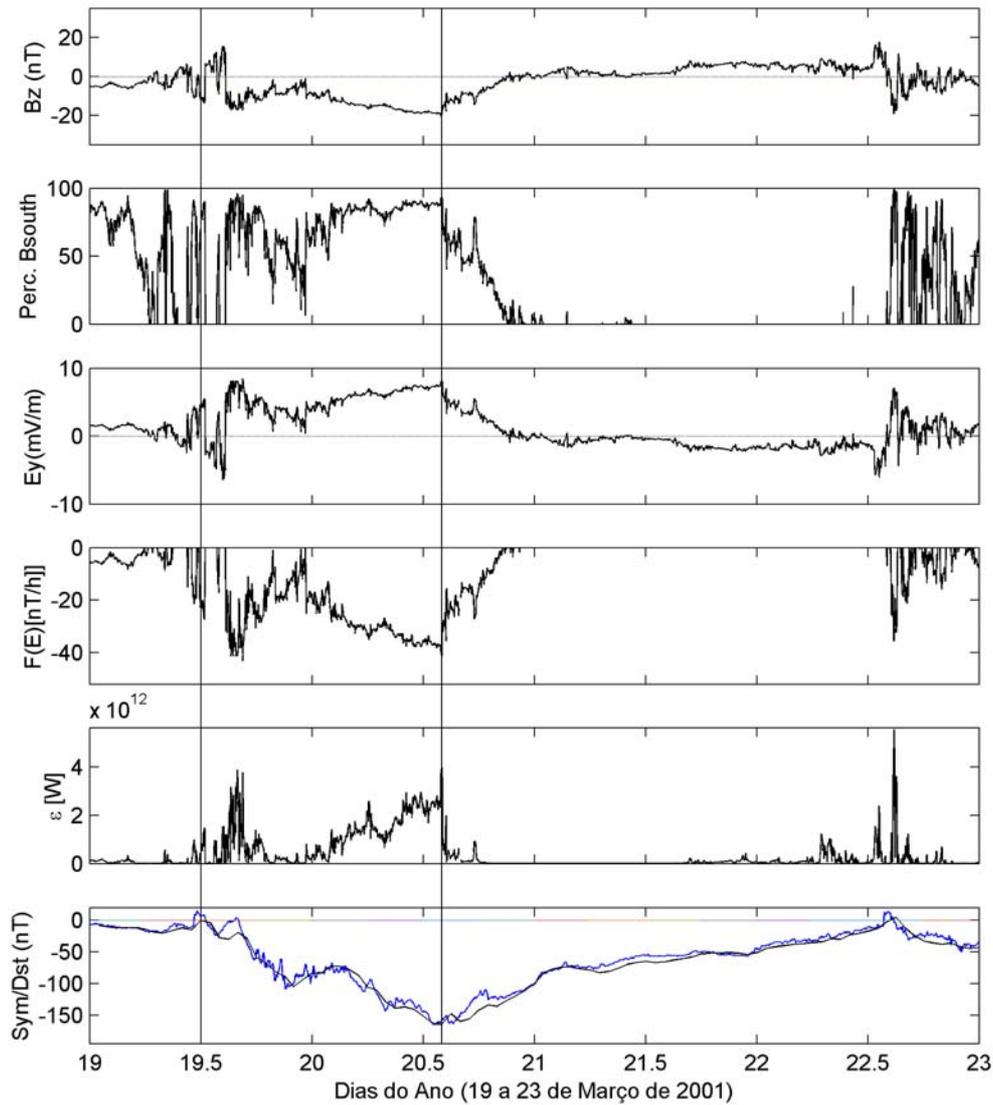


FIGURA B.20 - Além do componente B_z do IMF, a porcentagem do campo B_S é representada na figura. Na seqüência, o campo elétrico interplanetário, E_y , aparece somente em alguns períodos por causa dos *gaps* nos dados de V_p e de B_z . As funções de injeção na corrente de anel e na magnetosfera, $F(E)$ e ε , respectivamente, não têm seus dados avaliados durante a fase principal da tempestade de 20 de março de 2001. Como resposta da injeção na corrente de anel, o índice Dst/Sym é representado no último painel. As linhas verticais representam o início e o fim da fase principal da tempestade.

A Figura B.21 mostra que, durante o período da tempestade de 20 de março, o índice K_p atingiu um valor máximo de 7_+ , na fase principal. No restante do intervalo, observou-se um comportamento moderado para o índice (entre 4 e 7), sendo que na recuperação foi

bem baixo. O AE teve grande resposta e muito oscilante na fase de maior injeção na corrente de anel, atingindo picos de 2000 nT . Para a corrente assimétrica, observou-se um pico intenso na última injeção de energia, no fim da fase principal da tempestade, correspondendo ao mínimo do *Dst*. No intervalo de análise, somente durante a fase principal é que se observaram valores significativos para o *Asy*.

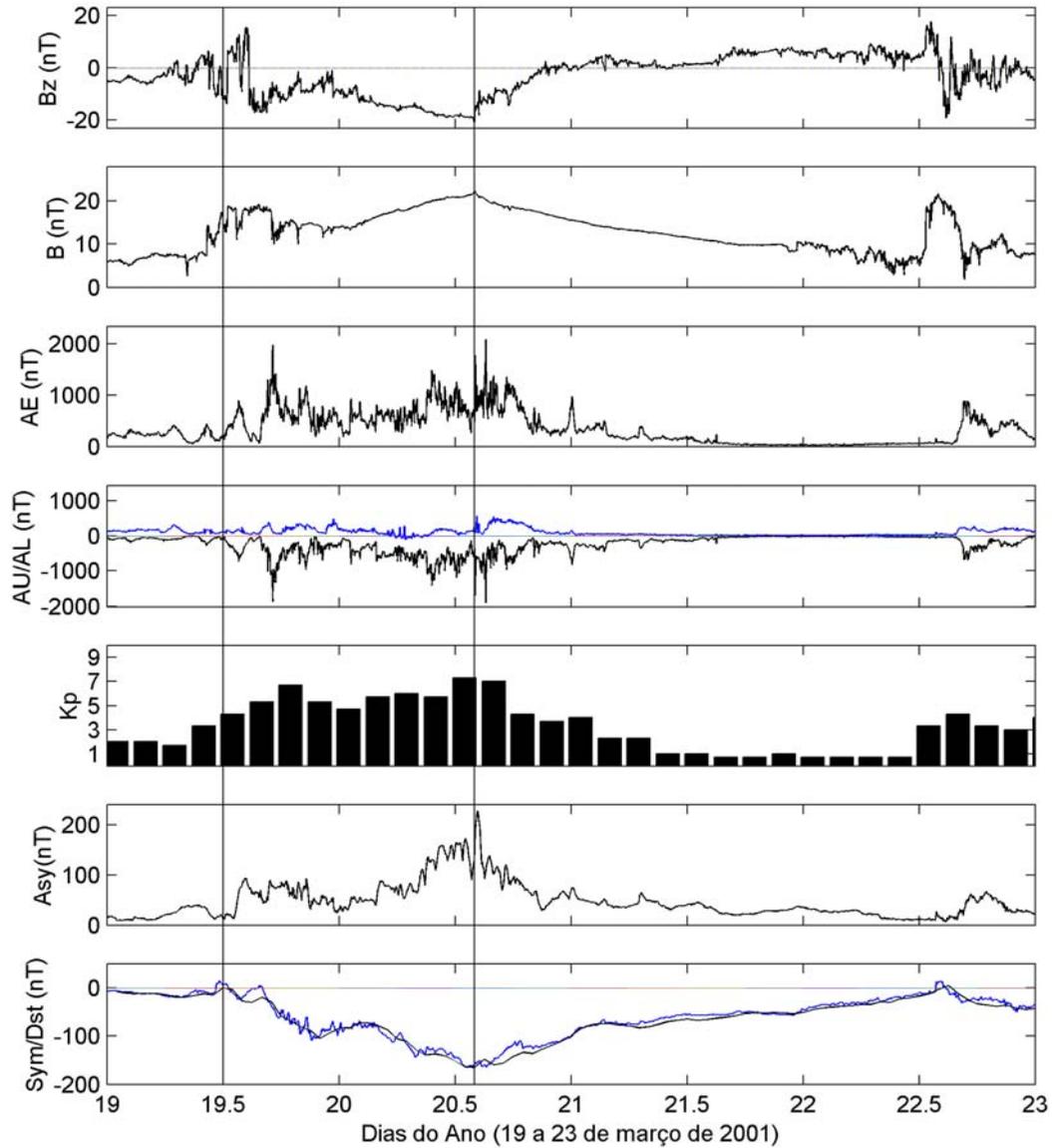


FIGURA B.21 - Dados do campo IMF observados pelo satélite ACE e dados geomagnéticos obtidos do WDC-Kyoto (AE, AU, AL, *Sym* e *Asy*) e do SPIDR (K_p e *Dst*) para a tempestade do dia 20 de março de 2001. De cima para baixo, observam-se o componente B_z do IMF, a magnitude do IMF, e os índices AE, AU, AL (em nT), o K_p , o *Asy* e o *Sym/Dst*, dados em nT . O início e o fim da fase principal são identificados pelas linhas verticais.