



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5445-TDI/491

**A ORIGEM INTERPLANETÁRIA E O DESENVOLVIMENTO DA
FASE PRINCIPAL DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS
MODERADAS (1978 – 1979)**

Odim Mendes Júnior

Tese de Doutorado em Ciências Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Walter Demetrio Gonzales Alarcón, Osmar Pinto Jr.
e Alicia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcón.

550.385.4

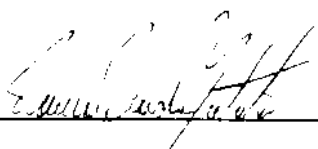
MENDES JR., O.

A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas (1978-1979). / O.Mendes Jr. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 307p. -- (INPE-5445-TDI/491)

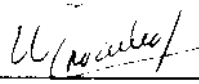
1. tempestades geomagnéticas. 2. Magnetosfera. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Doutor
em Ciência Espacial

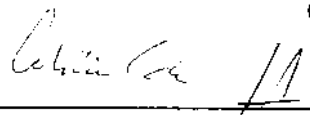
Dr. Paulo Prado Batista


Presidente

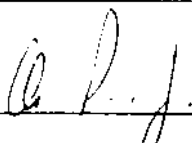
Dr. Walter Demétrio Gonzalez-Alarcon


Orientador

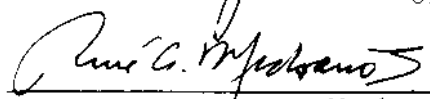
Dra. Alícia L. C. de Gonzalez-Alarcon


Orientadora

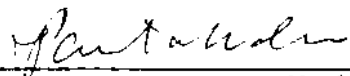
Dr. Osmar Pinto Júnior


Orientador

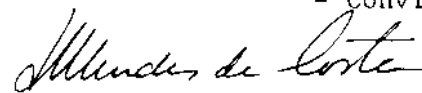
Dr. René Adalid Medrano-Balboa


Membro da Banca

Dr. José Pantuso Sudano


Membro da Banca
- Convidado -

Dra. Aracy Mendes da Costa


Membro da Banca
- Convidada -

Candidato: Odin Mendes Júnior

São José dos Campos, 04 de agosto de 1992

*Acima de todas as leis,
a Lei do Amor!*

A minha Família.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece de forma simples mas sincera:

- ao Dr. Márcio Nogueira Barbosa, Diretor geral, ao Dr. Volker W.J.H. Kirchhoff, Diretor de Ciências Espaciais e Atmosféricas, e ao Dr.Sc. Daniel Jean Roger Nordemann, Chefe da Divisão de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) o apoio à pesquisa;
- aos Drs. Walter Demetrio Gonzalez Alarcón, Osmar Pinto Júnior e Alicia Luiza Clúa de Gonzalez Alarcón toda a orientação, o apoio e o incentivo para a concretização desta pesquisa;
- aos Drs. Bruce T. Tsurutani e Eduard J. Smith do "Jet Propulsion Laboratory" (JPL), Califórnia - EUA, a gentileza dos dados experimentais interplanetários e a cooperação durante as suas análises;
- ao Drs. René Adalid Medrano-Balboa, José Pantuso Sudano e Paulo Prado Batista e à Dra. Aracy Mendes da Costa a participação na Banca Examinadora e as sugestões ao presente trabalho;
- a todos os funcionários da Secretaria de Pós-Graduação, representados na pessoa do Dr. Ralf Gielow;
- a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e, principalmente, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) a bolsa de Doutorado;
- à Dra. Iara Regina Cardoso Almeida Pinto as discussões científicas e filosóficas;

- aos colegas do curso de pós-graduação, em especial às Msc. Rosangela Barreto Biasi Gin e Mariana Marina Mariano e ao Sr. Marcelo Magalhães Saba as discussões, o apoio, a amizade e a paciência durante o presente trabalho;
- à Sra. Maria de Lourdes Tavares Lemos, representando as secretárias da Divisão de Geofísica espacial, pela dedicação e competência;
- aos engenheiros Wanderli Kabata e Osvaldo Celso Pontieri, do Laboratório de Magnetosfera do INPE, a introdução à vivência experimental;
- à Srta. Marciana Leite Ribeiro a revisão das referências bibliográficas e a todo o pessoal da Biblioteca o esforço e a presteza nos serviços bibliográficos;
- ao pessoal da computação pelo auxílio inestimável;
- aos serviços gráficos, representado na pessoa do Sr. Nicolau dos Santos da Fonseca, pela presteza nos atendimentos;
- a Secção de Desenho do Departamento de Produção Técnica;
- à minha família, pela felicidade de estar com eles em todas as batalhas;
- em verdade, a todas as pessoas que me conhecem, pois foram (e são) imprescindíveis à minha evolução de espírito.

RESUMO

As tempestades geomagnéticas estão associadas à corrente de anel, que é governada pela injeção de energia produzida essencialmente durante o acoplamento vento solar-magnetosfera devido a reconexão magnética na magnetopausa. Este trabalho identificou as origens interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas ($-100 \text{ nT} \leq \text{Dst-mín} \leq -50 \text{ nT}$) e analisou os processos de acoplamento durante a fase principal das tempestades. Para isto foram utilizadas as medidas do campo magnético interplanetário (CMI) e da temperatura, densidade e velocidade do vento solar, obtidas pelo satélite ISEE-3, juntamente com os índices de atividade geomagnética equatorial Dst e auroral AE, fornecidos pelo "World Data Center", do período de agosto de 1978 a dezembro de 1979. Identificaram-se 78 tempestades moderadas, das quais 40 eventos de tempestades (Dst iniciando $\approx 0 \text{ nT}$) puderam ser selecionados. Relacionados com esses eventos bem definidos, as seguintes origens interplanetárias foram encontradas: fenômenos de ejeção de massa coronal - EMC (40% dos eventos estão associados a choques interplanetários; 22,5% a feixes simples; 17,5% a interações de feixes; e 10% a elevação não compressiva de densidade do plasma solar) e fenômenos não-EMC (7,5% a ondas do tipo alfvênicas e 2,5% a fenômeno não identificado). 47% dos fenômenos EMC ocorreram próximos à lâmina de corrente heliosférica. No estudo do desenvolvimento, verificou-se que todas as funções de acoplamento energético na magnetopausa apresentaram um comportamento similar, isto é, a componente sul do CMI, no sistema referencial da magnetosfera, é quem essencialmente regula o acoplamento. A função do tipo campo elétrico EY e a função do tipo potência elétrica ϵ resultaram no melhor ajuste linear no acoplamento. No entanto, as complexidades nessas relações de acoplamento indicam a ação conjunta de outros processos de transferência energética, tais como transferências não proporcionais, interações viscosas e processo de descarga abrupta da energia armazenada na cauda magnetosférica.

THE INTERPLANETARY ORIGINS AND THE MAIN-PHASE DEVELOPMENT
OF MODERATE GEOMAGNETIC STORMS (1978-1979).

ABSTRACT

Geomagnetic storms are related to the ring current, which is driven by energy injection primarily during energetic solar wind-magnetosphere coupling due to reconnection at the magnetopause. This work identified the interplanetary origins of moderate geomagnetic storms ($-100 \text{ nT} \leq \text{Dst}_{\text{min}} \leq -50 \text{ nT}$) and analysed the coupling processes during the storm main phase. For this purpose the interplanetary magnetic field, solar-wind temperature, density and velocity data, obtained by the ISEE-3 satellite, were used together with the equatorial-Dst and auroral-AE geomagnetic indices, provided by the World Data Center, for the interval August/1978-December/1979. 78 moderate storms were identified, in which 40 storm events (Dst beginning at $\approx 0 \text{ nT}$) were selected. Related to these well defined events the following interplanetary origins were found: coronal mass ejections phenomena - CME (40% related to interplanetary shocks; 22,5% to single streams; 17,5% to streams interactions; 10% to non-compressive density enhancement) and non-CME phenomena (7,5% related to Alfvén-like waves and 2,5% to no-identified feature). 47% of CME-phenomena occurred near the heliospheric current sheet. Regarding the main-phase development all energy coupling functions showed a similar behaviour, that is, the south component of the interplanetary magnetic field (in the magnetospheric coordinate frame) controls basically this coupling. The best linear fits were given by E_y electric field-like and ϵ electric power-like functions. However the complexities in these coupling relations point to other simultaneous energy transfer processes such as non-proportional transference, viscous transference and "unloading" process.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxix
LISTA DE SIGLAS.....	xxxv
 <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	 1
 <u>CAPÍTULO 2 - TEORIA MAGNETOSFÉRICA RELACIONADA ÀS TEMPESTADES</u> <u>GEOMAGNÉTICAS</u>	 5
2.1 - A Magnetosfera.....	5
2.2 - A corrente de anel e as tempestades geomagnéticas.....	12
2.2.1 - Tempestades geomagnéticas.....	12
2.2.2 - O índice Dst.....	15
2.2.3 - A Origem da corrente de anel.....	22
2.2.4 - A estrutura dinâmica e composição química da corrente de anel.....	29
2.2.5 - A evolução temporal da corrente de anel.....	34
2.3 - Teoria da origem interplanetária das tempestades geomagnéticas.....	38
2.3.1 - A reconexão magnetosférica.....	38
2.3.2 - Os fenômenos interplanetários.....	51
2.3.3 - O acoplamento energético.....	62
 <u>CAPÍTULO 3 - DADOS EXPERIMENTAIS E CÁLCULOS</u>	 67
3.1 - Dados experimentais.....	67
3.2 - Cálculos.....	81

<u>CAPÍTULO 4 - AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS E AS</u> <u>ORIGENS INTERPLANETÁRIAS.....</u>	101
4.1 - Identificação das tempestades moderadas e seleção de eventos de tempestade.....	101
4.2 - Identificação das origens interplanetárias das tempestades moderadas.....	111
4.3 - Complementação e comparação com os outros regimes de tempestade.....	135
<u>CAPÍTULO 5 - FUNÇÕES DE ACOPLAMENTO ENERGÉTICO.....</u>	147
5.1 - Critérios para a escolha dos eventos de tempestades moderadas a serem estudados.....	147
5.2 - Tratamento dos parâmetros físicos nas funções calculadas.....	148
5.3 - Fatores e parâmetros adotados nos cálculos.....	148
5.4 - Estudo dos parâmetros característicos e do tratamento matemático no comportamento dos cálculos.....	151
5.5 - Análise dos eventos calculados.....	153
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</u>	177
6.1 - Conclusões quanto às origens interplanetárias dos eventos de tempestade.....	177
6.2 - Conclusões quanto ao acoplamento energético durante a fase principal de tempestades geomagnéticas moderadas....	179
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185
APÊNDICE A - REGISTRO MAGNÉTICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	197

APÊNDICE B - TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS DO SISTEMA SOL-ECLÍPTICA PARA O SISTEMA SOL-MAGNETOSFERA.....	199
B.1 - Transformação entre sistemas cartesianos ortogonais.....	199
B.2 - Transformação do sistema Sol-Eclíptica ao sistema Sol-magnetosfera.....	201
APÊNDICE C - ROTEIRO DOS CÁLCULOS COMPUTACIONAIS.....	209
APÊNDICE D - OS ÍNDICES DST E AE E OS PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS.....	219
APÊNDICE E - TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS FRACAS.....	265

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Uma visão simplificada das regiões que compõem e envolvem a magnetosfera terrestre.....	6
2.2 - Uma visão simplificada das regiões de ejeção de partículas na superfície solar.....	11
2.3 - Tempestade geomagnética ocorrida nos dias 7 e 8 de novembro de 1978.....	14
2.4 - Posições das estações de medidas do campo magnético na superfície terrestre utilizadas no cálculo do índice Dst...	16
2.5a - Configuração da magnetosfera e correntes elétricas que nela circulam.....	18
2.5b - Esquema simplificado dos acoplamentos de correntes elétricas no interior da magnetosfera.....	19
2.6 - Mecanismo de geração da corrente elétrica associado ao movimento giro-ciclotrônico em uma distribuição de partículas em um campo magnético.....	27
2.7 - Modelo da distribuição da corrente de anel em distância radial e em latitude.....	28
2.8 - Densidade de energia integrada da corrente de anel e as fontes prováveis obtidas durante a órbita do satélite CCE (charge Explorer Composition) em 4 de setembro de 1984, coincidente com uma tempestade geomagnética.....	32
2.9 - Visão simplificada do modelo de reconexão magnética de linha x simples (A) e do modelo de múltiplas linhas x (B)..	40
2.10 - Visualização do fluxo de plasma e da configuração do campo magnético em torno do ponto magnético neutro do tipo-x durante a reconexão magnética.....	42
2.11 - Três modelos básicos de linhas de reconexão magnética.....	46
2.12 - Fenômenos interplanetários que podem dar origem à componente do campo magnético interplanetário com orientação norte-sul (no sistema referencial da magnetosfera) e produzirem reconexão magnética.....	54

2.13 - Visão simplificada da região de expansão de plasmas característicos da região coronal do Sol.....	56
2.14 - Esquema da lâmina de corrente associada à estrutura de setores do campo magnético solar.....	60
3.1 - A órbita do satélite ISEE-3 no meio interplanetário em torno do ponto lagrangeano.....	69
3.2a - Projeção no plano X-Y da Eclíptica (GSE) da trajetória da órbita de halo do ISEE-3 em torno do ponto lagrangeano Sol-Terra. Os números denotam os dias do ano em 1978 e RT, raios terrestres.....	70
3.2b - Projeção no plano Y-Z da Eclíptica (GSE) da Trajetória da órbita de halo do ISEE-3 em torno do ponto lagrangeano Sol-Terra. Os números denotam os dias do ano em 1978 e RT, raios terrestres.....	71
3.3 - Medidas interplanetárias obtidas pelo satélite ISEE-3 e os índices de atividade geomagnética Dst e AE fornecidos pelo "World Data Center" utilizados no estudo de tempestades geomagnéticas.....	72
3.4 - Parâmetros medidos na posição do satélite e o seu tempo de trânsito ΔT_1 até a magnetopausa. ΔT_2 é o tempo de transferência de efeitos da magnetopausa até a corrente de anel. O índice Dst é obtido de medidas na superfície da Terra.....	73
3.5 - Comparação dos índices Dst (A) com resolução de 2,5 min (Burton et al., 1975), (B) com esta resolução mas promediado em 1 hora (Feldstein et al., 1984), e (C) o Dst horário equatorial (Sugiura e Poros, 1971) para 7-8 de fevereiro de 1967).....	75
3.6 - Comparação dos índices Dst (A) com resolução de 2,5 min (Burton et al., 1975), (B) com esta resolução mas promediado em 1 hora (Feldstein et al., 1984), e (C) o Dst horário equatorial (Sugiura e Poros, 1971) para 23-24 de fevereiro de 1967.....	76

3.7 - No sistema de coordenadas da Eclíptica (GSE), indica-se uma linha do campo magnético interplanetário B ao longo da espiral de Arquimedes.....	78
3.8 - Campo magnético interplanetário projetado na Eclíptica (B) para a determinação da polaridade α_{SE} próxima à órbita terrestre.....	79
3.9 - Exemplo de gráfico da polaridade α_{SE} do campo magnético interplanetário.....	80
3.10 - Diagrama de blocos do programa de computador utilizado para estudo do desenvolvimento de tempestades magnéticas..	82
3.11 - Dados primários referentes à tempestade do dia 24-25 de novembro de 1978.....	84
3.12 - Parâmetros básicos suavizados: (A) a componente Bz do campo magnético interplanetário no sistema referencial da magnetosfera e (B) a velocidade V do vento solar.....	85
3.13 - Pressão dinâmica do vento solar, P, suavizada para o período de 24-25 de novembro de 1978.....	86
3.14 - Funções de acoplamento energético no período de 24-25 de novembro de 1978: (A) função EY; (B) função EPS; (C) e função F5 ($=P^{1/6}V B \text{ Sen}^4(\theta/2)$).....	87
3.15 - Função Q (taxa temporal da injeção de energia na corrente de anel) no período de 24-25/nov/1978.....	88
3.16 - Apresenta-se o valor Dst*, que é o índice Dst corrigido da influência da pressão dinâmica P do vento solar.....	89
3.17 - Taxas temporais da: (i) injeção de energia na corrente de anel e (ii) injeção de energia na magnetopausa, para a tempestade magnética moderada do período de 24-25 de novembro de 1978.....	90
3.18 - Cálculo da correlação (R) das taxas temporais da energia injetada na magnetopausa (F5) e da energia injetada na corrente de anel (Q), para a tempestade magnética moderada do período de 24-25 de novembro de 1978.....	91
3.19 - Curva de resposta da amplitude de sinal em função do seu período, obtida com um filtro passa-baixo produzido através de média ponderada móvel.....	96

4.1 - As tempestades geomagnéticas intensas ($Dst_{\text{Mín}} < -110$ nT) e os fenômenos interplanetários associados no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979.....	104
4.2a - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas ao choque interplanetário.....	124
4.2b - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas a interação de feixes.....	127
4.2c - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas a feixes simples.....	128
4.2d - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas ao NCDE (Elevação não compressiva de densidade).....	130
4.3 - Causas interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas de agosto de 1978 a dezembro de 1979.....	134
4.4 - Distribuição dos choques com a intensidade das tempestades geomagnéticas. Os círculos são relativos aos regimes de tempestades e os números, aos choques.....	139
4.5 - Distribuição dos choques interplanetários considerando o início súbito.....	144
4.6 - Tempestades geomagnéticas associadas aos choques interplanetários no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979.....	145
5.1 - Para o evento M.16, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.....	156
5.2 - Para o evento M.22, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.....	158
5.3 - Para o evento M.62, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.....	160
5.4 - Para o evento M.66, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.....	162

5.5 - Curva da correlação da função de dissipação na corrente de anel Q versus a função de acoplamento na magnetopausa EY para o evento M.66 em termos da defasagem temporal $\Delta T_1 + \Delta T_2$ (tempo de trânsito e tempo de processo).....	168
5.6 - Para o evento M.66, apresenta-se a relação da função de dissipação Q com as funções de acoplamento: (a) EY, (b) EPS, (c) F4, (d) F5, (e) F6, (f) F6A, (g) F11A, (h) F14 e (i) F14A.....	170
5.7 - Exemplos de correlação fraca: (a) Q x F6A do evento M.66 e (b) Q x F14 do evento M.16.....	172
5.8 - Relação da função de dissipação Q com a função de acoplamento EPS para os vários eventos: (a) M.16, (b) M.22, (c) M.62 e (d) M.66.....	173
B.1 - Representação do sistema de coordenadas Sol-Eclíptica (GSE) e de um sistema inercial (GI) e a sua interrelação.....	204
B.2 - Dipolo magnético da Terra, D, representado em um sistema inercial GI.....	204
B.3 - Relação entre os sistemas referenciais da Eclíptica (GSE) e da magnetosfera (GSM), onde está representado o dipolo magnético da Terra, D.....	208
C.1 - Fluxograma em que se indicam os programas de computador, os arquivos de dados sobre o qual agem e os arquivos de dados resultantes. M.# identifica o evento de tempestade e MM/D1TOD2/YYYY é Mês/1ºDia e 2ºDia/Ano, estabelecendo o intervalo de dados utilizados.....	210
D.1a - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; o índice auroral AE; e os parâmetros interplanetários obtidos pelo satélite ISEE-3: as componentes no sistema Sol-Eclíptica B_z^* e B_y^* do campo magnético interplanetário e a sua magnitude B; a densidade numérica n; a velocidade V; e a temperatura T do plasma do vento solar, onde H é o hidrogênio e He é o hélio. Os eventos de tempestade geomagnética moderada são denominados M.1, M.2 e M.3; indicados pelos tracejados verticais.....	220

D.1b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica). De 0 a 180 graus, afastando-se do Sol; de 0 a -180 graus, orientado para o Sol. Os períodos dos eventos de tempestade geomagnética moderada estão indicados pelos tracejados verticais. Os eventos de tempestade geomagnética moderada são denominados M.1, M.2 e M.3; indicados pelos tracejados verticais.....	221
D.2a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.4 e M.8.....	222
D.2b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	223
D.3a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.9 e M.11....	224
D.3b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	225
D.4a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.16.....	226
D.4b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	227
D.5a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.17 e M.18...	228
D.5b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	229
D.6a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.21, M.22 e M.23.....	230

D.6b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	231
D.7a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.24.....	232
D.7b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	233
D.8a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.30 e M.32...	234
D.8b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	235
D.9a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.34 e M.35...	236
D.9b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	237
D.10a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.36, M.37 e M.48.....	238
D.10b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	239
D.11a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.52.....	240
D.11b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	241
D.12a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.53 e M.54..	242
D.12b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	243

D.13a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.58.....	244
D.13b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	245
D.14a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.61 e M.62..	246
D.14b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	247
D.15a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.63.....	248
D.15b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	249
D.16a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.64 e M.65..	250
D.16b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	251
D.17a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.66 e M.69..	252
D.17b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	253
D.18a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.71 e M.75..	254
D.18b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	255
D.19a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.76.....	256
D.19b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_E (no sistema Sol-Eclíptica).....	257

D.20a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.77.....	258
D.20b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	259
D.21a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.78.....	260
D.21b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera Bz e By do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	261
D.22 - Apresentam-se para os eventos de tempestades geomagnéticas moderadas M.25 e M.26, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; as componentes no sistema da magnetosfera Bz, By e Bx do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	262
D.23 - Apresentam-se para o evento de tempestade geomagnética moderada M.28, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; as componentes no sistema da magnetosfera Bz, By e Bx do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).....	263

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Propriedades observadas e calculadas do vento solar.....	10
2.2 - Estações de medidas do campo magnético utilizadas no cálculo do índice Dst.....	17
2.3 - Funções de acoplamento energético principais.....	66
3.1 - Coeficientes de ponderação para $\sigma_C = 2$	94
3.2 - Coeficientes de ponderação para $\sigma_C = 3$	95
4.1 - Tempestades geomagnéticas moderadas e seleção de eventos de tempestades.....	105
4.2 - Choques interplanetários no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979.....	108
4.3 - Ocorrência interplanetárias próximas aos eventos de tempestades geomagnéticas moderadas.....	112
4.4 - Análise dos eventos de tempestades.....	115
4.5 - Causas interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas.....	131
4.6 - Ocorrências de tempestades após choque interplanetário....	137
4.7 - Choques interplanetários e inícios súbitos.....	140
5.1 - Eventos de tempestades moderadas para o estudo do acoplamento energético.....	149
5.2 - Cálculos do acoplamento energético.....	154
5.3 - Correlações $Q \times F\alpha$	169
A.1 - Medidas experimentais em fita magnética do período de 16/agosto/1978 a 28/dezembro/1979.....	198
E.1 - Tempestades geomagnéticas fracas.....	266

LISTA DE SÍMBOLOS

AE	- Índice de atividade geomagnética na região auroral, dada em nanotesla.
AL	- Limite inferior das variações negativas das perturbações do campo magnético nas regiões polares.
AU	- Limite superior das variações positivas das perturbações do campo magnético nas regiões polares.
b	- Constante de proporcionalidade que é igual a $0,2 \text{ (eV/cm}^3\text{)}^{-1/3}$.
B	- Campo magnético interplanetário ou, pelo contexto, campo magnético.
B _G	- Campo geomagnético.
B _M	- Campo magnético na bainha magnética.
B ₀	- Componente horizontal do campo magnético principal da Terra, na superfície, no equador.
B _T	- Componente transversal do campo magnético interplanetário no sistema da magnetosfera ($B_T = B_z + B_y$).
B _x	- Componente do campo magnético interplanetário na direção Terra-Sol.
B _z	- Componente sul-norte, no sistema da magnetosfera, do campo magnético interplanetário.
B _y	- Componente alvorada-crepúsculo, no sistema da magnetosfera, do campo magnético interplanetário.
c	- Velocidade da luz, que é $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
C	- Constante magnética de tempo calmo que é igual a 20 nanoteslas.
D	- Perturbação magnética.
D _{st}	- Índice da atividade geomagnética devida à corrente de anel, dada em nanotesla.
D _{st} *	- Índice de perturbação magnética devida exclusivamente à corrente de anel (índice D _{st} subtraído da contribuição magnética devida à corrente da magnetopausa).
E	- Campo elétrico.

Ed	- Componente alvorecida-crepúsculo, no sistema da magnetosfera, do campo elétrico.
Ey	- Componente alvorecida-crepúsculo, no sistema da magnetosfera, do campo elétrico (função de acoplamento energético).
EPS	- Função de acoplamento energético.
f	- Frequência em ciclos em função da razão do intervalo de observações sucessivas e de um intervalo temporal pré-definido.
F α	- Taxa temporal da energia injetada na magnetopausa (função de acoplamento energético genérica).
F4	- Função de acoplamento energético.
F5	- Função de acoplamento energético.
F6	- Função de acoplamento energético.
F6A	- Função de acoplamento energético.
F11A	- Função de acoplamento energético.
F14	- Função de acoplamento energético.
F14A	- Função de acoplamento energético.
F.#	- Tempestade geomagnética fraca ($Dst \geq -50$ nT) identificada por um número seqüencial.
H	- Componente horizontal do campo geomagnético.
H ^C	- Componente horizontal do campo geomagnético de períodos calmos.
Hmp	- Componente horizontal do campo geomagnético devido às correntes da magnetopausa.
Ho	- Campo geomagnético permanente ou principal.
Hoo	- Valor médio anual da componente horizontal do campo geomagnético.
H ^P	- Componente horizontal do campo geomagnético de períodos perturbados.
HRC	- Componente horizontal do campo geomagnético devido à corrente de anel.
n	- Densidade.
NH	- Densidade numérica dos prótons do plasma solar.

NHE	- Densidade numérica das partículas alfas do plasma solar.
J	- Vetor densidade de corrente elétrica.
J _D	- Densidade de corrente devida ao gradiente na intensidade e à curvatura das linhas do campo magnético.
J _c	- Densidade de corrente devida ao efeito giro-ciclotrônico em uma distribuição de partículas ionizadas.
J _P	- Densidade da corrente de Pedersen na ionosfera.
L	- Parâmetro magnético de McIlwain.
LCF	- Escala de comprimento de Chapman-Ferraro.
Ln	- Variação diária lunar no campo geomagnético.
L _M	- Raio da magnetopausa na parte frontal.
Lo	- Constante (≈ 7 raios terrestres).
M.#	- Tempestade geomagnética moderada ($-100 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -50 \text{ nT}$) identificada por um número seqüencial #.
P	- Pressão dinâmica do vento solar (pressão devida à incidência de partículas).
P _c	- Teste do significado da correlação obtida.
Q	- Taxa temporal da injeção de energia para a corrente de anel.
R	- Correlação.
R _m	- Número magnético de Reynolds.
s	- Razão do campo geomagnético e do campo magnético na bainha magnética próxima da magnetopausa ($s > 1$).
S _q	- Variação diária solar no campo geomagnético.
S.#	- Choque interplanetário identificado por um número seqüencial #.
t	- Medida de tempo.
T	- Temperatura.
U _A	- Fluxo energético das partículas aurorais.
U _J	- Taxa temporal de produção de calor por aquecimento Joule na ionosfera.

U_t	- Taxa temporal da energia injetada total dissipada na magnetosfera.
V	- Velocidade do plasma solar ou, pelo contexto, velocidade
X	- Variável genérica.
W_k	- Coeficiente de ponderação do k -ésimo termo da média ponderada móvel.
α	- Ângulo de inclinação (Pitch angle) entre o vetor velocidade e o campo magnético.
α_{SE}	- Ângulo entre o campo magnético interplanetário e a normal à direção da espiral de Arquimedes, contido na Eclíptica.
ε_α	- Densidade de energia cinética das partículas que compõem a corrente de anel.
$\bar{\varepsilon}_\alpha$	- Energia total das partículas que compõem a corrente de anel.
ε_m	- Energia total do campo geomagnético externo à superfície.
θ	- ângulo entre a componente B_z e a componente transversal B_r do campo magnético interplanetário, no sistema da magnetosfera.
λ	- Comprimento de escala característico.
μ	- Permeabilidade magnética.
σ	- Condutividade elétrica escalar.
σ_G	- Desvio padrão na distribuição gaussiana.
τ	- Fator temporal de decaimento da corrente de anel.
M	- Massa de partículas.
Z	- Grandeza vetorial genérica.
$Z_{MÁX}$	- Valor máximo de uma grandeza genérica Z .
$Z_{MÍN}$	- Valor mínimo de uma grandeza genérica Z .
$Z_\perp$	- Componente perpendicular de um vetor genérico Z referente a uma dada direção.
$Z_\parallel$	- Componente paralela de um vetor genérico Z referente a uma dada direção.
$Z_1 \cdot Z_2$	- Produto escalar dos vetores genéricos Z_1 e Z_2 .

$Z_1 \times Z_2$	- Produto vetorial dos vetores genéricos Z_1 e Z_2 .
$\nabla \varphi$	- Gradiente da função escalar φ .
$\nabla \cdot Z$	- Divergente de um vetor genérico Z .
ΔZ	- Variação no valor da variável Z .
ΔT_1	- Tempo de trânsito do plasma solar da posição do satélite ISEE-3 até a magnetopausa.
ΔT_2	- Tempo de transferência da energia injetada na magnetopausa até a corrente de anel (tempo de processo).
$\langle Z \rangle$	- Valor médio da variável Z .
$\frac{\partial}{\partial t}$	- Derivada temporal parcial.
$A \rightarrow S$	- Troca de setor onde o campo magnético interplanetário muda de "afastando-se do Sol" para "apontando para o Sol".
$S \rightarrow A$	- Troca de setor onde o campo magnético interplanetário muda de "apontando para o Sol" para "afastando-se do Sol".
$Sg(B_z)$	- Função que dá o sinal positivo ou negativo da componente B_z no sistema da magnetosfera.
$f(V, \alpha)$	- Função de distribuição das partículas com a velocidade e o ângulo de inclinação.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CMI	- Campo magnético interplanetário.
Cos	- Cosseno.
d.C.	- Depois de Cristo.
Dens.	- Densidade.
EMC	- Ejeção de matéria coronal
GSE	- Geos-Sun-Ecliptic system (sistema de cordenadas da Eclíptica).
GSM	- Geos-Sun-magnetosphere system (sistema de coordenadas da magnetosfera).
IS	- Incursão de setor de polaridade do campo magnético interplanetário.
ISEE-3	- International Sun-Earth Explorer-3 (Satélite).
NCDE	- Non-compressive density enhancement (elevação não compressiva de densidade).
Sec	- Secante.
Sen	- Seno.
Temp.	- Temperatura.
T.S.	- Troca de setor de polaridade do campo magnético interplanetário.
T.U.	- Tempo universal.
U.A.	- Unidade astronômica ($1,495978707 \times 10^8$ km).
Veloc.	- Velocidade.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com a utilização da bússola, inventada na China em torno do ano 1000 d.C., e rapidamente adotada pelos árabes e europeus, a humanidade começava a interessar-se de maneira mais consciente pelo fenômeno do geomagnetismo. Em 1600, Willian Gilbert, físico pessoal da rainha da Inglaterra Elizabeth I, discorreu sobre o que se sabia de magnetismo e eletricidade. Foi ele quem propôs o modelo de um campo magnético dipolar para a Terra. Mais tarde, em 1724, Grahams mostrava de uma forma definitiva a existência de perturbações irregulares intensas da agulha de uma bússola (hoje denominadas tempestades geomagnéticas). Enriquecendo a compreensão que se tinha sobre o campo geomagnético, Chapman e Ferraro, em torno de 1930, propuseram que uma nuvem de partículas eletricamente carregadas mas macroscopicamente neutra (uma nuvem de plasma solar) podia aproximar-se da Terra; contudo ficando excluída das regiões circunvizinhas da Terra pela ação do campo geomagnético dipolar. Essa região era denominada cavidade de Chapman-Ferraro. Esse modelo certamente conduzia a situações de interação Sol-Terra, podendo responder por perturbações do campo magnético terrestre e também por manifestações de outros fenômenos atmosféricos (Stern, 1989).

Em torno de 1960, confirmara-se a existência de um vento solar (um fluxo contínuo de partículas ejetado da coroa solar), como proposto por Parker. Pesquisadores notaram também que o campo magnético interplanetário tinha um significativo papel nessas interações Sol-Terra, em particular sua componente de norte para sul. Outro conceito que veio completar mais ainda o modelo da região magnética que circunda a Terra, atualmente denominada magnetosfera (termo introduzido por Gold em 1959), foi a corrente de anel. A idéia da corrente sugerida em 1910 por Carl Stoermer, foi mais tarde desenvolvida por Adolf Schmidt e Chapman-Ferraro. A corrente de anel constitui-se de um anel de partículas eletricamente carregadas que

circunda a Terra na região próxima ao equador magnético, e que é responsável pelas tempestades magnéticas observadas experimentalmente na superfície da Terra (Stern, 1989).

Atualmente, o modelo da magnetosfera é bem mais complexo em comportamento e detalhado em características (Stern, 1989; Cospas Plenary Meeting, 1988). A linha de pesquisa Magnetosfera, da Divisão de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, realiza estudos experimentais, teóricos e de simulações em computadores de processos físicos associados: (a) à interação do meio interplanetário com a magnetosfera; (b) à dinâmica da magnetosfera terrestre; (c) e à região magnetizada que circunda um planeta, cometa ou estrela onde se originam as magnetosferas. Contribuindo dentro de uma das principais pesquisas desse grupo, este trabalho apresenta o estudo sobre as tempestades geomagnéticas e o acoplamento energético do vento solar com a corrente de anel durante um máximo na atividade solar (1978-1979).

A Caracterização das tempestades geomagnéticas fora do regime das tempestades intensas, isto é, com índice Dst > -100 nT, apresenta uma grande complexidade. Como os resultados obtidos nos estudos das tempestades intensas não podem ser extrapolados com segurança para regime mais fraco, inicialmente caracterizou-se neste trabalho as tempestades moderadas.

A partir das tempestades moderadas identificadas e dispondo de dados interplanetários completos (situação rara), desenvolveu-se uma análise aprofundada tanto das origens interplanetárias quanto do desenvolvimento das tempestades na fase principal, permitindo obter resultados quantitativos.

Reavaliaram-se todos os possíveis fenômenos interplanetários que se relacionavam à criação ou intensificação da reconexão magnética, processo fundamental da produção de tempestades geomagnéticas. A compilação e caracterização das origens

interplanetárias e a análise de cada tempestade moderada permitiram descobrir, como resultado original, uma estrutura integrada e hierárquica dessas origens.

No estudo do acoplamento energético, com a definição de critérios para que o cálculo matemático se aproximasse o máximo possível do comportamento físico dos fenômenos magnetosféricos, identificaram-se valores básicos do comportamento da magnetosfera. Através da análise de várias funções de acoplamento energético na magnetopausa, determinaram-se aquelas que melhor representam esse acoplamento. Comprovou-se ainda que outros mecanismos devem atuar simultaneamente com o processo direto de transferência energética (driven process).

Desta forma, visando uma compreensão maior dos fenômenos que ocorrem na magnetosfera terrestre, foi desenvolvido este trabalho, cujos objetivos são:

- a) identificar as origens interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas ($-100 \text{ nT} \leq \text{Dst}_{\text{mín}} \leq -50 \text{ nT}$);
- b) entender o desenvolvimento dessas tempestades em sua fase principal.

No Capítulo 2 é feita uma revisão da teoria magnetosférica relacionada às tempestades geomagnéticas.

No Capítulo 3 são apresentados os dados experimentais e os cálculos efetuados. Os dados analisados são os dados de atividade geomagnética equatorial Dst e auroral AE, fornecidos pelo World Data Center, e as medidas experimentais contínuas obtidas pelo satélite americano ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer). Os cálculos foram obtidos com o desenvolvimento e aprimoramento de programas de computadores, permitindo obter todas as grandezas relacionadas com as

tempestades geomagnéticas e com as transferências de energia da magnetosfera para a corrente de anel.

No Capítulo 4 são identificadas as tempestades geomagnéticas moderadas e as suas origens interplanetárias. Obteve-se uma definição precisa dos regimes de tempestade, que, com a caracterização dos fenômenos interplanetários, permitiu realizar uma análise objetiva e a identificação das origens interplanetárias.

No Capítulo 5 é analisado o acoplamento energético vento solar-magnetosfera-corrente de anel durante a fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas. Utilizando funções representativas da taxa temporal de injeção de energia na magnetopausa e da taxa temporal de injeção de energia na corrente de anel, através da análise da relação dessas injeções, obtiveram-se resultados quantitativos para esse estudo do acoplamento energético.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e as sugestões para futuros estudos.

CAPÍTULO 2

TEORIA MAGNETOSFÉRICA RELACIONADA ÀS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Neste capítulo a magnetosfera é descrita em sua morfologia e dinâmica. Em seu interior existe a corrente de anel que é responsável pela ocorrência das tempestades geomagnéticas (Nishida, 1988). São apresentados a teoria da origem interplanetária das tempestades geomagnéticas, considerando o modelo da reconexão magnetosférica, os fenômenos do meio interplanetário que podem produzir tempestades e, finalmente, o acoplamento energético do vento solar com a magnetosfera através da magnetopausa, influenciando na corrente de anel.

2.1 - A MAGNETOSFERA

A Terra possui um campo magnético. O vento solar incidindo sobre esse campo interage com ele, estabelecendo uma região espacial dinâmica que envolve a Terra, denominada magnetosfera (Figura 2.1), onde os processos físicos são dominados pelo campo geomagnético (Nishida, 1978; Sugiura, 1969).

A magnetosfera, quanto às linhas do campo geomagnético, pode ser dividida em (Block, 1973):

- a) Região das linhas de campo fechadas - que são as linhas de campo cujas extremidades estão fixadas na superfície terrestre, descritas grosseiramente como linhas de campo de um dipolo magnético. Essa região é denominada magnetosfera interna.
- b) Região das linhas de campo abertas - que são as linhas de campo que não retornam para a Terra; mas que estão interligadas com o campo magnético interplanetário (CMI) transportado pelo vento solar.

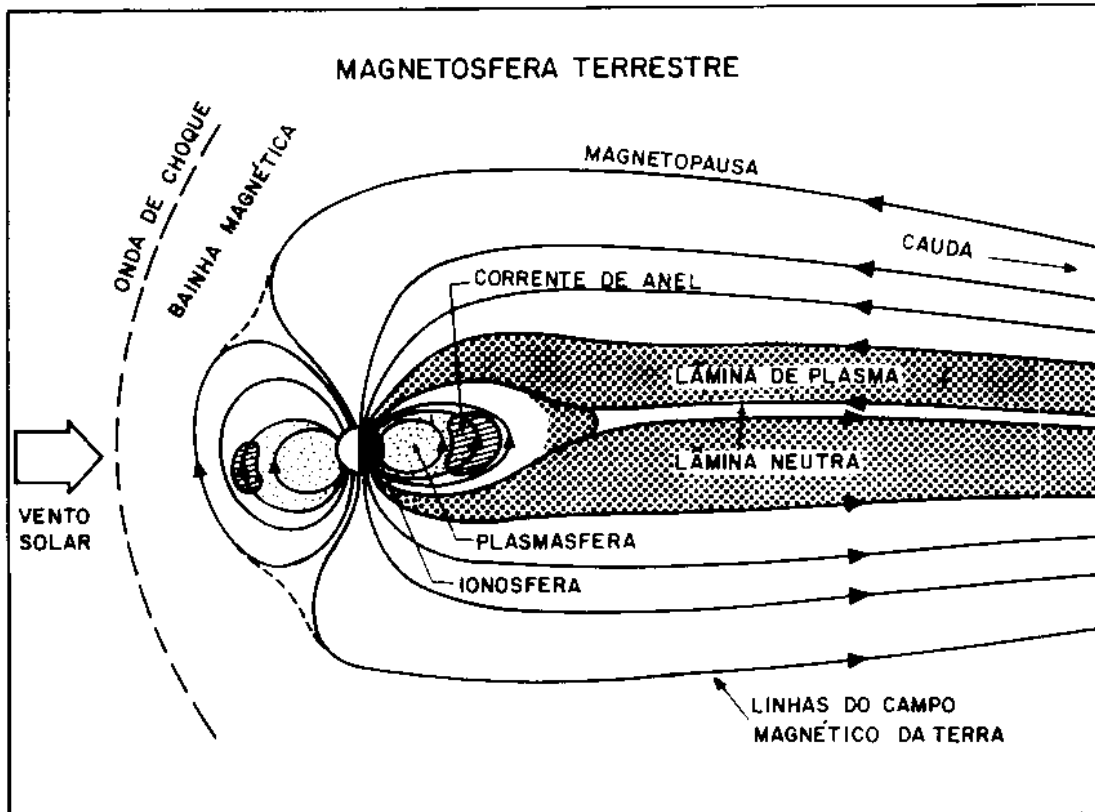


Fig. 2.1 - Uma visão simplificada das regiões que compõem e envolvem a magnetosfera terrestre.

Baseada em Lanzerotti e Uberoi (1988), p. 32.

Quanto às principais regiões espaciais, a magnetosfera pode ser dividida fundamentalmente em (Block, 1973; Nishida, 1978; Mendes Jr., 1985; Sugiura, 1969):

- a) Cauda magnetosférica - região caracterizada por uma deformação das linhas do campo geomagnético sob a influência do vento solar. É formada pelas linhas abertas do campo magnético. Ela estende-se para longe da Terra em sua porção noturna, atingindo de uma forma bem definida até pelo menos 80 raios terrestres; embora a sua existência já tenha sido constatada até 1000 raios terrestres (Sugiura, 1969).
- b) Lâmina neutra - região de fraco campo magnético próxima da Eclíptica, separando o campo que se aproxima da Terra na porção do hemisfério norte do campo que se afasta da Terra na porção do hemisfério sul. Nela existe uma região quase-laminar de corrente, denominada lâmina de corrente, constituindo uma interface que divide a cauda magnetosférica em 2 partes.
- c) Lâmina de plasma - região constituída de partículas com energias maiores que 100 eV, ocupando um volume maior que a lâmina de corrente e que se estende bem para dentro da magnetosfera, bifurcando até as regiões polares.
- d) Corrente de anel - corrente elétrica na forma toroidal localizada próxima ao equador geomagnético e que circunda a Terra.
- e) Plasmasfera - região das linhas de campo magnético fechadas em que o plasma co-rota com a Terra. O seu limite superior encontra-se aproximadamente na altura em que o plasma apresenta um grande decréscimo de densidade, reduzindo-se de aproximadamente 10^4 partículas/cm³ para cerca de 1 partícula/cm³. Normalmente essa altura é de 4 raios

terrestres; mas pode variar de 3 a 8 raios terrestres em função da atividade solar.

- f) Magnetopausa - fronteira exterior da magnetosfera, o limite entre o domínio do campo geomagnético e o domínio do CMI. Estima-se que a espessura da magnetopausa seja da ordem do raio ciclotrônico do íon, que sob condições típicas é aproximadamente de 100 km. A forma global da magnetosfera é determinada pelo equilíbrio de pressão entre o vento solar e o campo magnético da Terra. A estrutura do campo magnético no interior da magnetosfera depende do plasma na magnetosfera.

Envolvendo basicamente a parte frontal da magnetosfera, existem 2 regiões que apresentam comportamentos dinâmicos. A bainha magnética é uma região turbulenta fora da magnetopausa. É aquela parte do vento solar incidente fortemente afetada pela presença da magnetosfera. Nela, o fluxo de plasma e o campo magnético apresentam variados graus de irregularidades. A frente de onda, ou onda de choque, é a fronteira exterior da bainha magnética, onde o vento solar passa de uma velocidade super-alfvênica para sub-alfvênica. Considerando um modelo em que o choque oscila entre 2 posições extremas, estimou-se que a velocidade deve ser de 10 km/s ou menos e a amplitude média da oscilação deve ser de poucos milhares de quilômetros.

Neste estudo, outro aspecto relevante é o vento solar (Schwenn, 1988; Tóptygin, 1985). A região coronal do Sol apresenta-se tão quente que mesmo a enorme força gravitacional do Sol não consegue reter as partículas que a populam. Dessa forma, parte da coroa está constantemente "evaporando", isto é, escapando em um fluxo aproximadamente contínuo para longe do Sol, e forma o que então é denominado vento solar. A Tabela 2.1 (Tóptygin, 1985) apresenta os parâmetros característicos do vento solar calmo. Sua composição é de 96% de átomos de hidrogênio e 3,2% de átomos de hélio, na forma ionizada. Os constituintes minoritários que aparecem são O, N, C, Si e

o Fe em estados elevados de ionização. Esse plasma solar altamente condutor transporta consigo o campo magnético solar. Três formas básicas de injeção de plasma para o meio interplanetário podem ocorrer sobrepostas ao vento solar (Schwenn, 1988). A Figura 2.2 mostra de forma simplificada as regiões de ejeção de partículas na superfície solar. Nessa figura vêem-se regiões em que as linhas do campo magnético solar apresentam uma só polaridade, isto é, uma só orientação, e regiões em que elas fecham-se na superfície solar. A zona de convecção é a região de movimento turbulento de massas em que o mecanismo principal de transporte de energia é o de convecção. A cromosfera é a região de tom avermelhado com aproximadamente 15.000 km de espessura acima da zona de convecção. A coroa estende-se até pelo menos 2.000.000 km do Sol, distingue-se pelas flâmulas (streamers) que podem ser vistas para fora cobrindo a distância de vários raios solares. As proeminências são expansões do CMI com transporte de matéria. A linha neutra é uma interface entre os campos de polaridades opostas. Quanto às ejeções de matéria, os feixes muito rápidos (high speed streams), com velocidade de aproximadamente 600 km/s, são provenientes de regiões do Sol em que as linhas do campo magnético são abertas. Os feixes lentos (slow speed streams), com aproximadamente 300 km/s, são provenientes de uma região de linhas abertas mas acima de linhas de campo magnético fechadas e ancoradas abaixo da cromosfera, caracterizando as flâmulas (helmet streamers), associadas basicamente às regiões ativas do Sol, tais como manchas solares. Ocorrem ainda, em qualquer das regiões da superfície, ejeções de plasma provenientes de transientes na atmosfera solar.

TABELA 2.1 - PROPRIEDADES OBSERVADAS E CALCULADAS DO VENTO SOLAR

VALORES OBSERVADOS:	
Velocidade de fluxo.....	320 km/s
Densidade de prótons e elétrons (NH)...	8 partículas/cm ³
Temperatura dos prótons.....	4 x 10 ⁴ K
Taxa anisotrópica térmica dos prótons..	1,9
Temperatura dos elétrons.....	1-1,5 x 10 ⁵ K
Taxa anisotrópica térmica dos elétrons.	1,1
Campo de indução magnética.....	5 nT
Proporção de hélio (NHE/NH).....	0,05
Fluxo de condução térmica (total).....	0,001 erg/cm ² s
VALORES CALCULADOS:	
Fluxo de prótons.....	2 x 10 ⁸ /cm ² s
Fluxo de energia cinética.....	0,22 erg/cm ² s
Densidade de energia térmica.....	7 x 10 ⁻¹⁰ erg/cm ³
Densidade de energia térmica dos prótons.....	6 x 10 ⁻¹¹ erg/cm ³
Densidade de energia térmica dos elétrons.....	1,5 x 10 ⁻¹⁰ erg/cm ³
Densidade de energia do campo magnético	10 ⁻¹⁰ erg/cm ³
β_{ions} (parâmetro magnético do plasma)..	$\approx 0,3$
$\beta_{\text{elétrons}}$ (parâmetro magnético do plasma).....	$\approx 1,0$
VARIABILIDADE EM 1 U.A.:	
Velocidade do fluxo.....	275-800 km/s
Densidade.....	1-50 partículas/cm ³
Temperatura dos prótons.....	< 3 x 10 ⁴ a 5 x 10 ⁵ K
taxa anisotrópica térmica dos prótons..	1 a 3
Temperatura dos elétrons.....	1 a 2 x 10 ⁵ K
Proporção de hélio (NHE/NH).....	0,01 a 0,20

FONTE: Burlaga (1971), p. 603.

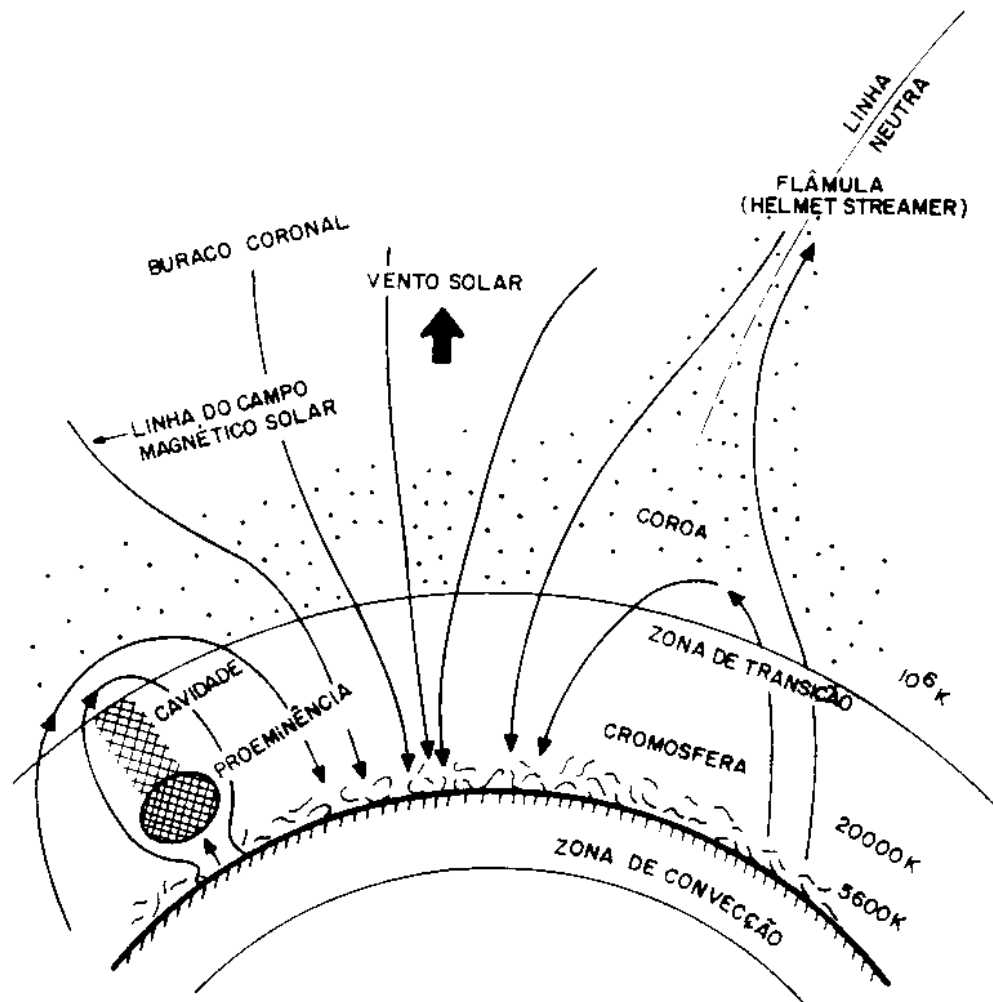


Fig. 2.2 - Uma visão simplificada das regiões de ejeção de partículas na superfície solar.

Baseada em Schwenn (1988), p. 17.

2.2 - A CORRENTE DE ANEL E AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Os magnetogramas, registros temporais gráficos da intensidade do campo geomagnético na superfície da Terra, mostram uma diminuição global na componente horizontal do campo geomagnético em latitudes média e baixa, caracterizando as tempestades geomagnéticas. Os satélites, por sua vez, nesse mesmo momento indicam uma variação na densidade, composição, localização e energia das partículas em regiões próximas à Terra, aproximadamente a 4-6 raios terrestres. Essas observações experimentais na superfície da Terra, através de magnetômetros, e "in situ", através de satélites, comprovam a existência de uma distribuição de corrente em torno da Terra, aproximadamente na região do equador geomagnético.

Essa corrente, denominada corrente de anel, é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas em torno da Terra, devido a distribuições de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. A perturbação do campo geomagnético gerada por essa corrente reflete a condição do campo magnético interplanetário que controla o suprimento de energia para o interior da magnetosfera (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978).

A resposta da magnetosfera ao vento solar é complexa e ocorre através de diversos processos físicos. O índice denominado Dst, calculado a partir de magnetogramas obtidos de estações terrestres de latitudes média e baixa, foi definido com a finalidade de se estimar o nível da atividade magnetosférica e tem sido amplamente utilizado.

2.2.1 - TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

As tempestades geomagnéticas, analisadas a partir do índice Dst, comumente apresentam 3 fases: (i) um início súbito (sudden commencement) e/ou uma fase inicial (initial phase); (ii) uma fase

principal (main phase); e (iii) uma fase de recuperação (recovery phase). A Figura 2.3 apresenta uma tempestade típica.

Os estudos realizados anteriormente estabeleceram evidências de que essas fases são geradas por processos físicos distintos. As relações entre as várias fases de uma tempestade geomagnética e o vento solar vêm sendo entendidas qualitativamente. Em geral, aceita-se que o início súbito e/ou fase inicial estão associados a aumentos da pressão dinâmica (incidência de partículas) do vento solar, que comprime a magnetosfera. A intensidade dessa perturbação no campo geomagnético seria proporcional à raiz quadrada da pressão dinâmica. Essa perturbação é gerada pelas correntes que fluem na magnetopausa e causam um aumento do campo na superfície da Terra. A fase principal, que é caracterizada por uma redução da intensidade do campo na superfície terrestre, está associada primariamente à existência e à manutenção de uma componente, no referencial da magnetosfera, com orientação norte-sul do CMI. Essa redução do campo estaria associada a intensificação da corrente de anel. A fase de recuperação de uma tempestade, caracterizada pela diminuição e eliminação gradual da depressão, estaria associada a um decréscimo ou extinção da componente sul do campo magnético interplanetário, passando a predominar os processos de perda da corrente de anel. A taxa temporal da recuperação estaria relacionada com a magnitude do índice Dst. Note-se que o início súbito e a fase inicial nem sempre ocorrem, pois originam-se basicamente de fenômenos independentes da fase principal de uma tempestade. Finalmente, muitos aspectos da relação das fases de uma tempestade com os parâmetros interplanetários e magnetostéricos necessitam ainda ser investigados (Akasofu e Chapman, 1972; Akasofu e Fry, 1986; Burton et al., 1975; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978).

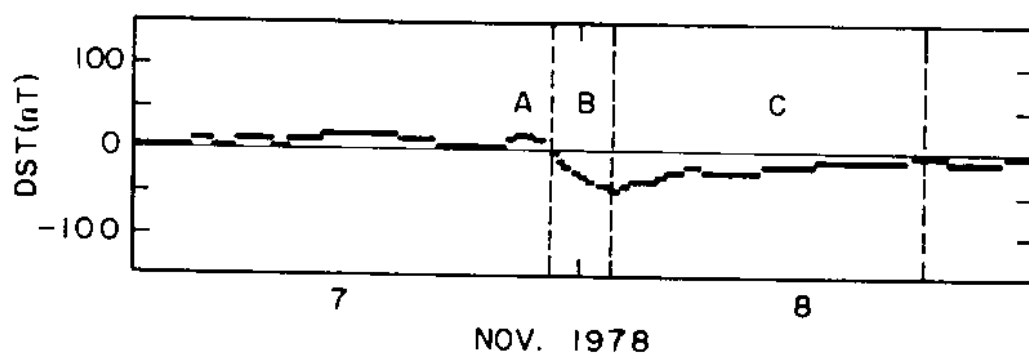


Fig. 2.3 - Tempestade geomagnética ocorrida nos dias 7 e 8 de novembro de 1978.

- O índice Dst, perturbação no campo geomagnético devido à corrente de anel, é obtido do "World Data Center". Indicam-se a fase inicial (A), a fase principal (B) e a fase de recuperação (C).

2.2.2 - O ÍNDICE DST

O índice Dst informa sobre o campo magnético criado pela corrente de anel e, por conseguinte, a sua energia cinética total. Atualmente, o índice Dst está baseado nas médias horárias da componente horizontal H do campo magnético obtido em 4 observatórios de latitudes média e baixa: Hermanus, Honolulu, Kakioka e San Juan. A Figura 2.4 (Sugiura, 1964) apresenta a localização das estações no mapa-múndi. Os 4 observatórios estão afastados de 20° a 30° do equador geomagnético. Na figura, mostra-se o equador-"dip", que é definido como a linha na superfície da Terra em que o campo geomagnético medido apresenta somente a componente horizontal. A Tabela 2.2 (Sugiura, 1964) apresenta as coordenadas geomagnéticas e geográficas de localização das estações. Essas estações, uniformemente distribuídas em longitude, foram escolhidas por estarem localizadas em latitudes que eliminam em grande parte as influências das correntes do eletrojato auroral e do eletrojato equatorial. Contudo, as correntes que fluem na magnetopausa e na cauda magnetosférica contribuem para a atividade magnética identificada pelo índice Dst. Contribuem ainda para uma incerteza no índice Dst a assimetria em hora local da corrente de anel e a bifurcação das correntes que geram as subtempestades magnéticas e que fecham um circuito elétrico na região auroral. A Figura 2.5a (Szuszczewicz, 1984) mostra a configuração da magnetosfera e as correntes que nela circulam. A Figura 2.5b (Baker et al., 1984) apresenta uma visão simplificada das correntes que se acoplam à Terra. Ressalta-se ainda que a corrente na magnetopausa é regida pela pressão do vento solar e o maior valor da sua perturbação magnética é em torno do meio-dia local. A corrente da cauda magnetosférica ainda precisa ser melhor estudada, pois não existem ainda modelos quantitativos satisfatórios.

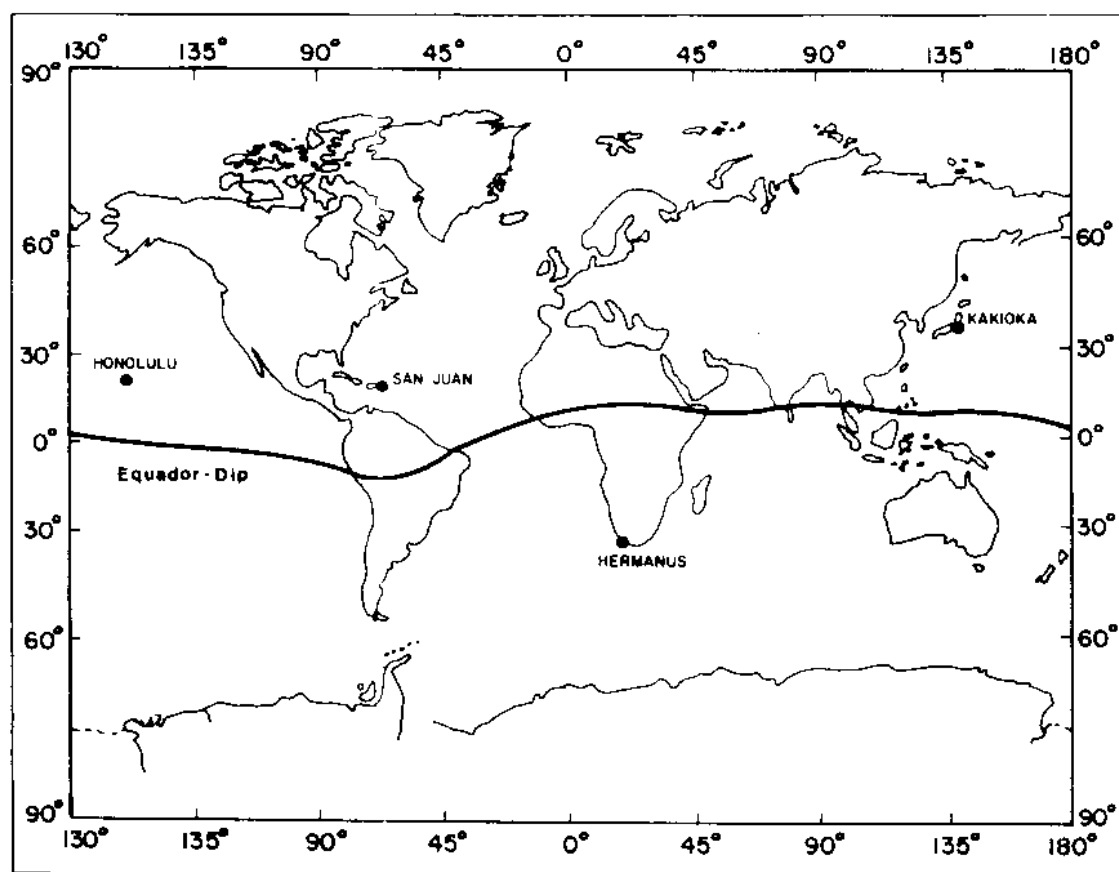


Fig. 2.4 - Posições das estações de medidas do campo magnético na superfície terrestre utilizadas no cálculo do índice Dst. Baseada em Sugiura (1964), p. 11.

- Equador-"dip" é a região na superfície da Terra em que o campo geomagnético tem apenas a componente horizontal H.

TABELA 2.2 - ESTAÇÕES DE MEDIDAS DO CAMPO MAGNÉTICO
UTILIZADAS NO CÁLCULO DO ÍNDICE DST

ESTAÇÃO	Coorden. Geomagn.		Coorden. Geograf.	
	LATITUDE	LONGITUDE (E)	LATITUDE	LONGITUDE (E)
Hermanus	S 33,3°	80,3°	S 34°25'	19°13'
Kakioka	N 26,0°	206,0°	N 36°14'	140°11'
Honolulu	N 21,0°	266,4°	N 21°18'	201°54'
San Juan	N 29,9°	3,2°	N 18°23'	293°53'

Baseada em Sugiura (1964), p. 10.

OBS.: Estações apresentadas em ordem crescente de longitude geográfica - para Leste.

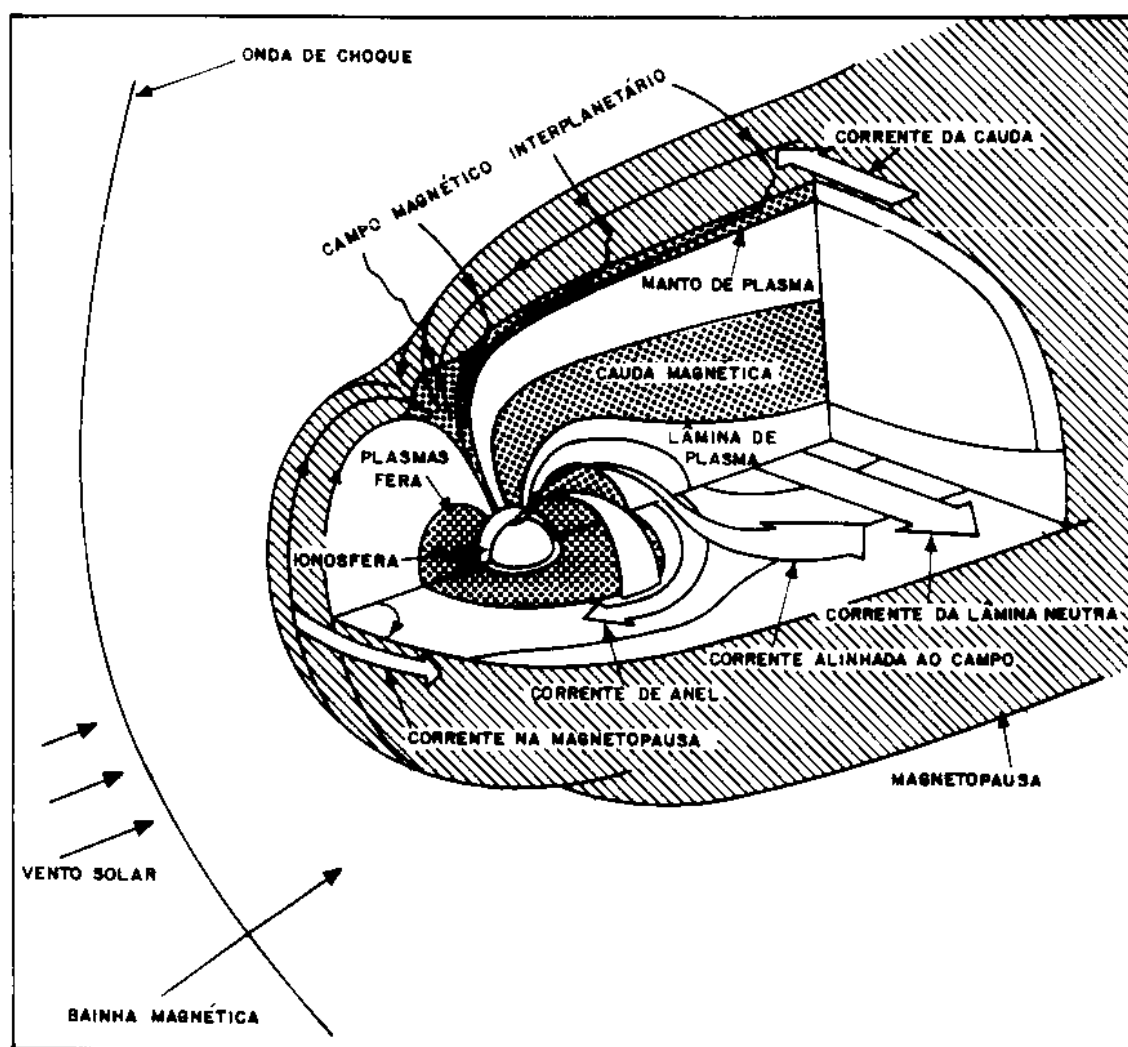


Fig. 2.5a - Configuração da magnetosfera e correntes elétricas que nela circulam.

Baseada em Szuszczewicz (1984), p. c-3.

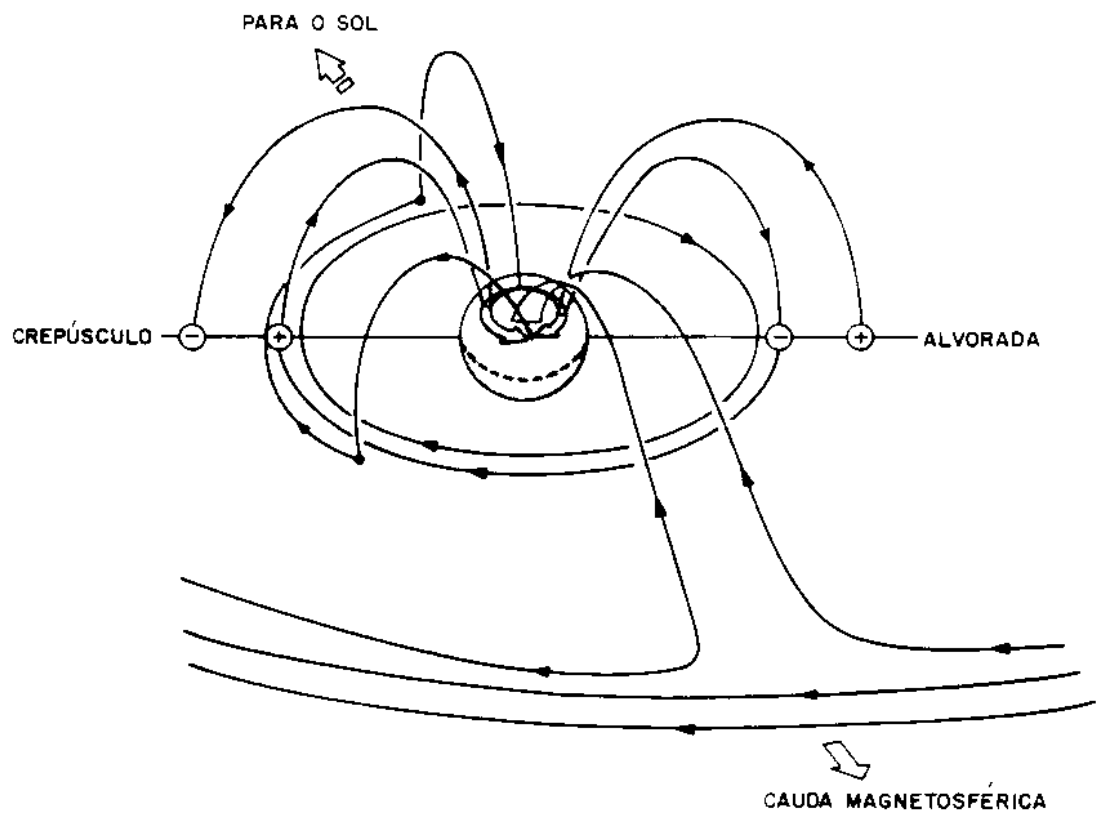


Fig. 2.5b - Esquema simplificado dos acoplamentos de correntes elétricas no interior da magnetosfera.

FONTE: Baker et al. (1984), p. 8-14.

O índice Dst pode ser determinado continuamente como uma função do tempo universal independentemente da ocorrência de tempestades geomagnéticas. O índice Dst então determinado converte-se em uma medida da atividade geomagnética (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972; Sugiura, 1964).

Apresenta-se a seguir o método de obtenção do índice Dst (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972; Sugiura, 1964). Na i -ésima estação, o campo magnético horizontal H^i observado no tempo universal t pode ser considerado como a soma do campo permanente H_o^i (incluindo a variação secular), a variação diária solar Sq^i , a variação diária lunar L^i e uma perturbação D^i , podendo ser escrito como:

$$H^i(t) = H_o^i(t) + Sq^i(t) + L^i(t) + D^i(t). \quad (2.1)$$

A variação lunar, por ser pequena, foi subseqüentemente desprezada. O valor médio de $H^i(t)$ é calculado sobre cada ano e denominado H_{oo}^i . A contribuição do campo permanente $H_o^i(t)$ pode ser escrita, conforme sugestão feita na análise dos dados do Ano Internacional Geofísico 1957-1958 (Sugiura, 1964), como:

$$H_o^i(t) = H_{oo}^i + \Delta H_o^i(t). \quad (2.2)$$

Tomando agora o desvio do valor observado $H^i(t)$ de H_{oo}^i , com:

$$\Delta H^i(t) = H^i(t) - H_{oo}^i, \quad (2.3)$$

e tomando a média de cada parâmetro sobre todas as estações, tem-se:

$$\langle \Delta H(t) \rangle = \langle \Delta H_o(t) \rangle + \langle Sq(t) \rangle + \langle D(t) \rangle. \quad (2.4)$$

A parcela $\langle Sq(t) \rangle$ pode ser determinada da seguinte maneira. Em cada estação, para os 5 dias calmos internacionais, a variação média de 24 horas a partir da meia-noite em tempo universal (reestruturada mais

adiante) foi subtraída de cada um dos 25 valores médios horários; a variação entre 2 valores consecutivos (meias-noites) foi suposto ser linear. Os 25 valores médios horários alterados representam a variação Sq em cada estação e os valores horários foram promediados sobre todas as estações para produzir o valor Sq médio. Esse Sq médio foi expandido em uma série de fourier dupla com o número do mês M e o tempo universal t como variáveis, assim:

$$\langle Sq \rangle = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=1}^6 A_n^m \cos(m.t + \alpha_m) \cdot \cos(n.M + \beta_n), \quad (2.5)$$

e para cada dia um Sq médio foi sintetizado dessa série. Em cada dado instante t, o valor de Sq assim obtido definia $\langle Sq(t) \rangle$.

Diferentes técnicas estão agora sendo utilizadas na obtenção do nível de referência da linha de base e da variação do Sq no cálculo do índice Dst. Atualmente, o nível de referência é obtido pela expansão do valor da linha de base em uma série de potências no tempo, onde os coeficientes para os termos até o termo quadrático são determinados pelo método dos mínimos quadrados e as médias anuais do H são usadas para os 5 dias calmos internacionais de cada mês. Dessa maneira o efeito das variações seculares é removido através do cálculo do valor médio anual de H. Em adição a essa modificação, a contribuição Sq é agora determinada em cada estação (como já descrito nesta secção). No entanto, o valor de Sq subtraído é estabelecido para cada estação separadamente antes da promediação sobre as estações que contribuem. Além do mais, a mudança não-cíclica em Sq é agora removida supondo ser ela linear da meia-noite em hora local até a meia-noite seguinte em hora local durante os dias calmos internacionais.

Para os dados do Ano Geofísico Internacional, a quantidade $\langle \Delta H(t) - Sq(t) \rangle$ (= $\langle \Delta H_0 \rangle + \langle D(t) \rangle$) foi calculada, permanecendo próxima de um nível fixo durante os períodos calmos. Isso significava que as variações seculares foram quase totalmente

eliminadas no tratamento das médias e, portanto, $\langle \Delta H_0(t) \rangle$ foi suposto ser constante. Essa constante estabelece o nível zero para o índice Dst.

Todos os dias calmos em que 2 ou mais dias sucessivos tinham o índice ap (relacionado às correntes que fluem na ionosfera) não excedendo a 7 foram selecionados, e a quantidade $\langle \Delta H(t) - \langle Sq(t) \rangle \rangle$ ($= \langle \Delta H_0 \rangle + \langle D(t) \rangle$) foi promediada sobre todos esses dias calmos escolhidos. Essa média, que resultou em 31 nT, foi considerada como a constante $\langle \Delta H_0 \rangle$.

Desde que as estações estão todas em torno de baixas latitudes e distribuídas quase uniformemente em longitude, $D(t)$ pode ser assumido como $Dst(t)$, desconsiderando uma pequena perturbação D_s devida à interferência de outras fontes.

Essas considerações permitem descrever operacionalmente o índice Dst como:

$$Dst(t) = \langle H(t) - H_{00} \rangle - \langle Sq(t) \rangle - \langle \Delta H_0 \rangle. \quad (2.6)$$

O valor do índice Dst foi normalizado para o equador magnético após ter sido multiplicado por $\sec(\theta_m)$, onde θ_m é a latitude geomagnética média dos observatórios cujos dados são utilizados. Esse valor normalizado é agora o índice Dst equatorial (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972; Sugiura, 1964).

2.2.3 - A ORIGEM DA CORRENTE DE ANEL

Quando o CMI é no sentido norte-sul (isto é, essencialmente oposto ao campo geomagnético), ocorre a reconexão das linhas magnéticas, processo dinâmico em que as partículas do vento solar são injetadas no interior da magnetosfera. Na magnetosfera é gerado também um campo elétrico com orientação alvoreada-crepúsculo, denominado campo elétrico de convecção. As partículas eletricamente

carregadas são então dirigidas da cauda magnetosférica para a Terra em virtude de um movimento de deriva eletromagnética. Ao se aproximarem da Terra, as partículas ficam sujeitas também à influência de um campo elétrico de co-rotação, que surge no referencial fixo com respeito à magnetosfera devido à rotação da Terra, e às influências do gradiente na intensidade e da curvatura das linhas do campo geomagnético. Devido a todos esses efeitos, se o movimento das partículas for analisado na aproximação do centro-de-guia, verifica-se que as partículas eletricamente carregadas existentes no interior da magnetosfera ficam sujeitas a alguns movimentos de deriva. O campo elétrico de convecção as desloca na direção da Terra e os outros efeitos as distribuem em torno da Terra.

Esses movimentos de deriva podem produzir correntes elétricas. Parte dessas partículas distribue-se em torno da Terra, compondo a corrente de anel, e parte dá origem a correntes que interligam a magnetopausa e a cauda magnetosférica com a ionosfera. As correntes geradas, de interesse, são fundamentalmente devidas ao gradiente na intensidade do campo geomagnético, à curvatura do campo e ao efeito giro-ciclôtrônico interior de uma distribuição de partículas

No formalismo hidromagnético, a densidade de corrente devida apenas ao gradiente e à curvatura pode ser expressa como (Lyons e Williams, 1984):

$$\mathbf{J}_D = \frac{\mathbf{B}}{B^2} \times \left[\frac{P_{\perp}}{B} \nabla B + \frac{P_{\parallel}}{B^2} \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} \right], \quad (2.7)$$

e a densidade de corrente devida ao efeito giro-ciclotrônico no interior de uma distribuição como:

$$\mathbf{J}_C = \frac{\mathbf{B}}{B^2} \times \left[\nabla P_{\perp} - \frac{P_{\perp}}{B} \nabla B - \frac{P_{\perp}}{B^2} \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} \right], \quad (2.8)$$

onde definem-se as pressões paralela e perpendicular às linhas de campo magnético, respectivamente, como:

$$P_{\parallel} = \int_V \mathcal{M} V^2 \cos^2(\alpha) f(V, \alpha) d^3V \quad (2.9)$$

e

$$P_{\perp} = \frac{1}{2} \int_V \mathcal{M} V^2 \sin^2(\alpha) f(V, \alpha) d^3V. \quad (2.10)$$

As Equações 2.9 e 2.10 são integrais sobre a velocidade. Têm-se que B é o campo magnético (neste caso, igual ao campo geomagnético B_0), $\mathcal{M}$ é a massa das partículas, V é a velocidade das partículas, α é o ângulo de inclinação da velocidade com respeito ao campo geomagnético (pitch angle) e $f(V, \alpha)$ é a função de distribuição das partículas com a velocidade e o ângulo de inclinação (Lyons e Williams, 1984).

Na Figura 2.6 (Lyons e Williams, 1984) apresenta-se o mecanismo de produção de corrente elétrica associada ao movimento giro-ciclotrônico na distribuição das partículas. Há uma corrente líquida devida ao estreitamento das órbitas ciclotrônicas na concavidade das linhas e, também, uma corrente líquida devida ao gradiente de pressão das partículas, explicada pela densidade.

A densidade da corrente total, que é perpendicular ao campo magnético na corrente de anel, é dada por (Lyons e Williams, 1984):

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_D + \mathbf{J}_C = \frac{\mathbf{B}}{B^2} \times \left[\nabla P_{\perp} + \frac{P_{\parallel} - P_{\perp}}{B^2} \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} \right]. \quad (2.11)$$

A corrente resultante devida à distribuição das partículas aprisionadas em um campo magnético não depende do gradiente do campo. Dos 3 termos de pressão do lado direito da Equação 2.11, o 1º termo é devido ao gradiente de pressão das partículas, o 2º devido à deriva produzida pela curvatura das linhas de campo e o 3º devido ao estreitamento das órbitas ciclotrônicas na concavidade das linhas. A deriva eletromagnética, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, onde $\mathbf{E}$ é um campo elétrico e $\mathbf{B}$ é um campo magnético, não gera corrente elétrica mas modifica a geometria com que a corrente se distribui. É necessário um processo iterativo de cálculo para uma determinação acurada das perturbações do campo geomagnético produzido por uma distribuição de partículas (Akasofu e Chapman, 1972; Lui et al., 1987; Lyons e Williams, 1984; McEntire et al., 1985; Nishida, 1978; Williams, 1987).

A Equação 2.11 permite a obtenção de uma corrente elétrica distribuída na forma de um toróide, envolvendo a Terra basicamente na região equatorial (latitude $\leq 30^\circ$), denominada corrente de anel. A parte externa (longe da Terra) da corrente é de leste para oeste e a parte interna (próxima à Terra) é de oeste para leste. Essa distribuição de corrente é representada na Figura 2.7 (Nishida, 1978).

A existência permanente da corrente de anel surge de uma presença perpétua de partículas carregadas aprisionadas na magnetosfera e seu conseqüente movimento de deriva no campo geomagnético (Lui et al., 1987; Young, 1983). O campo magnético que resulta desse sistema de correntes age de forma a reduzir o campo geomagnético de baixa latitude na superfície, devido ao efeito da corrente para oeste que é predominante (Akasofu e Chapman, 1972; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978).

Durante a fase principal, a depressão observada na componente horizontal do campo magnético em latitudes baixas não é axialmente simétrica, sendo a depressão mais profunda no lado vespertino do que no lado matutino, em hora local. A assimetria foi confirmada através de medidas feitas por satélites (por exemplo: Explorer 26 e OGO-2) como tendo origem na própria magnetosfera e não na ionosfera. Atribuiu-se a assimetria na depressão magnética à forma com que as partículas injetadas, provenientes da cauda magnetosférica progridem em seu movimento. Até as partículas injetadas entrarem nas órbitas de aprisionamento e envolverem circularmente a Terra, a corrente de anel não se fecha em si mesma; mas sim forma uma corrente de anel parcial, fechando o circuito via ionosfera auroral (consultar a Figura 2.5b).

A assimetria na depressão do campo magnético em diferentes horas locais torna-se reduzida e a corrente tende a se tornar simétrica quando a tempestade magnética entra na fase de recuperação após o mínimo do índice Dst ser alcançado. O circuito de correntes não fecha mais com a parte ionosférica. Em termos de dinâmica das partículas injetadas, supõe-se que a simetrização da corrente de anel ocorra quando a injeção de partículas termina e as partículas aprisionadas, devido ao enfraquecimento do campo elétrico de convecção, circundam a terra (Akasofu e Chapman, 1972; Glockler et al., 1985; Lui et al., 1987; Lyons e Williams, 1984; McEntire et al., 1985; Nishida, 1978; Williams, 1987).

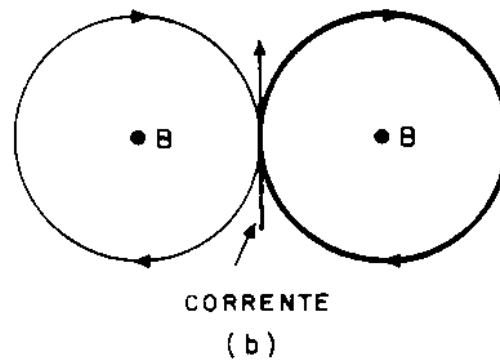
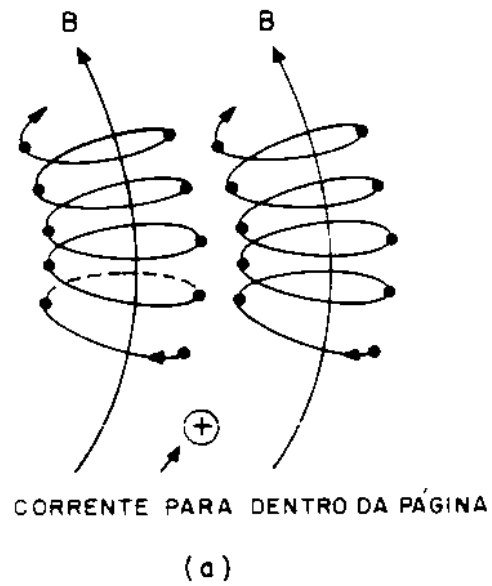


Fig. 2.6 - Mecanismo de geração da corrente elétrica associado ao movimento giro-ciclotrônico em uma distribuição de partículas em um campo magnético.

Baseada em Lyons e Williams (1984), p.44.

- (a) correntes líquidas devidas ao estreitamento das órbitas ciclotrônicas na concavidade das linhas e
- (b) correntes devidas ao gradiente de pressão das partículas, isto é, da densidade.

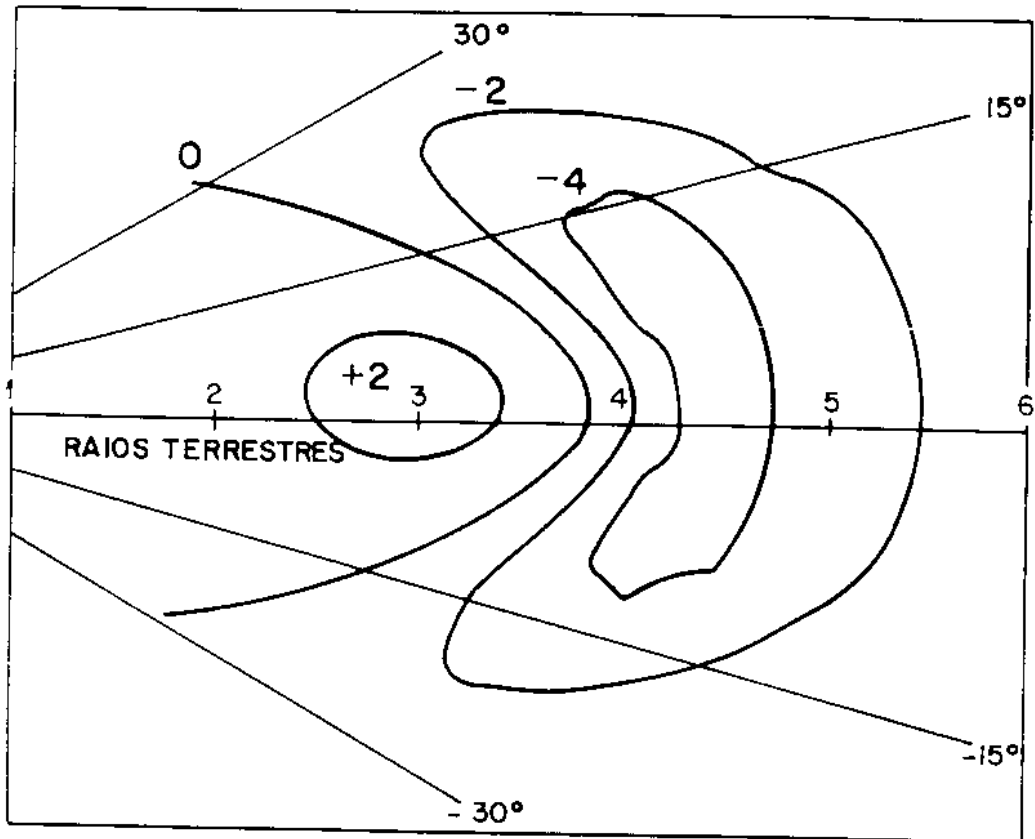


Fig. 2.7 - Modelo da distribuição da corrente de anel em distância radial e em latitude.

FONTE: Nishida (1978), p. 162.

- Na parte distante da Terra, a corrente é de leste para oeste (-) e na parte próxima é de oeste para leste (+). A densidade de corrente é dada em unidades de 3×10^{-9} A/m.

A corrente de anel se distribui radialmente de baixos valores de L (≈ 2 , onde L é o parâmetro magnético de McIlwain) para valores maiores. Em baixos L ($\approx 1,5$ a $3,5$), a corrente apresenta orientação para leste. Isto deve ocorrer por causa do gradiente radial da pressão perpendicular, $\nabla P_{\perp}$, apontar para longe da Terra e do domínio da corrente devido ao gradiente de pressão sobre a corrente de curvatura. A corrente para leste durante tempestades tem intensidade similar à corrente em condição calma, embora, no período perturbado, a corrente para leste estenda-se para valores maiores de L . Além de $L \approx 6$, a densidade da corrente de anel é muito sensível às injeções nos eventos de subtempestades, que são atividades magnéticas relacionadas à injeção de partículas na região auroral, frequentemente observadas em valores maiores de L (McEntire et al., 1985).

Durante a fase principal de uma tempestade, a fronteira interior da corrente de anel parece encontrar-se dentro da plasmasfera (Gringauz, 1983). Durante uma tempestade, o máximo na distribuição radial da densidade da corrente de anel desloca-se para a Terra, afastando-se lentamente durante a fase de recuperação. Em seu contorno mais interno, a corrente de anel já foi constatada experimentalmente até $L \approx 2$ (Hamilton et al., 1988; Young, 1983).

2.2.4 - A ESTRUTURA DINÂMICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CORRENTE DE ANEL

Para se falar da intensificação e do decaimento da corrente de anel, é necessário ainda fazer considerações sobre as fontes de partículas e a composição. Atualmente análises mais sofisticadas estão sendo feitas a partir de dados coletados de satélites. Essas medidas "in situ" vão permitir responder com mais detalhes a perguntas básicas como: qual a composição da corrente de anel, qual a sua localização e morfologia, quais as fontes reais dessas partículas, como elas são injetadas na corrente e quais os processos de perdas da corrente de anel. Ainda que rudimentarmente, respostas começam a ser apresentadas (Akasofu e Chapman, 1972; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978; Williams, 1987).

As fontes primárias das partículas que compõem a corrente de anel são o vento solar e a ionosfera e como fontes secundárias, provavelmente, a lâmina de plasma e a plasmafera (Akasofu e Chapman, 1972; Gloeckler et al., 1985; Hamilton et al., 1988; Lui et al., 1987; Lyons e Williams, 1984; McEntire et al., 1985; Nishida, 1978; Shelley et al., 1985; Williams, 1981, 1987; Young, 1983).

As formas de injeção atualmente concebidas são fundamentalmente: (a) a injeção de partículas da cauda magnetosférica na direção da Terra devida à deriva de convecção (decorrente do campo elétrico de convecção) e (b) o fluxo de íons energéticos (≤ 10 keV) da ionosfera auroral para as regiões superiores da magnetosfera interna. Todavia para esse processo ser eficaz é necessário conceber um processo da distribuição no ângulo de inclinação para as partículas desses feixes (Akasofu e Chapman, 1972; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978).

O intervalo de energia onde a maior parte da densidade energética dos íons está localizada é de 20 a 200 keV. Abaixo de uns poucos keV, as partículas obedecem à deriva eletromagnética que não produz corrente líquida. Acima de 200 keV, a injeção de novas partículas dentro da corrente de anel não é significativa (Hamilton et al., 1988; McEntire et al., 1985; Young, 1983).

Deve-se esperar que a taxa de composição varie com cada tempestade magnética, apresentando uma dependência com a história da atividade magnetosférica. Imagina-se que variações em escalas temporais mais largas tais como o ciclo solar sejam responsáveis pelas variações intrínsecas tanto na ionosfera quanto no vento solar. Sabe-se também que a abundância relativa dos íons da corrente de anel provenientes do vento solar comparada com os de origem ionosférica aumenta com o aumento no valor de L, o que pode indicar diferentes pontos de entrada dos íons que se originam nas 2 fontes (Gloeckler et al., 1985; Shelley et al., 1985; Young, 1983; Williams, 1987). A

Figura 2.8 (Williams e Sugiura, 1985) apresenta um gráfico da densidade de energia integrada da corrente de anel e as fontes prováveis obtidas durante a órbita do satélite CCE (Charge Explorer Composition) em 4 de setembro de 1984, coincidente com uma tempestade geomagnética.

Os íons detectados que contribuem para a corrente de anel são: $O^{+1,2}$, $O^{+5,6,7}$, H^+ , $He^{+1,2}$, N^+ , NO^+ , C , Si^{+4} e Fe^{+9} (Akasofu e Chapman, 1972; Gloeckler et al., 1985; Hamilton et al., 1988; Lui et al., 1987; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978; Young, 1983; Williams, 1981, 1987). Os íons atribuídos à fonte solar são: $O^{+5,6,7}$, He^{+2} , H^+ , Si^{+4} e Fe^{+9} (Gloeckler et al., 1985; Lui et al., 1987; Shelley et al., 1985; Williams, 1987). Os íons atribuídos à fonte ionosférica são: $O^{+1,2}$ e He^+ (Gloeckler et al., 1985; Lui et al., 1987; Shelley et al., 1985; Young, 1983; Williams, 1987). A corrente de anel em período calmo consiste basicamente de prótons H^+ , com contribuições de O^+ , He^+ e He^{++} (Gloeckler et al., 1985; Hamilton et al., 1988). Parece que a fonte do vento solar na corrente de anel predomina em período calmo; embora contribuições do H^+ ionosférico comparáveis com o H^+ do vento solar não possam ser descartadas (Gloeckler et al., 1985; Hamilton et al., 1988). Os estados de carga iônica mais baixos associam-se a fontes ionosféricas, como por exemplo: $O^{+1,2}$ (Lui et al., 1987; Williams, 1987) e os mais altos ao vento solar, como por exemplo: $O^{+5,6,7}$ (Lui et al., 1987; Williams, 1987). O tempo de vida de cada constituinte, que afeta o decaimento da corrente de anel, ainda precisa ser bem caracterizado. Por exemplo, O , C e N parecem apresentar um tempo de vida curto (McEntire et al., 1985; Young, 1983). Aparentemente, a predominância dos prótons sobre os íons de oxigênio na população da corrente de anel é típica para tempestades durante o mínimo solar (Lui et al., 1987).

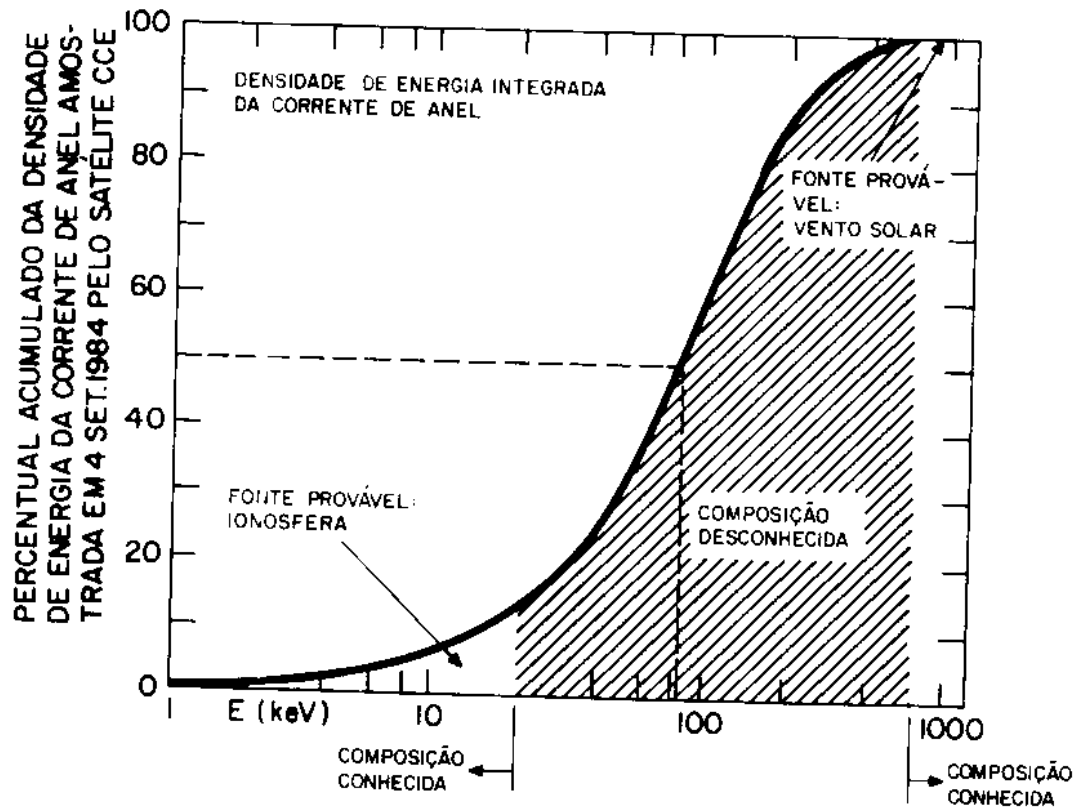


Fig. 2.8 - Densidade de energia integrada da corrente de anel e as fontes prováveis obtidas durante a órbita do satélite CCE (charge Explorer Composition) em 4 de setembro de 1984, coincidente com uma tempestade geomagnética. Baseada em Williams e Sugiura (1985), p 305.

Desde que a injeção das partículas energéticas dentro da magnetosfera interna representa uma das consequências da transferência da energia do vento solar para a magnetosfera terrestre, a taxa de crescimento da corrente de anel, que se associa à fase principal da tempestade magnética, deve depender da taxa de reconexão (união de linhas magnéticas do campo magnético) na magnetosfera diurna (Akasofu e Chapman, 1972; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978).

A fase de recuperação de uma tempestade está relacionada com o decaimento da corrente de anel. O decaimento é devido as perdas das partículas da corrente de anel através de 3 processos básicos conhecidos até o momento:

- a) O processo da perda de íons por troca de cargas elétricas. A partícula energética assim neutralizada não sofre mais a influência do campo magnético e escapa da região da corrente de anel. Vale ressaltar que uma técnica atual, em desenvolvimento, para localizar a região da corrente de anel é o monitoramento das fontes de átomos neutros energéticos gerados por trocas de cargas.
- b) O processo da precipitação natural das partículas, ao longo das linhas de campo geomagnético, na atmosfera mais densa devido ao espalhamento do ângulo de inclinação por difusão.
- c) O processo de difusão por alteração do ângulo de inclinação das partículas devido à interação com ondas íon-ciclotrônicas. Essas ondas são geradas pela interação da corrente de anel com os plasmas da plasmasfera.

Embora a difusão devida ao ângulo de inclinação seja um importante mecanismo de perda, que produz efeitos mensuráveis na ionosfera/atmosfera superior, a troca de cargas dos íons da corrente de anel com o hidrogênio da geocorona é o mecanismo de perda dominante para os íons pesados. A perda por difusão com ondas deve ser o

processo dominante em L maiores e os termos de perdas atmosféricas, em L menores. Ressalta-se que o processo dominante de perda pode variar com o intervalo de energia das partículas (Akasofu e Chapman, 1972; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978; Young, 1983; Williams, 1981, 1987).

As tempestades magnéticas intensas parecem comportar-se um tanto diferentemente das tempestades mais fracas, pois o início de sua fase de recuperação é muito mais rápida e a taxa de recuperação reduz-se sensivelmente com o tempo. Supõe-se que o decaimento obedeça a uma lei exponencial. Atualmente atribui-se esse comportamento a uma diferença nas taxas de recuperação conforme a intensidade da tempestade geomagnética. Em tempestades intensas, acredita-se que isso deve-se mais à composição distinta das componentes da corrente do que a uma localização espacial distinta dessas componentes. As componentes podem ser entendidas da seguinte forma: (i) uma corrente permanente que existe em período calmo e (ii) uma corrente que se desenvolve em acréscimo à anterior durante as tempestades geomagnéticas (Hamilton et al., 1988).

O fator temporal de perda da corrente de anel τ , conforme evidências, parece decrescer com o aumento da intensidade da corrente de anel. Idealmente, τ deve ser calculado a partir das propriedades do processo de perdas, isto é, da densidade do gás neutro na região onde a corrente de anel se situa caso a troca de cargas seja o mecanismo de perdas dominante. No entanto, ainda são necessários mais estudos para a proposição de um modelo mais adequado. Pode-se afirmar, por outro lado, que a perda da corrente é um processo puramente magnetosférico (Vasyliunas, 1987).

2.2.5 - A EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CORRENTE DE ANEL

O índice Dst, quantificado na Equação 2.6, que é o valor médio em hora local da diferença entre H perturbado e H calmo, pode

ser reescrito como (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Feldstein et al., 1984; Lyons e Williams, 1984; Nishida, 1978):

$$Dst = \langle H^P - H^C \rangle, \quad (2.12)$$

onde os índices p e c significam perturbado e calmo, respectivamente. As contribuições das várias correntes elétricas podem ser escritas explicitamente como:

$$Dst = \left\langle \left(H_{mp}^P + H_{RC}^P \right) - \left(H_{mp}^C + H_{RC}^C \right) \right\rangle, \quad (2.13)$$

onde mp refere-se à magnetopausa e RC à corrente de anel (ring current). As correntes da cauda magnetosférica estão incluídas com a corrente de anel, devido a dificuldade de isolar o seu efeito e o desconhecimento de um modelo adequado para ser adotado.

Como a promediação é uma operação linear, pode-se reescrever ainda:

$$Dst = \langle H_{mp}^P \rangle - \langle H_{mp}^C \rangle + \langle H_{RC}^P \rangle - \langle H_{RC}^C \rangle. \quad (2.14)$$

Resolvendo para o efeito da perturbação da corrente de anel, tem-se:

$$\langle H_{RC}^P \rangle = Dst - \langle H_{mp}^P \rangle + \left(\langle H_{mp}^C \rangle + \langle H_{RC}^C \rangle \right), \quad (2.15)$$

Na superfície terrestre, o campo magnético das correntes da magnetopausa, H_{mp} , é proporcional à raiz quadrada da pressão dinâmica do vento solar P ($P = N M V^2$, onde N é a densidade numérica, M é a massa das partículas e V é a velocidade do vento solar), obedecendo as relações (Burton et al., 1975; Feldstein et al., 1984; Nishida, 1978): $H_{mp} = b.P^{1/2}$, quando $100 \leq P^{1/2} \leq 200$ (eV/cm^3) $^{1/2}$, e H_{mp} é independente de $P^{1/2}$ quando $P^{1/2} < 100$ (eV/cm^3) $^{1/2}$.

Estabelece-se então um índice mais diretamente associado à corrente de anel, que é dado por:

$$Dst^* = Dst - b P^{1/2} + C, \quad (2.16)$$

onde b é uma constante que caracteriza a relação entre P e Dst , e C é uma constante do período magneticamente calmo. A forma simples de Dst^* parece ser consistente mesmo com a existência de inúmeros mecanismos de dissipação da corrente de anel.

Dessler e Parker, em 1969, mostraram que intensidade da perturbação magnética no centro da Terra deveria ser proporcional ao conteúdo da energia das partículas aprisionadas na região equatorial da magnetosfera interna. Uma relação quantitativa entre a densidade da energia contida na corrente de anel e a perturbação aproximada produzida no campo magnético na superfície da Terra é dado por (Teorema de Dessler-Parker-Sckopke):

$$Dst^* = - \frac{2}{3} \frac{\bar{\epsilon}_\alpha}{\epsilon_m} B_0, \quad (2.17)$$

onde B_0 é a componente horizontal do campo magnético principal da Terra no equador; ϵ_α é a densidade da energia cinética do cinturão da corrente de anel; $\bar{\epsilon}_\alpha (= \int \epsilon_\alpha dv)$ é a energia total das partículas do cinturão; e ϵ_m é a energia total do campo magnético terrestre externo à superfície da Terra. Esse teorema não leva em conta a auto-energia do campo produzido pela corrente de anel e não corrige a variação no grau de simetria da corrente de anel. Durante a fase de recuperação de uma tempestade geomagnética, quando a corrente de anel é simétrica, o teorema pode ser aplicado para se determinar a energia total contida na corrente de anel do Dst^* . Durante a fase principal, quando a corrente de anel é assimétrica, seria necessária uma relação mais complexa envolvendo a distância radial e a extensão longitudinal. No entanto, mesmo quando a corrente de anel é assimétrica, Dst^* dá a

energia total na corrente de anel com uma aproximação melhor que 20% (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Feldstein et al., 1984; Hamilton et al., 1988).

Se for usado o índice Dst*, a equação do balanço energético para a corrente de anel adquire a forma (Burton et al., 1975):

$$\frac{d}{dt} Dst^* = Q - \frac{Dst^*}{\tau}, \quad (2.18)$$

onde Q é a taxa temporal de injeção de energia para a corrente de anel, que é controlada pelos parâmetros eletromagnéticos do meio interplanetário. No lado direito da Equação 2.18, a 2ª parcela é a taxa de dissipação da corrente de anel. Supõe-se que o decaimento obedeça a uma lei exponencial. Supõe-se também que o fator temporal de decaimento da corrente de anel τ seja definido em intervalos de acordo com a intensidade da corrente de anel ou, mais adequadamente, por uma função da corrente de anel.

Sabe-se que em períodos magneticamente calmos a corrente de anel não se dissipa completamente e que seu efeito magnético encontra-se no intervalo de -40 a -20 nT. Portanto, deve existir uma injeção na corrente de anel ϕ_0 que contrabalança uma dissipação completa durante os períodos calmos. ϕ_0 parece variar, mas essas variações são desprezíveis quando comparadas com as variações da função injeção Q.

O balanço de energia é regido então pela relação (Burton et al., 1975; Feldstein et al., 1984):

$$\frac{d}{dt} Dst^* = Q + \phi_0 - \frac{Dst^*}{\tau}. \quad (2.19)$$

2.3 - TEORIA DA ORIGEM INTERPLANETÁRIA DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

2.3.1 - A RECONEXÃO MAGNETOSFÉRICA

A magnetosfera terrestre é uma cavidade preenchida com um plasma quente e rarefeito interagindo com um fluxo rápido de plasma do vento solar. Devido ao campo magnético da Terra intenso, o vento solar não pode penetrar diretamente na magnetosfera e é desviado à sua volta. Grosso modo, 2% da potência cinética do vento solar incidente na magnetosfera diurna (aproximadamente 10^4 GW) é retirada através de diversas formas e diferentes processos de acoplamento energético, penetra na magnetosfera e comanda todos os processos dinâmicos e de estado estacionário de plasma na magnetosfera e na ionosfera antes de ser finalmente dissipada, principalmente na forma de calor (Baumjohann, 1986).

Os processos de acoplamento energético na magnetopausa podem ser grosseiramente divididos em 2 categorias:

- a) interação entre o campo magnético do vento solar e o campo geomagnético, por união das linhas de campo (denominada reconexão magnética);
- b) mecanismos não-magnéticos com características de processos quase-viscosos.

Baumjohann (1986) sugere, da análise de vários trabalhos, que a reconexão magnética é o processo de acoplamento energético dominante provendo, grosso modo, 90% da energia que entra na magnetosfera.

Baumjohann (1986) ressalta ainda que a reconexão magnética, conforme estudos teóricos e algumas observações experimentais, pode dar-se em regime de estado estacionário e também de maneira intermitente com dependência temporal. Já as interações

viscosas compreendem 3 diferentes mecanismos: instabilidade de Helmholtz, penetração impulsiva e admissão difusiva.

A concepção da reconexão magnética originou-se com a sugestão de Giovanelli, em 1946, de que partículas poderiam ser energizadas durante explosões solares (solar flares) próximas das regiões em que o campo magnético solar é nulo. Hoyle, em 1949, propôs que tal processo poderia também ocorrer onde o campo se anula entre o campo geomagnético e o campo magnético interplanetário, gerando as partículas energizadas responsáveis pelas manifestações aurorais. No entanto, a idéia da fusão de 2 campos magnéticos, como se conhece atualmente, foi primeiramente apresentado por Dungey, em 1953, um estudante de Hoyle (Lee, 1988; Lockwood et al., 1990).

Dungey propôs um modelo aberto para a topologia do campo magnético em torno da Terra. Em seu modelo, o campo magnético interplanetário e o campo geomagnético interligam-se ao longo de uma única linha neutra magnética (linha x), isto é, linha de campo com intensidade nula, próxima da região sub-solar da magnetopausa diurna. Subseqüentemente, as linhas do campo magnético interligadas fluem, congeladas no plasma, na direção das regiões posteriores (lobes) da cauda magnetosférica. Essas linhas de campo interligam-se ao longo da linha x no plano equatorial da cauda magnetosférica. As linhas de campo interligadas na parte próxima da Terra deslocam-se em direção a esta e eventualmente retornam à magnetosfera diurna. A parte das linhas de campo mais distantes afastam-se ainda mais da Terra e eventualmente tornam-se novamente linhas do campo magnético interplanetário. A Figura 2.9 mostra simplificada os modelos de reconexão magnética de linha x simples ou de múltiplas linhas x (Lee, 1988).

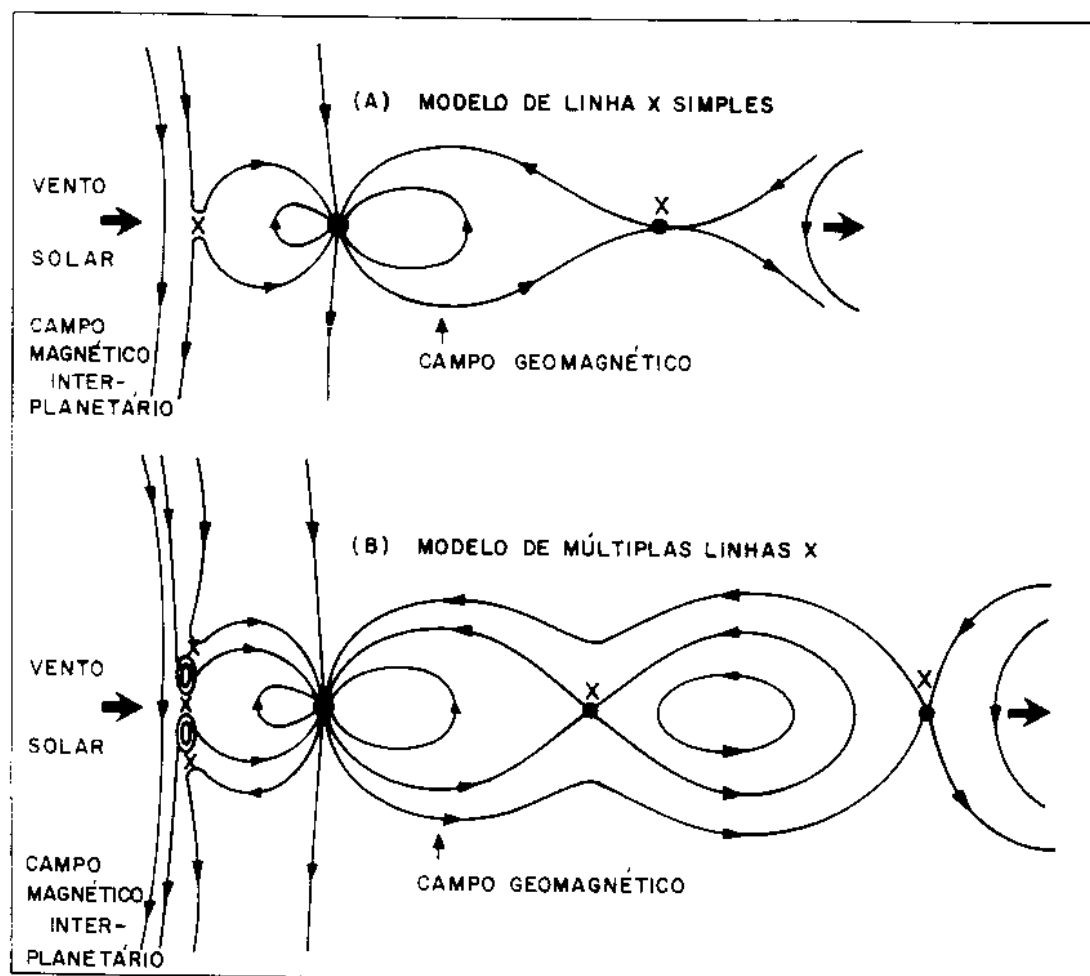


Fig. 2.9 - Visão simplificada do modelo de reconexão magnética de linha x simples (A) e do modelo de múltiplas linhas x (B).
FONTE: Lee (1988), p. 1627.

A configuração da reconexão magnética consiste de 2 partes: a região de difusão e a região de convecção. A Figura 2.10 (Gonzalez e Mozer, 1974) mostra o fluxo de plasma e a configuração do campo magnético em torno do ponto neutro do tipo x. A região de difusão é uma região pequena nas vizinhanças do campo magnético nulo, em que a difusão das linhas magnéticas domina o processo. Na região de convecção, a porção exterior da região de reconexão, o plasma e as linhas do campo magnético movem-se juntos devido à resistividade muito pequena. Assim, como consequência do processo de reconexão ocorre uma conversão da energia magnética em energia cinética e resulta um fluxo de plasma com alta velocidade. Esses eventos de transferência de fluxo ocorrem intermitentemente quando o campo magnético interplanetário apresenta orientação norte-sul, $B_z < 0$ nT, no sistema referencial da magnetosfera (Gonzalez e Mozer, 1974; Lee, 1988; Lockwood et al., 1990).

Uma base teórica simples para a reconexão magnética pode ser deduzida da lei de Ohm, que, para um fluido eletricamente condutor (um plasma) com uma condutividade escalar σ , tem a forma:

$$\mathbf{J} = \sigma \left(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} \right), \quad (2.20)$$

onde $\mathbf{J}$ é a densidade de corrente elétrica, $\mathbf{E}$ e $\mathbf{B}$ são os campos elétrico e magnético, respectivamente, e $\mathbf{V}$ é a velocidade do plasma.

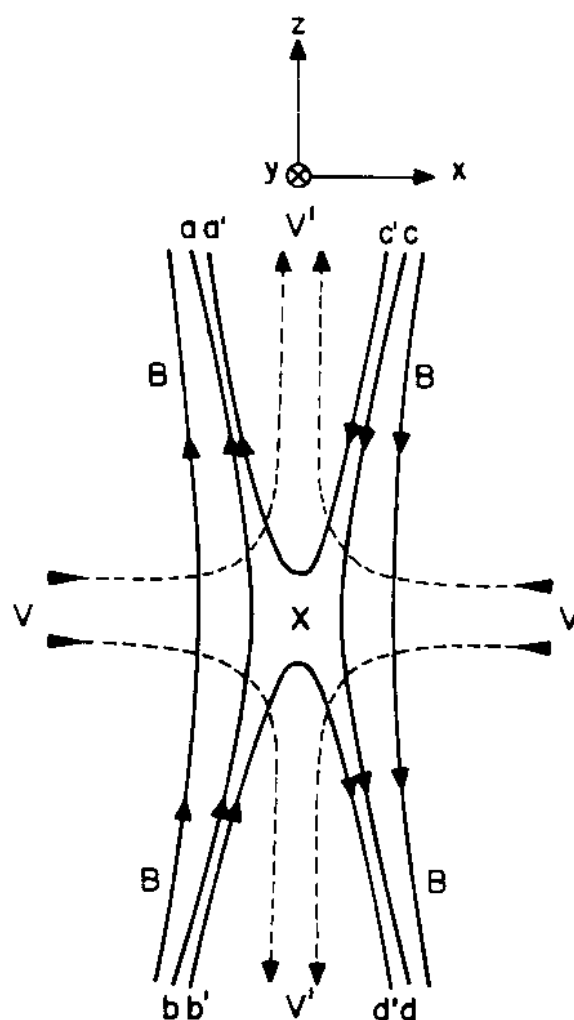


Fig. 2.10 - Visualização do fluxo de plasma e da configuração do campo magnético em torno do ponto magnético neutro do tipo-x durante a reconexão magnética.

FONTE: Gonzalez e Mozer (1974), p. 4187.

- V é a velocidade do plasma convergente, V' a do plasma divergente e B é o campo magnético transportado.

Utilizando as leis de Faraday e de Ampère dadas nas equações de Maxwell, que são respectivamente:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (2.21)$$

e

$$\mu \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}, \quad (2.22)$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio físico, obtém-se:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left(\mathbf{V} \times \mathbf{B} \right) + \frac{1}{\sigma \mu} \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (2.23)$$

Na lei de Ampère, desprezou-se a corrente de deslocamento por causa da condutividade σ ser de valor elevado. Na Equação 2.23, a razão do termo convectivo (1ª parcela da direita) sobre o termo difusivo (2ª parcela da direita) é denominado número magnético de Reynolds, R_m . Ele é da ordem de $V\sigma\mu\lambda$, onde λ e V são o comprimento de escala característico e a velocidade do plasma, respectivamente. Na magnetosfera e no meio interplanetário R_m é grande, assim pode-se considerar que o fluxo do campo magnético é transportado congelado no plasma ambiente. Desta forma o fluxo supersônico do vento solar comprime o campo magnético diurno até ser alcançado um equilíbrio dinâmico de pressão. O plasma do vento solar na região do choque, na bainha da magnetosfera (magnetosheath), é mantido separado do plasma da magnetosfera e a fronteira entre os dois, a magnetopausa, suporta uma corrente associada com a descontinuidade no campo magnético. Essa camada de corrente da magnetopausa parece ser estreita (com R_m pequeno), de maneira que há uma difusão das linhas de campo magnético através do plasma nessa região de fronteira. A componente com orientação norte-sul do CMI na bainha da magnetosfera e a linha do campo geomagnético com sentidos contrários formam a linha x, região em que

as linhas de campo terrestre e solar se fundem, através de um processo eletrodinâmico. O processo pelo qual as linhas se difundem para dentro da região da linha x e depois para fora com uma configuração diferente é denominado reconexão magnética e produz linhas magnéticas que interligam diretamente a ionosfera de latitudes altas com o meio interplanetário através da magnetopausa (Lockwood et al., 1990).

Imaginava-se que a reconexão magnética só ocorresse com campos magnéticos predominantemente anti-paralelos; no entanto, esse processo pode ocorrer entre campos arbitrariamente orientados (outras direções favoráveis à reconexão magnética que não apenas a estritamente paralela). Em princípio, são possíveis 3 modelos de reconexão magnética, apresentados na Figura 2.11 (Nishida, 1988), que são:

- 1) O modelo de reconexão anti-paralelo, em que a reconexão passa pela fenda magnética (polar cusp), exceto quando o campo magnético interplanetário é estritamente orientado de norte para sul.
- 2) O modelo em que a linha de reconexão passa pelo nariz (nose) da magnetopausa (denominado ponto sub-solar) e é inclinada com relação ao plano equatorial, exceto quando o campo magnético interplanetário tem orientação norte-sul. Nesse modelo não é necessário haver reversão no fluxo de plasma da bainha magnetosférica.
- 3) O modelo em que a linha de reconexão permanece no plano equatorial.

Suspeita-se também que a reconexão obtida não ocorra como um processo global; mas a partir de regiões localizadas e múltiplas (Nishida, 1988). Supõe-se ainda que a medida da eficiência da reconexão (taxa temporal com que o fluxo magnético é aberto por unidade de comprimento da linha x) na magnetopausa pode ser obtida da

diferença de potencial elétrico ao longo da linha neutra através da magnetopausa. O campo elétrico relacionado com a reconexão é proporcional a $V \times B_T$, onde V é a velocidade do vento solar e $B_T (= B_z + B_y)$ é a componente transversal do campo magnético (sistema referencial da magnetosfera) na bainha da magnetosfera. Em essência, a taxa de reconexão depende não somente de V e B_T na bainha magnetosférica, mas também da disposição e do comprimento da linha de reconexão.

A componente B_x , que é na direção Terra-Sol, pode ser desprezada. O efeito principal dessa componente na geometria de reconexão parece ser a translação da linha de reconexão ao longo do hemisfério diurno da magnetosfera. Nos estudos de modelagens, verificou-se que a linha de reconexão magnética se situa na Eclíptica quando o campo magnético é orientado puramente para sul. A presença da componente B_y do CMI, no sistema referencial da magnetosfera, leva a linha de reconexão a girar em torno da direção Sol-Terra no sentido horário se B_y for negativo e no sentido anti-horário se B_y for positivo (Gonzalez e Mozer, 1974).

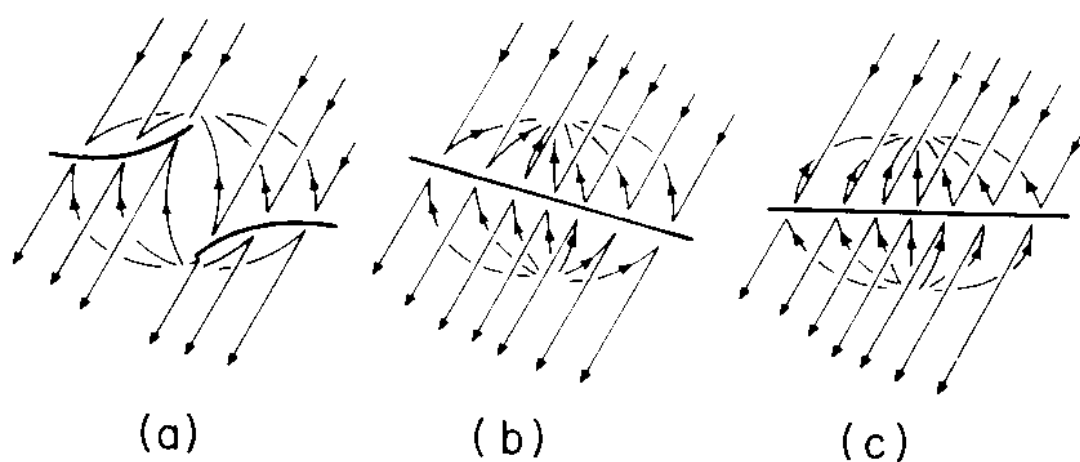


Fig. 2.11 - Três modelos básicos de linhas de reconexão magnética.

FONTE: Nishida (1988), p. 35.

- A reconexão é indicada pela linha grossa. Apresentam-se o modelo da reconexão anti-paralela (a), o modelo em que a linha passa pelo ponto sub-solar (b) e o modelo em que a linha de reconexão permanece no plano equatorial (c).

Os modelos propostos para a reconexão magnética e os processos a ela associados podem ser entendidos em termos de valores diferentes para a resistividade e as condições de contorno (Lee, 1988). Os modelos são basicamente de 2 tipos: (i) modelos de estado estacionário e (ii) modelo dependente do tempo (reconexão de múltiplas linhas neutras x). Nos modelos clássicos, o modelo de Sweet-Parker, 1958, apresenta uma taxa de reconexão muito pequena para explicar a rápida conversão energética nos explosões solares (solar flares) ou nas subtempestades geomagnéticas. A fim de aumentar a taxa de reconexão, Petschek, 1964, propôs que a conversão de energia pode ser completada com ondas magneto-hidrodinâmicas (4 choques lentos foram acoplados à região de difusão central). O modelo de Sonnerup-Yeh-Axford, 1970, considera uma expansão do modo lento ao invés da expansão de modo rápido de Petschek. Priest e Forbes, 1986, obtiveram uma família de modelos, onde os modelos de Petschek e Sonnerup são os casos especiais. Mudando as condições de contorno, outros modelos podem ser obtidos, tais como um modelo de expansão híbrida e um modelo de empilhamento de fluxo. Já quando o sistema é extenso, a taxa de reconexão é elevada ou a resistividade é pequena, o modelo de reconexão com múltiplas linhas neutras x , proposto por Fu e Lee em 1985, é mais adequado. Nesse modelo, ilhas magnéticas (tubos de fluxo magnético na magnetopausa diurna ou plasmóides na cauda magnetosférica) são formados intermitente e repetidamente sob a influência de uma força indutora constante (Lee, 1988).

Estudos mostram que a reconexão magnética na magnetopausa é um processo altamente eficiente e provavelmente o mecanismo dominante de injeção de energia no interior da magnetosfera, provendo, grosso modo, 90% da entrada de energia na magnetosfera. Constatou-se também a importância do CMI e, principalmente, da componente com orientação norte-sul no estabelecimento da reconexão que determina o acoplamento energético (Akasofu, 1981; Baker et al., 1983; Baumjohann, 1986; Gonzalez e Mozer, 1974; Gonzalez et al., 1989; Nishida, 1978).

Ao penetrar na magnetosfera, a energia do vento solar se distribui de várias maneiras (Akasofu, 1980, 1981; Baker et al., 1983; Gonzalez et al, 1989, 1990b). Uma parte da energia é transferida diretamente para a ionosfera em altas latitudes via correntes elétricas alinhadas com o campo magnético, onde é dissipada por aquecimento joule. Outra parte é transferida para a cauda magnetosférica sob a forma de energias cinética e térmica do plasma e de energia associada ao campo magnético. Uma parte dessa energia é transferida para a corrente de anel via injeção de partículas, onde é dissipada por troca de cargas elétricas (charge exchange) e talvez por outros processos e posteriormente perdida para a atmosfera terrestre. Outra parte menor desta energia é transferida para a ionosfera auroral via precipitação de partículas e correntes elétricas alinhadas com o campo magnético, onde é dissipada na forma de aquecimento joule e aquecimento das partículas. A energia restante da cauda magnetosférica, que não permanecer armazenada, não é dissipada dentro da magnetosfera mas retorna ao vento solar através de plasmóides (bolhas de plasma magnetizado) que se destacam da cauda, afastando-se da Terra.

Portanto, existem basicamente 3 processos de dissipação da energia injetada na magnetopausa:

- 1) processos de energização da corrente de anel;
- 2) processos de injeção de energia na região polar (correntes aurorais, precipitação de partículas, aquecimento por efeito joule);
- 3) dissipações de energia através da cauda magnetosférica (armazenamento e plasmóides).

Há evidências de que a dissipação pela corrente de anel é predominante. As energias dissipadas, em princípio, podem ser quantificadas a partir de perturbações magnéticas, definidas por

índices de atividade magnética: Dst (associado à corrente de anel) e AE (associado às regiões polares). Infelizmente, as formas de dissipação da energia da cauda magnetosférica (armazenamento e plasmóides) não possuem um modelo quantitativo e ainda não podem ser monitorados sobre uma base contínua para estudos estatísticos (Akasofu, 1980, 1981; Baker et al., 1983; Gonzalez et al., 1989, 1990b).

Quanto ao índice AE, índice de latitudes altas, vale explicar que ele é obtido do limite superior das variações positivas (índice AU) e do limite inferior das variações negativas (índice AL) das perturbações do campo magnético nas regiões polares. O índice AE ($= AU - AL$) dá a soma das intensidades máximas dos campos magnéticos dos eletrojetos aurorais na circulação das correntes ionosféricas aurorais para oeste e na circulação da corrente para leste, respectivamente. Como as estações não têm uma distribuição uniforme em longitude nem abrangência em latitude, esse índice pode superestimar as variações devido a correntes locais. No entanto, o índice AE (medido em nanoteslas) é o único índice disponível para a estimativa da taxa de produção de calor por efeito joule em base contínuas (Akasofu, 1981).

Dessa forma, a taxa temporal da energia dissipada na magnetosfera, $U_r(t)$, em função do tempo universal t , pode ser dada pela soma das taxas de injeção energética na corrente de anel, $Q(t)$ (consultar Secção 2.2.5), da taxa de produção de calor por aquecimento joule na ionosfera, $U_j(t)$, e pelo fluxo energético das partículas aurorais, $U_A(t)$. Tem-se, portanto, a expressão (Akasofu, 1980; 1981; Baker et al., 1983):

$$U_r(t) = Q(t) + U_j(t) + U_A(t). \quad (2.24)$$

A taxa de produção de calor por aquecimento joule U_J na região auroral inteira é definida por (Akasofu, 1981):

$$U_J = \iint J_P \cdot E \, d\lambda_g d\phi, \quad (2.25)$$

onde J_P e E são respectivamente a densidade da corrente de Pedersen na ionosfera integrada em altura e o campo elétrico associado; ambas as grandezas são funções da latitude ϕ e da longitude λ_g . Dada a dificuldade de resolver exatamente a equação, é necessário usar de aproximações, obtendo-se o resultado (Akasofu, 1981):

$$U_J \text{ (em erg/s)} = 2 \times 10^{15} \times \text{AE (nT)}. \quad (2.26)$$

As estimativas do fluxo de energia cinética U_A carregado pelas partículas aurorais indicam, em geral, um valor significativamente menor ou quando muito comparável a U_J . Espera-se ainda que esse fluxo varie em correspondência com o índice AE. De acordo com Akasofu (1981), U_A é dado por:

$$U_A \text{ (em erg/s)} = 10^{15} \times \text{AE (nT)}. \quad (2.27)$$

Das considerações anteriores, a taxa temporal da dissipação energética total U_r na magnetosfera é dada por:

$$U_r \text{ (em erg/s)} = 4 \times 10^{20} \left(\frac{\partial \text{Dst}^*}{\partial t} + \frac{\text{Dst}^*}{\tau} \right) + 3 \times 10^{15} \times \text{AE (nT)}. \quad (2.28)$$

Akasofu (1981), Gonzalez et al. (1989) e Vasyliunas (1987) sugerem que durante as tempestades intensas a contribuição devida à dissipação energética na região auroral é relativamente menor comparada com a dissipação associada à corrente de anel.

Considerando a influência de parâmetros interplanetários sobre a magnetosfera, esta não parece ser um sistema de resposta direta às influências interplanetárias; podendo também comportar-se

como um sistema de descarga abrupta de energia armazenada. A proporção com que esses dois mecanismos ocorrem não é conhecida. Contudo em ambas as situações não há dúvidas sobre a importância da orientação do CMI, especialmente quando o campo apresenta-se com uma forte orientação norte-sul no sistema referencial da magnetosfera. Os fatores temporais associados se devem à magnetosfera ter uma grande indutância (100-500 Henry), e, portanto, ter condições de acumular energia magnética na sua cauda. Deve-se esperar uma defasagem temporal entre a injeção na magnetopausa e a dissipação da energia na magnetosfera. Como o sistema magnetosfera-ionosfera tem uma alta indutância e sendo que a resistência ionosférica total é 0,1 Ohm, pode-se estimar que a defasagem entre a injeção na magnetopausa e a dissipação na magnetosfera é da ordem de 1 hora (Akasofu, 1980, 1981; Baker et al., 1983; Nishida, 1988).

2.3.2 - FENÔMENOS INTERPLANETÁRIOS

Inúmeros estudos têm confirmado a idéia que o CMI é o responsável pela ocorrência de processos físicos na magnetosfera, explicados sobretudo pelo mecanismo da reconexão magnética.

A suposição de que a componente norte-sul do CMI, no sistema de coordenadas Sol-magnetosfera, seja o parâmetro dominante responsável pelo desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas mostrou-se bem sucedida para uma compreensão quantitativa da origem de tais desenvolvimentos. No entanto, ainda são necessárias pesquisas, sobretudo na forma de campanhas coordenadas, para aumentar a compreensão quantitativa na busca da predição de ocorrência de tempestades geomagnéticas a partir do conhecimento de parâmetros interplanetários (Nishida, 1988; Gonzalez et al., 1987, 1989; Smith, 1979; Tang et al., 1989; Tsurutani et al, 1984, 1988a, 1990).

A origem das tempestades geomagnéticas no meio interplanetário tem sido investigada por mais de duas décadas e

grandes progressos têm sido obtidos (Nishida, 1988; Gonzalez et al., 1989; Gonzalez e Tsurutani, 1987; Smith, 1979; Tang et al., 1989; Tsurutani et al., 1984, 1988a, 1988b, 1990). O alcance radial com o que as medidas interplanetárias têm sido feitas é de 0,3 a 8,5 unidades astronômicas (U.A.) e, a partir da eclíptica, o alcance em latitude já atingido foi de 16 graus (Smith, 1979).

A geração ou amplificação de um campo magnético interplanetário orientado de norte para sul (no sistema referencial da magnetosfera), pode decorrer, em princípio, dos seguintes fenômenos (Cospar Plenary Meeting, 1988; Gonzalez e Tsurutani, 1987; Gonzalez et al., 1989; Smith, 1979; Tang et al., 1989; Tsurutani et al., 1984, 1988a, 1988b; 1990):

- 1) Deslocamento de matéria ejetada da coroa solar, que transporta um campo magnético. Essa ejeção pode apresentar-se como fluxo contínuo (vento solar) ou como fluxo localizado precedido de uma onda de choque ou não, e com a morfologia de um feixe de plasma que se prolonga do Sol ou como um plasmóide.
- 2) Troca de setores, isto é, a passagem de uma região em que as linhas de campo magnético interplanetário afastam-se do Sol para uma região em que elas apontam para o Sol, e vice-versa.

Os feixes que não são precedidos de choque podem ainda ser analisados considerando algumas condições morfológicas:

- 1) Uma interação de feixes, denominada assim por caracterizar-se como uma região de interação de um feixe de alta velocidade e baixa densidade que alcança um feixe de baixa velocidade e maior densidade.
- 2) Uma estrutura física em que há uma alta densidade de partículas presente em uma porção do feixe que tem velocidade constante ou decrescente. Isso parece sugerir que essa massa

provém naturalmente do Sol e não de uma compressão do feixe ocorrida no meio interplanetário, denominada NCDE (NonCompressive Density Enhancement).

- 3) Ocorrência de flutuações do tipo ondas transversais alfvênicas de grande amplitude.
- 4) Descontinuidades nas estruturas interplanetárias que afetam o campo magnético interplanetário.

A Figura 2.12 apresenta uma síntese das estruturas interplanetárias que podem dar origem à componente do campo magnético interplanetário com orientação norte-sul (no sistema referencial da magnetosfera). É apresentada a seguir uma descrição dessas estruturas interplanetárias.

Nuvens de plasma magnetizado são extensas regiões (aproximadamente de 0,25 U.A.) caracterizadas por campos magnéticos intensos que tem seu eixo principal girando em um plano. Essa configuração é consistente com um grande anel ou bolha magnética (plasmóide). Essa geometria cilíndrica pode ser responsável por campos grandes com orientação sul e norte e vice-versa. Além disso, ela pode ocorrer após um choque ou estar na estrutura de um feixe mais lento. A pressão magnética dentro da nuvem é maior que a pressão dos íons, e a soma dessas pressões é maior que a pressão no meio interplanetário externo à nuvem (Klein e Burlaga, 1982; Tsurutani et al, 1984, 1990).

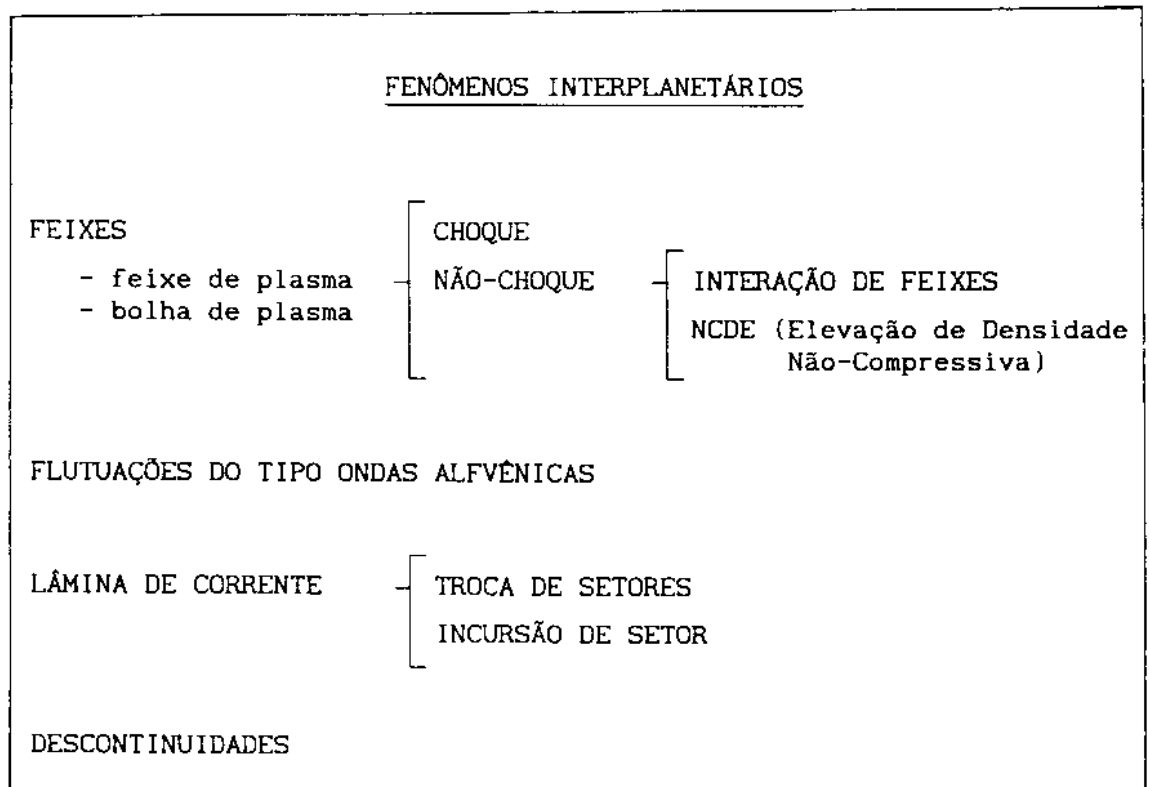


Fig. 2.12 - Fenômenos interplanetários que podem dar origem à componente do campo magnético interplanetário com orientação norte-sul (no sistema referencial da magnetosfera) e produzir reconexão magnética.

A partir da observação experimental e da proposição de modelos, pode-se definir os feixes coronais (emissões de partículas eletricamente carregadas da coroa solar) como estruturas de grande escala. A Figura 2.13 (Gosling et al., 1981) representa uma simplificação da região de expansão de plasmas característicos da região coronal solar. Na região dos buracos coronais, o campo magnético solar apresenta-se com uma certa polaridade magnética (ou afastando-se ou aproximando-se do Sol). Há também uma região com a aparência de uma bifurcação, onde os pés das linhas magnéticas estão em regiões de polaridades diferentes (isto é, entrando e saindo do Sol). Nas linhas abertas dessa região, a expansão do plasma coronal processa-se com uma velocidade menor que na na parte externa. Outras características dessa estrutura podem ser relacionadas: o estreitamento com a distância do Sol, uma reversão na polaridade do campo magnético solar usualmente no meio, maior densidade de matéria do que nas vizinhanças para todas as distâncias heliocêntricas (Gosling et al., 1981; Tsurutani et al., 1990).

Em regiões ativas do Sol ocorrem feixes com ejeção concentrada de matéria para o meio interplanetário, aparentemente produzidos por explosões solares (solar flares) e proeminências eruptivas (eruptive prominences). A explosão solar é essencialmente uma rápida liberação de energia provavelmente extraída do campo magnético das manchas solares (sunspots), capaz de acelerar elétrons e íons até altas energias. A proeminência eruptiva é um arco de plasma solar aprisionado nas linhas magnéticas que se expande para longe do Sol. As ejeções algumas vezes tornam-se magneticamente destacadas do Sol, dando origem aos plasmóides (Burlaga et al., 1984; Schwenn, 1988; Gibson, 1972; Klein e Burlaga, 1982; Stern, 1989; Tang et al., 1989; Tsurutani et al., 1990) .

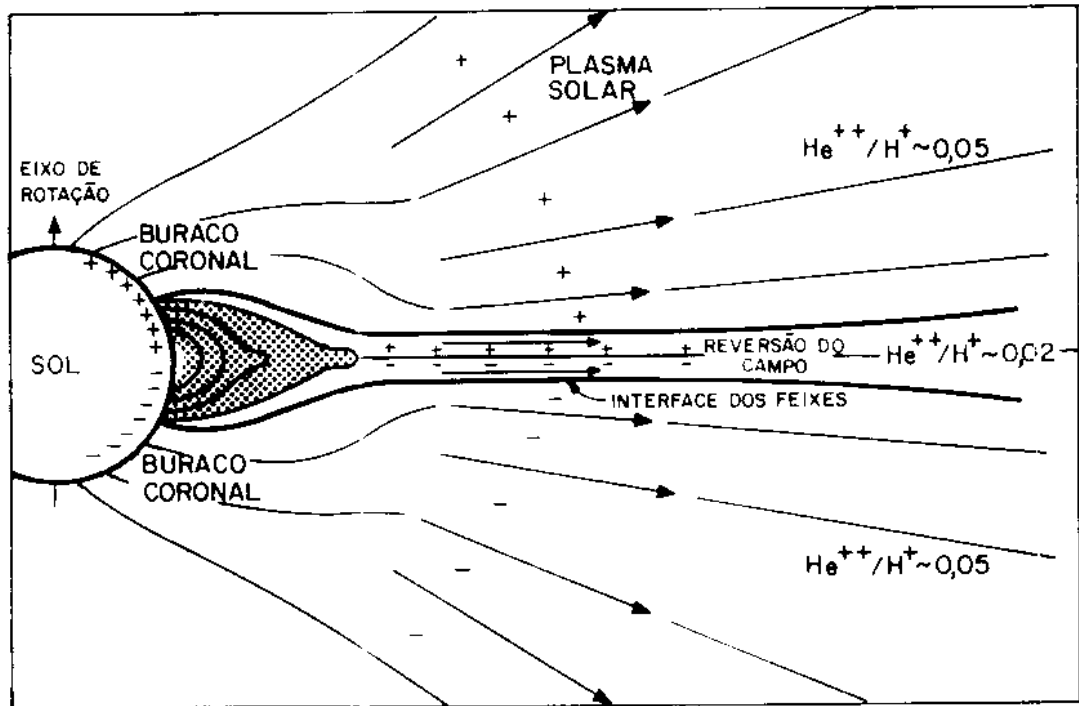


Fig. 2.13 - Visão simplificada da região de expansão de plasmas característicos da região coronal do Sol.

Baseada em Gosling et al. (1981), p. 5445.

- O plasma no feixe do centro é mais denso, mais lento e tem uma abundância de Hélio menor que no feixe externo. Os sinais + e - representam polaridades opostas do campo magnético solar.

Ainda não se reconheceu com certeza os mecanismos (parâmetros e assinaturas) solares que efetivamente produzem perturbações em 1 U.A.. A dinâmica do meio interplanetário pode desempenhar um papel importante na relação entre as causas solares e os efeitos interplanetários (Tang et al., 1989).

A ejeção de massa coronal associada com explosões solares ou com proeminências eruptivas é a fonte predominante dos feixes de alta velocidade durante o máximo solar. Já durante o mínimo solar, os buracos coronais são a principal fonte (Tsurutani et al., 1990).

Feixes rápidos do vento solar podem manifestar-se precedidos de um choque. Os choques interplanetários próximos a 1 U.A. apresentam-se como um fenômeno de larga escala, com raio de curvatura da ordem de 1 U.A. (em torno de 10^3 vezes o tamanho da frente de choque da magnetosfera). Os choques a essa distância são associados fundamentalmente com explosões solares (solar flares) e/ou transientes coronais (Burlaga, 1975; Smith, 1979; Tsurutani e Lin, 1985).

O choque interplanetário pode ser identificado pelos aumentos abruptos nos parâmetros do meio interplanetário: densidade de prótons, temperatura e velocidade do vento solar, e campo magnético interplanetário. O choque progressivo, que se afasta do Sol tanto no referencial do vento solar quanto em um referencial inercial, apresenta essas características. Quando há um acréscimo abrupto na velocidade e decréscimo abrupto nos outros parâmetros interplanetários, tem-se o choque reverso, que se propaga na direção do Sol no referencial do vento solar mas afasta-se do Sol no referencial inercial (Burlaga et al., 1984; Gonzalez e Tsurutani, 1987; Klein e Burlaga, 1982; Smith, 1979; Tsurutani e Lin, 1985; Tsurutani et al., 1984, 1988). A direção normal ao choque pode ser calculada usando o método do modo misto de Abraham-Schrauner. A velocidade do choque é calculada pela conservação do fluxo de massa. O número de Mach magnetossônico é obtido pela razão entre a velocidade do choque

no referencial do vento solar e a velocidade do modo rápido da onda magnetossônica para uma propagação ao longo da direção normal. Observações recentes indicam que a intensidade do campo magnético interplanetário aumenta através do choque por um fator de 1,2 a 3,3 (Tsurutani e Lin, 1985; Bavassano-Cattaneo et al., 1986; Tsurutani et al., 1988b).

A interação de feixes pode decorrer ou de um feixe solar mais rápido e mais rarefeito que alcança um feixe mais lento e mais denso ou da transição de uma região de um feixe lento para a de um feixe rápido. Embora não seja regra, geralmente ocorre uma interface entre os feixes, isto é, uma mudança descontínua nos parâmetros do meio interplanetário separando plasmas de diferentes origens e propriedades. Essas interfaces apresentam uma espessura menor do que aproximadamente 4×10^4 km e velocidades menores que 450 km/s. Nessa região de interação de feixes, a temperatura dos prótons aumenta visivelmente, a velocidade do fluxo solar aumenta, a densidade do vento solar cai visivelmente, a pressão do gás solar e a intensidade do CMI maximizam-se próximo da região de interação (Akasofu, 1981; Burlaga, 1975; Burlaga et al., 1984; Gonzalez e Tsurutani, 1987; Gosling et al., 1978; Klein e Burlaga, 1982).

Willcox e Ness, em 1965, foram os primeiros a identificar as estruturas de setores do campo magnético solar, ou seja, região do espaço interplanetário com linhas de campo magnético em uma só direção, afastando-se ou aproximando-se do Sol. Essa estrutura pode ser interpretada a partir do modelo de uma lâmina de corrente, entre as inversões de polaridade do campo magnético, apresentada na Figura 2.14 (Smith, 1979), inclinada de aproximadamente 15 graus com respeito ao equador solar e estendendo-se a grandes distâncias. A inclinação parece ter seus valores mínimo e máximo próximos ao mínimo e máximo da atividade do ciclo solar, respectivamente. A existência de 4 ou 6 setores, como já foi constatada experimentalmente, pode ser explicada admitindo que a corrente inclinada contenha dobras ou ondulações. Para um corpo

deslocando-se no meio interplanetário, a transição de um setor para o outro é denominada troca de setores. Às vezes, pode-se encontrar regiões restritas de inversão de polaridade, que aparecem como perturbações nessa estrutura, denominada incursões de setor. Dessa forma, a Terra, em sua órbita, pode atravessar regiões que apresentam um campo magnético interplanetário com forte orientação de norte para sul, no referencial da magnetosfera, com efeitos na reconexão magnética (Akasofu, 1981; Gonzalez e Tsurutani, 1987; Smith, 1979; Villante et al., 1979; Tsurutani et al., 1984, 1990).

Algumas vezes são observadas altas densidades no vento solar quando a velocidade do fluxo de massa solar é aproximadamente constante ou em redução (Foram medidos picos na densidade de prótons maiores que $15 \text{ partículas/cm}^3$). Essas densidades elevadas, denominadas NCDE (NonCompressive Density Enhancement), não parecem ser geradas no meio interplanetário. A identificação dessas densidades elevadas como não compressivas decorre de terem uma velocidade aproximadamente constante ou decrescente. Usualmente a temperatura dos prótons varia, de forma aproximada, inversamente com a densidade, fornecendo mais evidências de que o caráter é não compressivo. Raramente essas densidades são encontradas em velocidades superiores a 450 km/s. Tipicamente, nesse eventos, as temperaturas dos prótons e elétrons são baixas ou variam inversamente com a densidade e a intensidade do campo magnético não aumenta. No entanto, algumas vezes acontecem alterações nas componentes do campo magnético interplanetário durante esses eventos. Acredita-se que a fonte dos NCDE no vento solar em 1 U.A. possa ser a injeção de massa da corona solar com deslocamento lento, associada a proeminências eruptivas e provavelmente pequenas explosões solares (Gosling et al., 1977, 1981; Tsurutani et al., 1990).

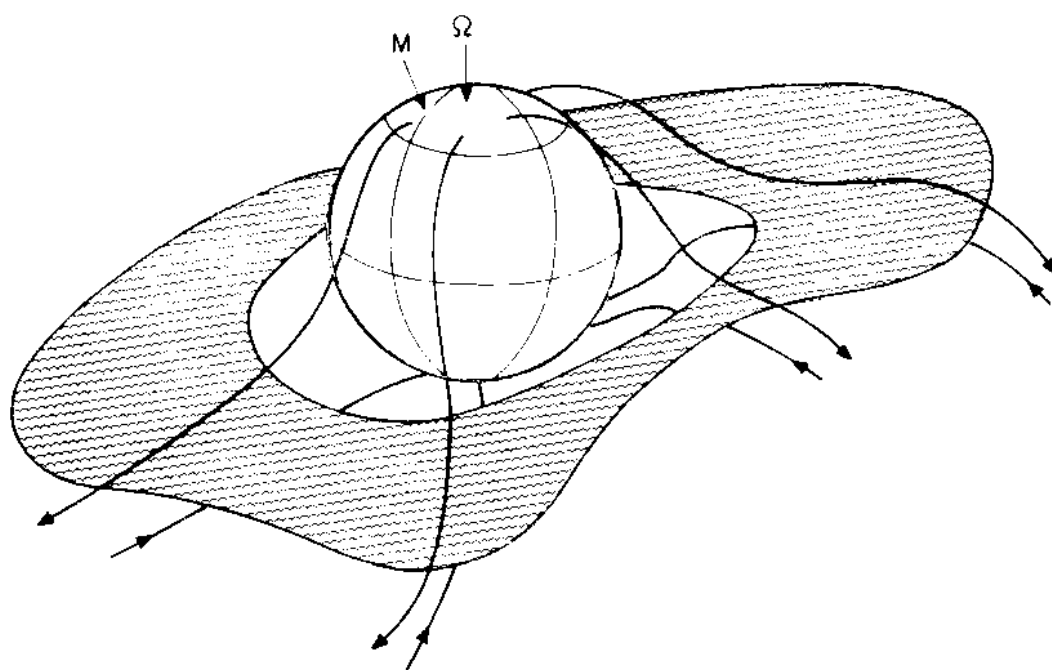


Fig. 2.14 - Esquema da lâmina de corrente associada à estrutura de setores do campo magnético solar.

FONTE: Smith (1979), p. 612.

- O eixo da lâmina de corrente, M , é inclinada com relação ao eixo de rotação do Sol, Ω , de aproximadamente 15° .

Das perturbações que ocorrem no meio interplanetário, as ondas de Alfvén parecem ser o constituinte majoritário do espectro de ondas no meio. Elas podem produzir oscilações transversais significativas ao longo das linhas do campo magnético interplanetário. A sua ocorrência é identificada pela correlação das flutuações nas componentes do campo magnético interplanetário com as flutuações na velocidade do plasma solar. A magnitude do campo magnético e a densidade do plasma permanecem constantes durante a sua manifestação, indicando que essas manifestações são de caráter não-compressivo no meio interplanetário. Supõe-se que a origem das ondas de Alfvén sejam vestígios de processos de aquecimento que ocorrem na coroa solar. As ondas são observadas no meio interplanetário enquanto o plasma aquecido expande-se radialmente para fora da região fonte (Baker et al., 1983; Schwenn, 1988; Smith, 1979; Tsurutani e Gonzalez, 1987; Tsurutani et al., 1984, 1990).

Mudanças abruptas, denominadas descontinuidades, ocorrem nos parâmetros do meio interplanetário. As descontinuidades importantes na física do plasma solar são as descontinuidades tangencial e rotacional. Na descontinuidade tangencial, a densidade do plasma, a temperatura, a direção e a amplitude do campo magnético podem ser inteiramente diferentes dos dois lados da descontinuidade. A condição básica é que os campos magnéticos em ambos os lados sejam paralelos ao plano da descontinuidade. As descontinuidades rotacionais conservam a magnitude do campo magnético e, idealisticamente, têm uma componente normal equivalente ao campo ambiente. Há indicações de que as descontinuidades tangenciais tendem a ocorrer mais frequentemente em regiões caracterizadas pelo vento solar lento, enquanto as descontinuidades rotacionais são mais comuns próximas ou seguindo o pico dos feixes de alta velocidade (fast streams) (Smith, 1979; Tsurutani et al., 1990).

2.3.3 - O ACOPLAMENTO ENERGÉTICO

Com a utilização das medidas do índice Dst, do índice AE e da pressão dinâmica P do vento solar e supondo que a função de injeção de energia Q na corrente de anel depende basicamente dos parâmetros do vento solar, pode-se definir uma combinação desses parâmetros (denominada função de acoplamento energético) que melhor caracterize a evolução do índice Dst (Akasofu, 1981, 1986; Burton et al., 1975; Feldstein et al., 1984; Gonzalez et al., 1990a; Vasyliunas, 1987). Dessa forma, procura-se compreender em termos de modelos físicos a injeção de energia na magnetopausa em relação à sua principal forma de dissipação: a energização da corrente de anel (Rever a Equação 2.28).

As funções de acoplamento são obtidas a partir de modelos que representam a transferência do potencial elétrico interplanetário ao longo da região de reconexão magnética, que resultam em equações do tipo campo elétrico e do tipo potência elétrica. A sofisticação desses modelos incorpora a essas equações a influência das alterações na geometria da magnetosfera (forma, dimensões e orientação), que é representada através da pressão dinâmica do vento solar P ou de parâmetros geométricos específicos. Em algumas funções de acoplamento, fatores dimensionais são utilizados para que elas representem taxas temporais de injeção de energia. Do exame de várias funções de acoplamento, 9 foram selecionadas por sintetizarem todos os acoplamentos possíveis. As demais são apenas pequenas variações dessas equações básicas.

De acordo com os modelos de reconexão magnética anteriores, as principais funções de acoplamento propostas F_{α} que procuram representar essa injeção de energia na magnetopausa são (Akasofu, 1980, 1981; Gonzalez, 1986, 1990; Gonzalez e Gonzalez, 1981, 1984; Gonzalez et al., 1989, 1990a; Murayama, 1982, 1986; Nishida, 1978; Tsurutani et al., 1990; Vasyliunas, 1987):

1) Uma função do campo elétrico "retificado" (Gonzalez, 1986; Gonzalez et al., 1989; Murayama, 1982):

$$E_y = V B_z, \quad (2.29)$$

onde V é a velocidade do vento solar, para valores negativos da componente sul-norte B_z do CMI (Burton et al., 1975), e estendida para um intervalo de valores B_z positivos e pequenos (Feldstein et al., 1984).

2) Uma função de acoplamento (Akasofu, 1980, 1981; Gonzalez, 1986; Gonzalez e Gonzalez, 1981, 1984; Gonzalez et al., 1989; Murayama, 1982; Perreault e Akasofu, 1978; Tsurutani et al., 1990; Vasyliunas, 1987):

$$EPS = L_o^2 V B^2 \sin^4(\theta/2) \quad (2.30)$$

associada à potência elétrica transferida na reconexão na magnetopausa (Gonzalez, 1986; Kan e Lee, 1979). Nesta equação, B é amplitude do CMI, L_o é uma constante que vale aproximadamente 7 raios terrestres e θ é o ângulo entre a componente B_z e a componente transversal B_r do CMI, $B_r = B_z + B_y$, no sistema de coordenadas magnetosfera-Sol (Gonzalez e Mozer, 1974).

3) Uma função que incorpora a influência da pressão dinâmica P do vento solar no acoplamento energético (Gonzalez et al., 1989; Murayama, 1982; Tsurutani et al., 1990):

$$F6 = P^{1/2} V B_z \quad (\approx N^{0,4} M^{0,4} V^2 B_z). \quad (2.31)$$

4) Uma função comumente utilizada na correlação com atividade na região auroral dada pelo índice AL (Gonzalez et al., 1989; Tsurutani et al., 1990):

$$F5 = P^{1/6} V B \sin^4(\theta/2). \quad (2.32)$$

5) Expressões genéricas para o campo elétrico e para a transferência de energia devidos à reconexão na magnetopausa (Gonzalez, 1986):

$$E_D(s, \theta) = \frac{V}{c} \frac{B_T}{(s - \cos\theta)} \frac{K(s, \theta)}{(s - \cos\theta)} \quad (2.33)$$

e

$$P_D(s, \theta) = \frac{1}{\pi} V L_M^2 B_T B_M K(s, \theta), \quad (2.34)$$

com:

$$K(s, \theta) = \frac{(1 - s \cos\theta)(s - \cos\theta)^2}{(1 + s^2 - 2 s \cos\theta)}, \quad (2.35)$$

que é devido às relações de geometria na magnetosfera. E_D e P_D são, em unidades gaussianas, respectivamente o campo elétrico e a potência associada à componente alvorecida-crepúsculo do campo elétrico de reconexão (Gonzalez e Gonzalez, 1981; Gonzalez e Mozer, 1974); c é a velocidade da luz; L_M é o raio da magnetopausa no nariz da magnetosfera; $s = B_G/B_M \geq 1$, com B_G e B_M sendo, respectivamente, as intensidades dos campos geomagnético e magnético na bainha magnética em frente da magnetopausa. As Equações 2.29, 2.30 e 2.32 podem ser obtidas como limites dessa expressão genérica sob condições físicas definidas. A expressão genérica para a potência associada à reconexão pode ser testada como uma função de acoplamento, com as aproximações seguintes: $L_M = L_{CF}$, que é a escala de comprimento de Chapman-Ferraro, com $L_{CF} \propto P^{-1/3}$; $B_M = 2(B_T B_G)^{1/2}$, que é um parâmetro de compressão; e $B_G = (8\pi N M V^2 + B^2)^{1/2}$, que decorre do equilíbrio de pressão na magnetopausa. Isto resulta em (Gonzalez et al., 1989):

$$F_{14} = P^{-1/3} V B_T B_M K(s, \theta). \quad (2.36)$$

A Equação 2.30 dimensionalmente corrigida por um fator $P^{-1/3}$ para representar uma potência pode ser obtida da Equação 2.36 quando s tende a 1 (Gonzalez, 1986; Gonzalez et al., 1989):

$$F4 = P^{-1/3} V B^2 \sin^4(\theta/2). \quad (2.37)$$

Pode-se examinar ainda a Equação 2.36 sem a modulação da pressão que deve reajustar a geometria da magnetosfera, o que resulta em (Gonzalez, 1986; Gonzalez e Gonzalez, 1984):

$$F14A = V B_r B_m K(s, \theta). \quad (2.38)$$

Outras funções de acoplamento podem ser estabelecidas como variantes das anteriores. Isso permitiria uma clareza maior do modelo de transferência de energia do vento solar para a magnetosfera e de sua dissipação, principalmente, através da energização da corrente de anel, produzindo as tempestades geomagnéticas. Uma definição também adequada para o campo elétrico de origem interplanetária seria $V \cdot B_r$, desde que se admita que B_r possa modular a função de acoplamento. Da Equação 2.31, tem-se que (Gonzalez et al., 1989):

$$F6A = -sg(B_z) P^{1/2} V B_r \quad (2.39)$$

e da Equação 2.32 (Gonzalez, 1990; Gonzalez et al., 1989, 1990a):

$$F11A = -sg(B_z) P^{1/6} V B_r \sin^4(\theta/2). \quad (2.40)$$

A função $sg(B_z)$ dá a orientação de B_z (positiva ou negativa).

A denominação das funções de acoplamento energético $F\alpha$ advém da forma como este estudo foi desenvolvido. A Tabela 2.3 apresenta as funções de acoplamento, que estão dispostas conforme os parâmetros interplanetários envolvidos. Essa organização facilita a comparação das funções nos estudos do acoplamento energético desenvolvidos adiante.

TABELA 2.3 - FUNÇÕES DE ACOPLAMENTO ENERGÉTICO PRINCIPAIS

$E_V = -V B_z$	$F_6 = -P^{1/2} V B_z$	$F_{6A} = -sg(B_z) P^{1/2} V B_T$
$EPS = V B^2 \text{sen}^4(\theta/2) L_o^2$	$F_4 = P^{-1/3} V B^2 \text{sen}^4(\theta/2)$	$F_5 = P^{1/6} V B \text{sen}^4(\theta/2) \quad F_{11A} = -sg(B_z) P^{1/6} V B \text{sen}^4(\theta/2)$
$F_{14A} = -V B_T B_M K(s, \theta)$	$F_{14} = -P^{-1/3} V B_T B_M K(s, \theta)$	

OBS.: V é a velocidade e P, a pressão do vento solar. B é o campo magnético interplanetário, B_z a sua componente com orientação de sul para norte e B_T (= B_z + B_r) é o campo transversal (no sistema referencial da magnetosfera). θ é o ângulo entre B_z e B_r. K(s, θ) é uma função da geometria, onde s (z 1) é a razão das intensidades do campo geomagnético e do campo da balha magnética.

CAPÍTULO 3

DADOS EXPERIMENTAIS E CÁLCULOS

Neste capítulo são feitas considerações sobre os dados experimentais: tipos de medidas experimentais utilizadas, informações sobre o satélite ISEE-3, as defasagens temporais entre as medidas, a resolução temporal das medidas, a definição da polaridade do campo magnético interplanetário e ocorrências de troca de setores e a transformação das medidas magnéticas entre sistemas de coordenadas. São explicados também os cálculos efetuados e os tratamentos a que foram submetidos (interpolações, suavizações e correlações).

3.1 - DADOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho utiliza as observações experimentais, praticamente contínuas, do meio interplanetário obtidas pelo satélite americano ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer), o índice Dst, associado basicamente à corrente de anel, e o índice AE, que se refere ao eletrojato auroral. O satélite ISEE-3, no seu período curto de funcionamento (3 anos) e ainda não substituído, estava em uma órbita de halo (Figura 3.1) em torno do ponto lagrangeano Sol-Terra (aproximadamente a 220 raios terrestres). Antes de entrar em sua órbita definitiva, o satélite ISEE-3 descreveu uma trajetória afastando-se da Terra até o ponto lagrangeano (Russell et al., 1980). A Figura 3.2a apresenta a trajetória projetada no plano X-Y do sistema referencial Sol-Eclíptica (do dia 225, 13/agosto, ao dia 305, 01/novembro, de 1978). A Figura 3.2b apresenta a trajetória projetada no plano Y-Z no sistema Sol-Eclíptica. Durante o intervalo de 16 de agosto de 1978 a 28 de dezembro de 1979, estudado neste trabalho, o satélite forneceu um conjunto de dados contínuos, contendo o campo magnético interplanetário e os parâmetros do plasma do vento solar (velocidade, densidade e temperatura). O índice Dst, utilizado na identificação das tempestades geomagnéticas, e o índice AE foram reduzidos e tratados pelo "Geophysical Institute of The University of

Alaska". As informações técnicas do registro dos dados estão no Apêndice A. A Figura 3.3 mostra um dos gráficos dos dados obtidos neste trabalho.

Quanto aos processos físicos que ocorrem na magnetosfera envolvendo os parâmetros interplanetários medidos na posição do satélite ISEE-3, deve-se considerar um tempo de trânsito ΔT_1 do satélite até o nariz da magnetopausa e um tempo de transferência física ΔT_2 da magnetopausa para a corrente de anel, denominado tempo de processo. A Figura 3.4 ilustra essas relações de tempo. Esses intervalos temporais influem nos acoplamentos energéticos do vento solar com a corrente de anel. O índice Dst é medido na superfície terrestre no tempo universal t . Dessa forma, a pressão dinâmica do vento solar incidente na magnetopausa, e utilizada na obtenção do índice Dst^* (Dst corrigido da pressão dinâmica), deve ser correspondente ao tempo universal $t - \Delta T_1$, uma vez que as correntes na magnetopausa, moduladas pela pressão dinâmica, demoram poucos minutos, ≤ 3 minutos, para afetar o Dst (Nishida, 1978). Já os parâmetros interplanetários utilizados nas funções de acoplamento energético devem corresponder ao tempo universal $t - \Delta T_1 - \Delta T_2$.

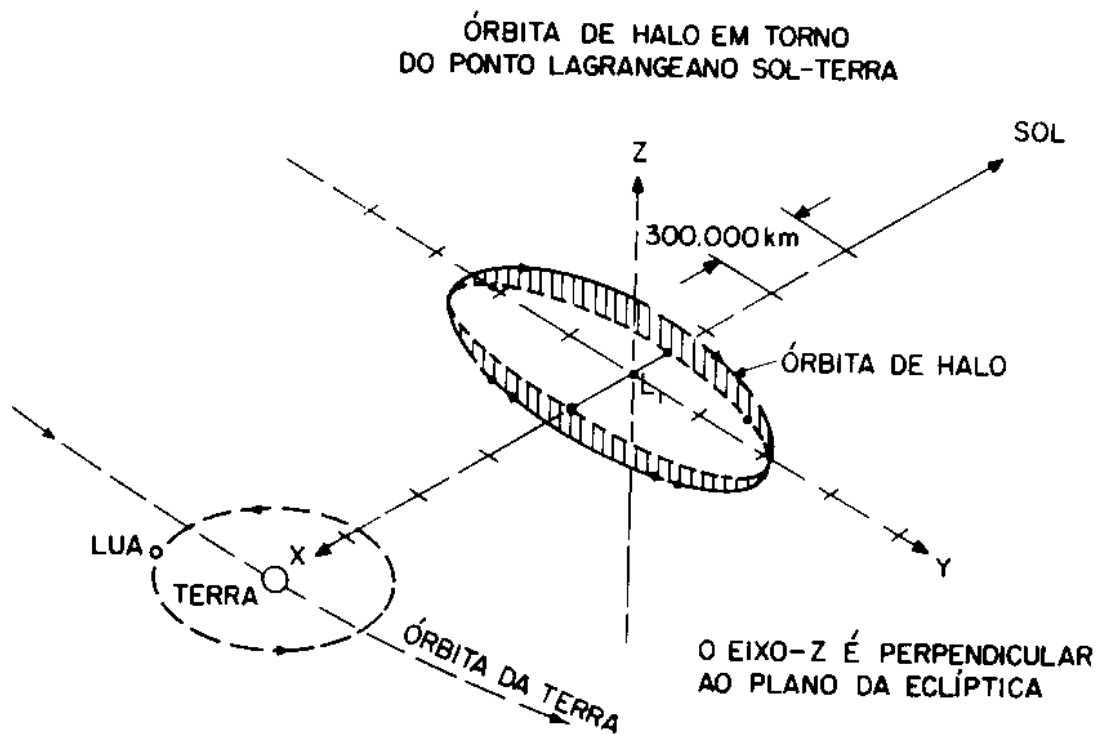


Fig. 3.1 - A órbita do satélite ISEE-3 no meio interplanetário em torno do ponto lagrangeano.

FONTE: Tsurutani et al. (1990), p. 118.

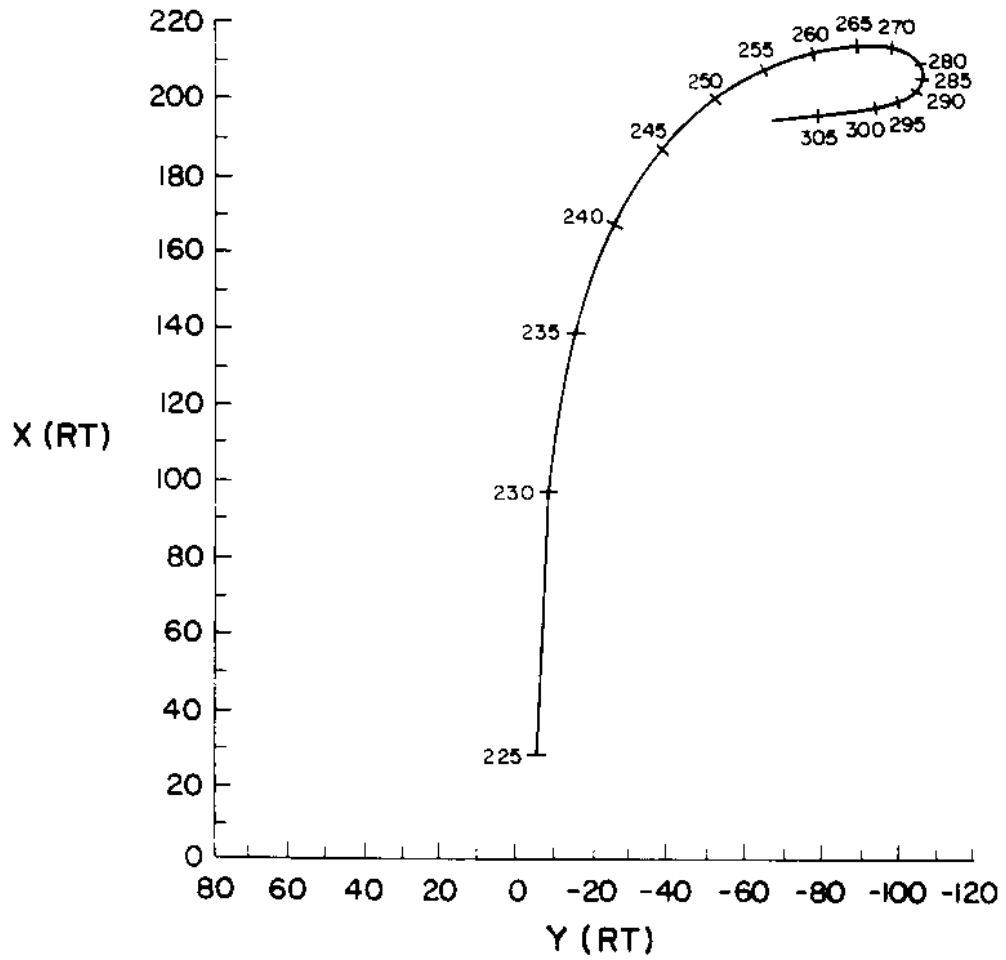


Fig. 3.2a - Projeção no plano X-Y da Eclíptica (GSE) da trajetória da órbita de halo do ISEE-3 em torno do ponto lagrangeano Sol-Terra. Os números denotam os dias do ano em 1978 e RT, raios terrestres.

FONTE: Russell et al. (1980), p. 381.

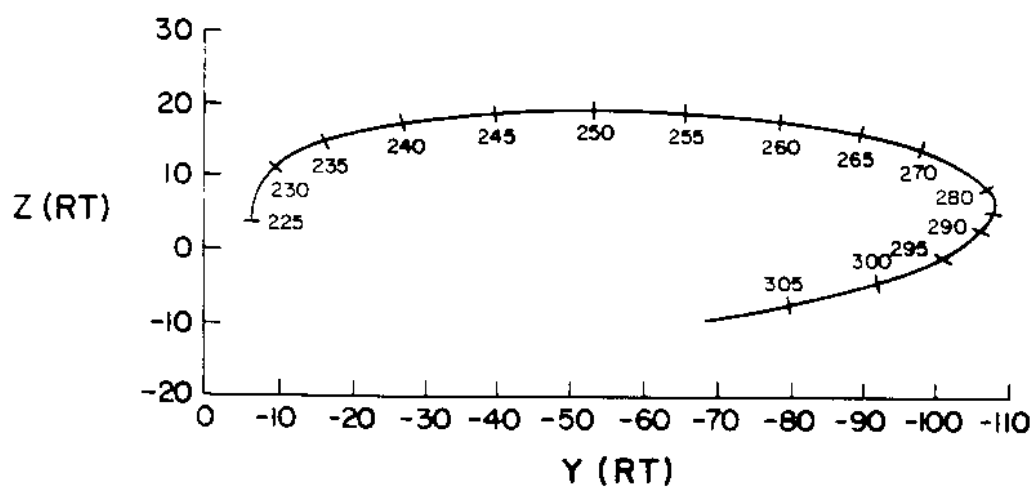


Fig. 3.2b - Projeção no plano Y-Z da Eclíptica (GSE) da Trajetória da órbita de halo do ISEE-3 em torno do ponto lagrangeano Sol-Terra. Os números denotam os dias do ano em 1978 e RT, raios terrestres.

FONTE: Russell et al. (1980), p. 381.

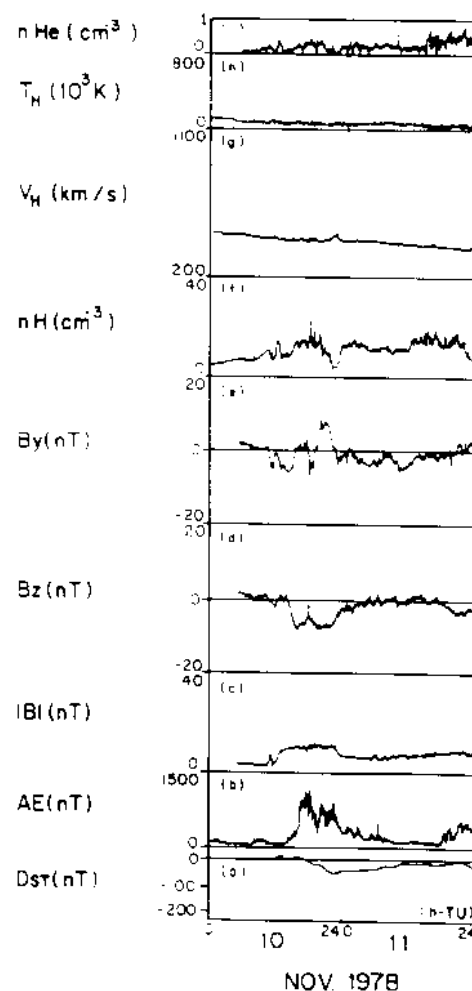


Fig. 3.3 - Medidas interplanetárias obtidas pelo satélite ISEE-3 e os índices de atividade geomagnética Dst e AE fornecidos pelo "World Data Center" utilizados no estudo de tempestades geomagnéticas.

- No gráfico estão representados: (a) índice Dst, em que se mostra a tempestade do dia 10-11/nov./1978; (b) índice AE; (c) magnitude do campo magnético interplanetário; (d) e (e) respectivamente as suas componentes B_y e B_z no sistema de coordenadas Sol-Eclíptica; (f) a densidade N_H , (g) a velocidade V_H (h) a temperatura T_H do hidrogênio do vento solar; e (i) a densidade de hélio N_{He} .

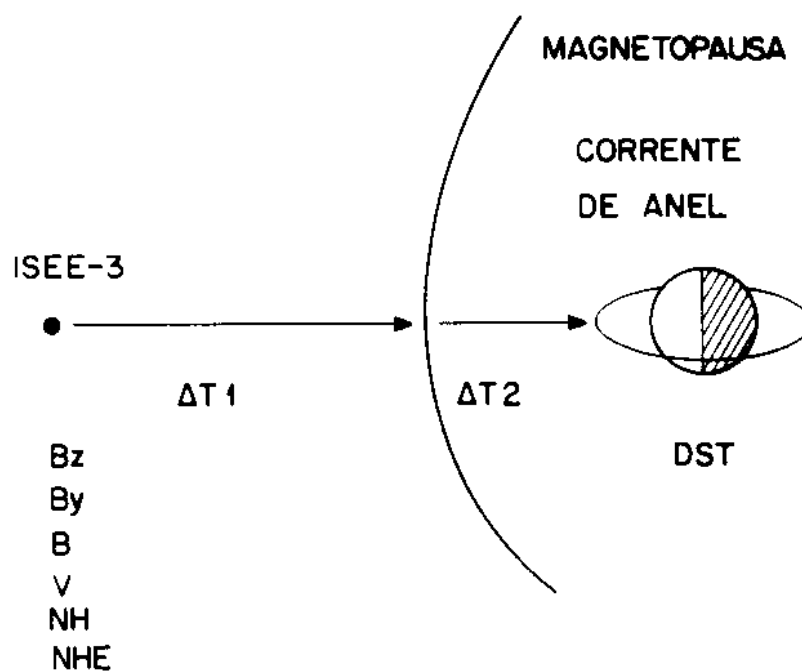


Fig. 3.4 - Parâmetros medidos na posição do satélite e o seu tempo de trânsito ΔT_1 até a magnetopausa. ΔT_2 é o tempo de transferência de efeitos da magnetopausa até a corrente de anel. O índice Dst é obtido de medidas na superfície da Terra.

Quanto ao índice Dst, que será utilizado no cálculo da injeção de energia na corrente de anel, analisou-se neste trabalho o efeito da resolução temporal com que é determinado. Comparou-se os índices Dst calculados nos trabalhos de Burton et al. (1975) e Feldstein et al. (1984) com o índice Dst equatorial horário (Sugiura e Poros, 1971). Burton et al. (1975) calcularam o índice Dst através de valores, supridos pelo "World Data Center", da componente geomagnética horizontal H de 11 estações de latitudes médias, determinados com a resolução de 2,5 min. Feldstein et al (1984) apresentaram esse Dst promediado em 1 hora. As Figuras 3.5 (tempestade geomagnética de 7-8 de fevereiro de 1967) e 3.6 (tempestade de 23-24 de fevereiro de 1967) mostram os índices Dst calculados nesses trabalhos e comparados com o índice Dst equatorial horário. A análise permite verificar que o índice Dst com resolução de 2,5 min obtido a partir de 11 estações apresenta flutuações mais rápidas, uma aparente defasagem de 1 hora e, às vezes, diferenças nas amplitudes. É provável que a defasagem e alteração na amplitude se devam à forma com que Burton et al. (1975) calcularam o seu índice Dst. No entanto, o seu comportamento geral, principalmente na fase principal, é similar ao índice Dst equatorial horário (que é obtido de 4 estações). O índice Dst de 2,5 min promediado em 1 hora confirma essa conclusão. Esse resultado será utilizado mais adiante ao se definir as formas de calcular as funções de acoplamento energético.

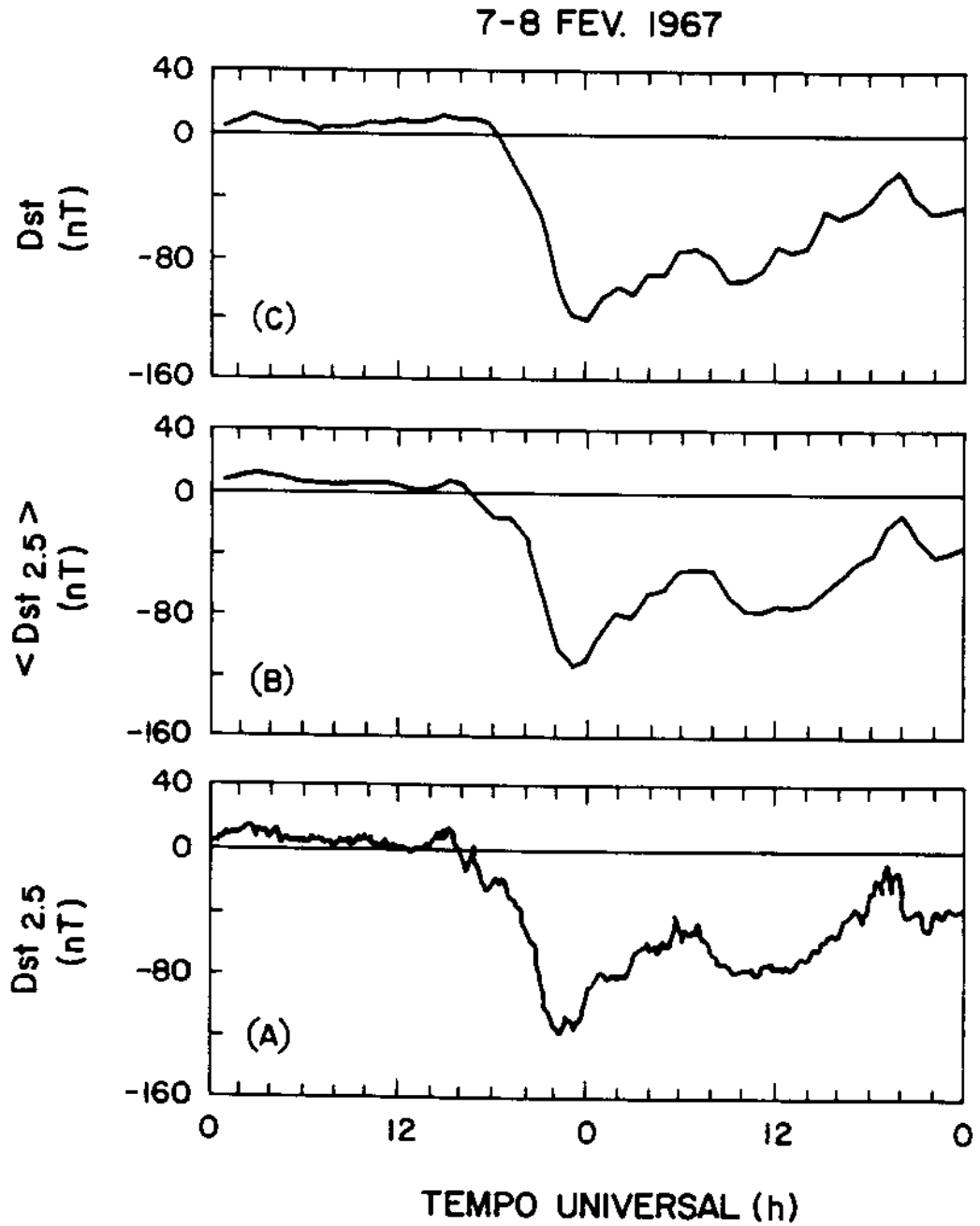


Fig. 3.5 - Comparação dos índices Dst (A) com resolução de 2,5 min (Burton et al., 1975), (B) com esta resolução mas promediado em 1 hora (Feldstein et al., 1984), (C) e o Dst horário equatorial (Sugiura e Poros, 1971) para 7-8 de fevereiro de 1967.

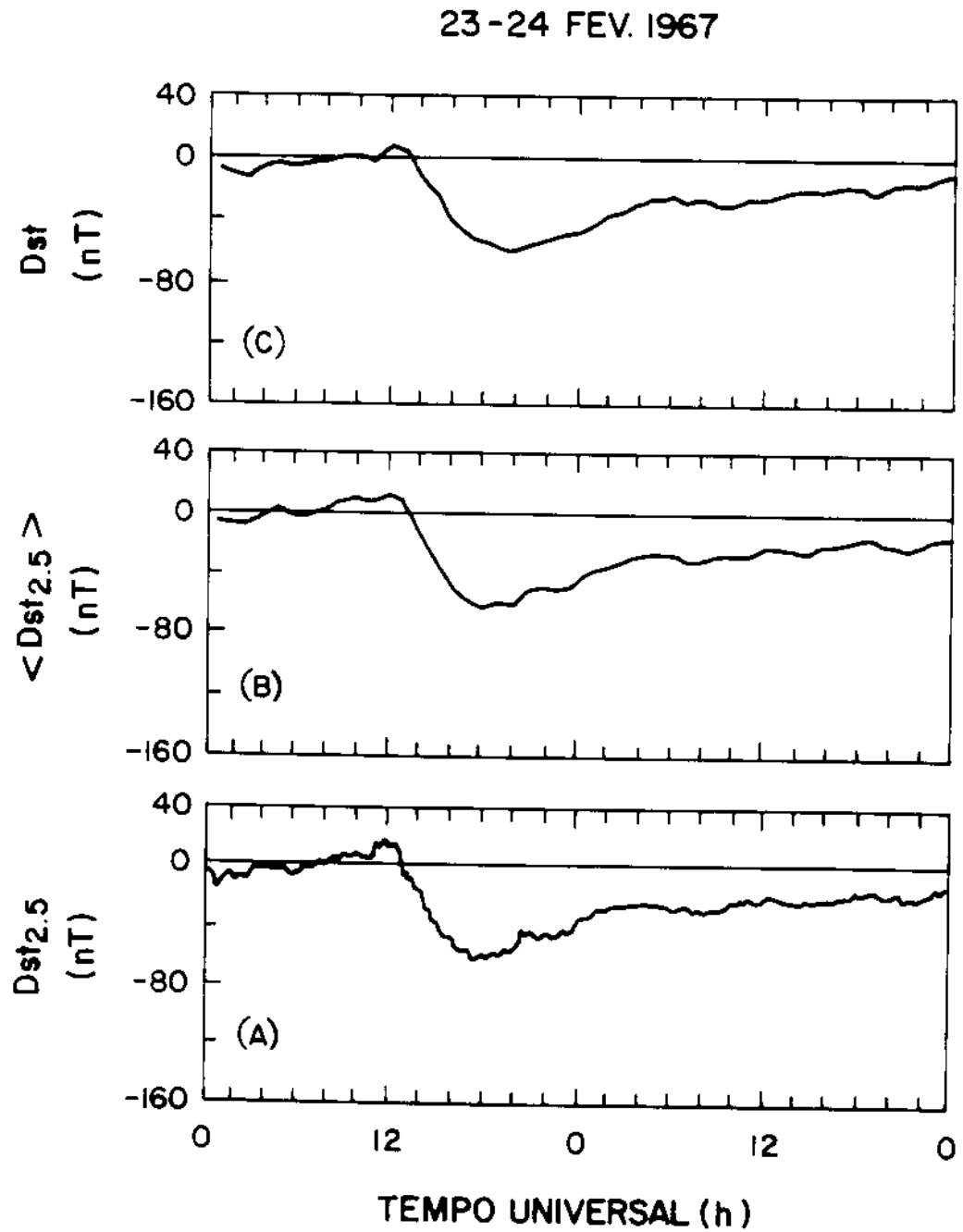


Fig. 3.6 - Comparação dos índices Dst (A) com resolução de 2,5 min (Burton et al., 1975), (B) com esta resolução mas promediado em 1 hora (Feldstein et al., 1984), (C) e o Dst horário equatorial (Sugiura e Poros, 1971) para 23-24 de fevereiro de 1967.

A lâmina de corrente heliosférica é uma região quase laminar que separa campos magnéticos interplanetários com orientações opostas, sendo que esse campo estende-se genericamente do Sol ao meio interplanetário ao longo de uma espiral, denominada espiral de Arquimedes (Figura 2.14). Desta forma, o CMI pode apresentar uma componente ao longo da espiral apontando para o Sol (S) ou afastando-se dele (A). A troca e a incursão de setores são definidas como inversão dessa componente do CMI ao longo da espiral, sendo identificada pela mudança de polaridade α_{SE} (ângulo entre a componente do CMI na Eclíptica e a normal à direção da espiral contida na Eclíptica, em um ponto da órbita). Na troca de setores, a polaridade básica mantém-se durante dias; já na incursão de setores tem duração de horas. A Figura 3.7 apresenta um esquema de interpretação da polaridade do CMI dentro de um setor bem definido. O sistema GSE representa o sistema de coordenadas Sol-Eclíptica, onde o eixo-X, contido na Eclíptica, aponta para o Sol, o eixo-Z é perpendicular à Eclíptica e positivo para o hemisfério norte celeste; e o eixo-Y é dado pela regra da mão direita e apontando no sentido oposto ao da órbita terrestre. A direção da espiral na posição da órbita da terra é basicamente de 45° com a direção da Terra-Sol. A Figura 3.8 esquematiza a definição de polaridade α_{SE} e relaciona a direção da espiral com os eixos do Sistema GSE. O ângulo α_{SE} entre 0° e 180° indica uma polaridade que se afasta do Sol (A) e entre -180° e 0° , indica polaridade que se dirige para o Sol (S). Através das componentes B_x e B_y do CMI, no sistema GSE, e utilizando relações trigonométricas, calcularam-se os gráficos de polaridade α_{SE} para o período estudado neste trabalho, exemplificado pela Figura 3.9. Com respeito à polaridade, convencionou-se representar sinteticamente as trocas de setores e incursões de setores nos gráficos da forma seguinte: A→S, troca de setor de "afastando do Sol" para "apontando para o Sol"; S→A, troca de setor de "apontando para o Sol" para "afastando do Sol"; e IS(Δt) como incursão de setor e entre parênteses a sua duração.

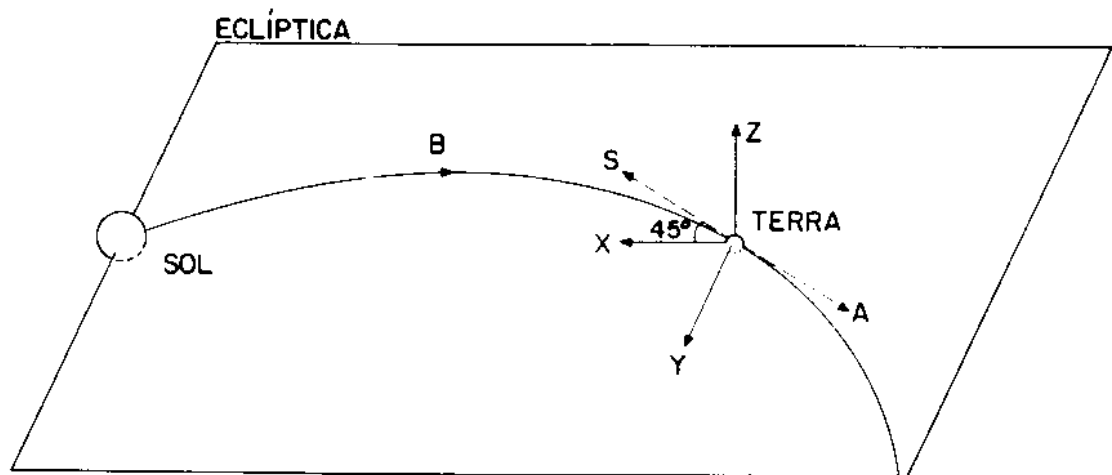


Fig. 3.7 - No sistema de coordenadas da Eclíptica (GSE), indica-se uma linha do campo magnético interplanetário **B** ao longo da espiral de Arquimedes.

- O eixo X aponta para o Sol, Z é perpendicular à Eclíptica e Y está contida na Eclíptica. Na órbita da Terra, a direção da espiral faz um ângulo de 45° com o eixo X. S está orientado para o Sol e A tem orientação oposta.

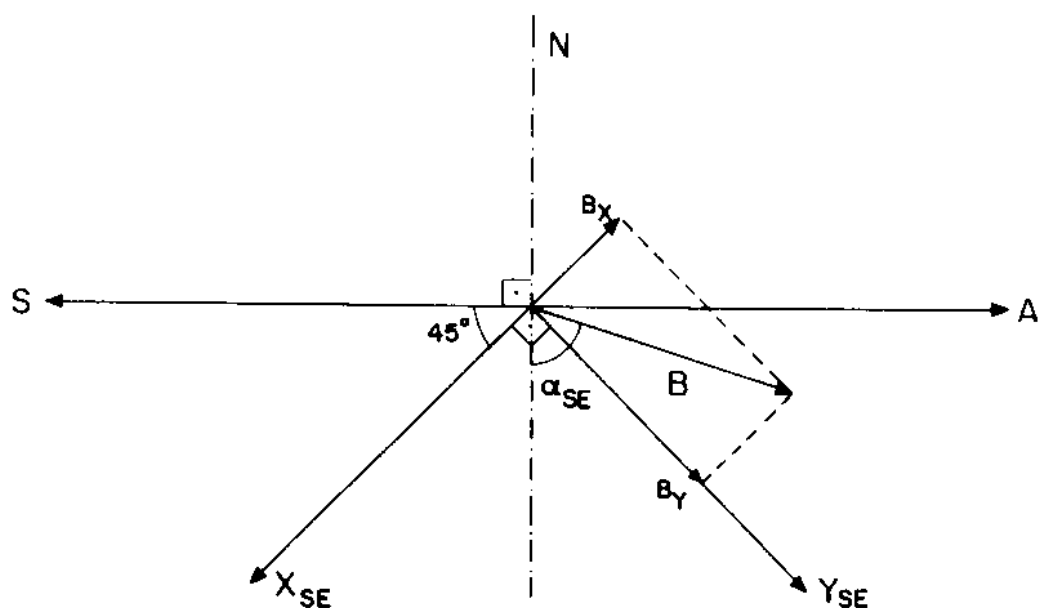


Fig. 3.8 - Campo magnético interplanetário projetado na Eclíptica (B) para a determinação da polaridade α_{SE} próxima à órbita terrestre.

- Indicam-se os eixos X_{GSE} e Y_{GSE} do sistema da Eclíptica (GSE). S indica a orientação para o Sol ao longo da espiral de Arquimedes e A para longe do Sol, onde N é a normal a espiral no ponto, contida na Eclíptica.

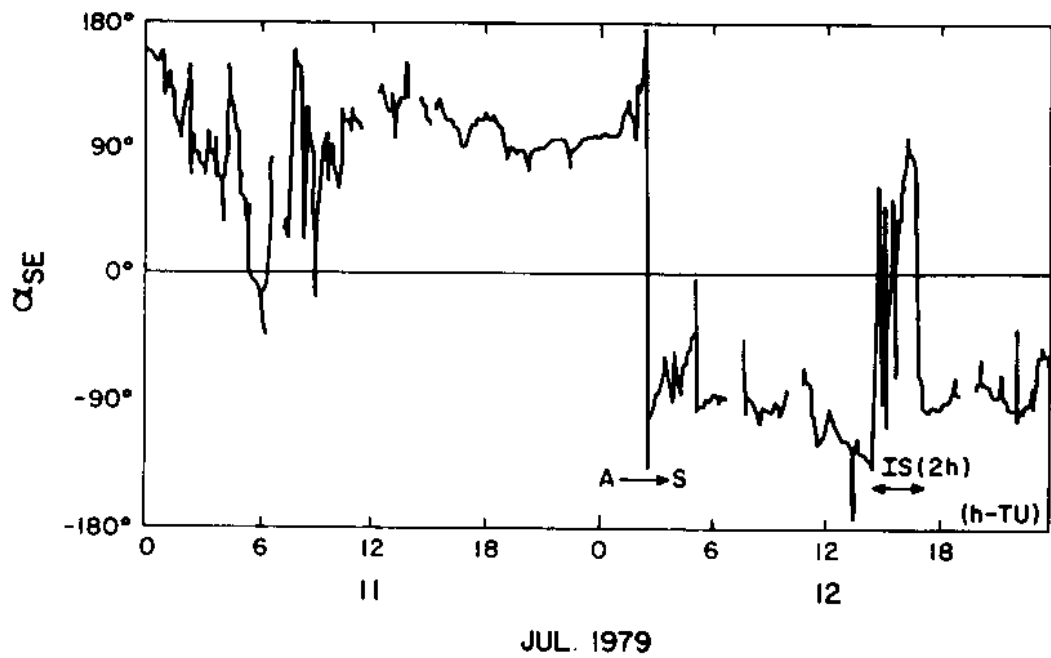


Fig. 3.9 - Exemplo de gráfico da polaridade α_{SE} do campo magnético interplanetário.

- O ângulo α_{SE} entre 0° e 180° indica que B afasta-se do Sol e entre -180° e 0° B dirige-se para o Sol. A → S indica uma troca de setor e IS(2h) uma incursão de setor com uma duração de 2 horas.

As medidas do campo magnético interplanetário (CMI) obtidas pelo satélite ISEE-3 foram realizadas no sistema referencial Terra-Sol-Eclíptica (GSE). No estudo da transferência de energia do vento solar para a magnetopausa, por meio das funções de acoplamento, a análise dessa transferência torna-se mais facilitada com as medidas do CMI apresentadas no sistema referencial da magnetosfera (GSM). O sistema cartesiano GSM tem o eixo-X apontando da Terra para o Sol, o eixo-Y é definido como perpendicular ao dipolo geomagnético, de forma que o plano X-Z contenha o eixo do dipolo e o eixo-Z aponte para o hemisfério norte do dipolo. O sistema GSM difere do sistema GSE simplesmente por uma rotação em torno do eixo-X (Russell, 1971). A transformação das coordenadas do sistema GSE para as coordenadas do sistema GSM pode ser conseguida através de um produto de matrizes (Ver Apêndice B).

3.2 - CÁLCULOS

Os dados básicos ou primários utilizados neste trabalho são os parâmetros do vento solar (densidades do hidrogênio e do hélio, temperatura e velocidade do vento solar, e o campo magnético interplanetário: intensidade e componentes), o índice de atividade geomagnética Dst e o índice de atividade auroral AE. Um exemplo é apresentado na Figura 3.3. Os parâmetros de maior importância para a análise são, fundamentalmente, os obtidos das funções de acoplamento $F\alpha$, a taxa temporal de energia injetada na corrente de anel Q, os gráficos $F\alpha \times Q$, as correlações desses valores e uma relação de ajuste dessas funções. Para a obtenção desses valores finais, há a necessidade de se calcular valores intermediários. A Figura 3.10 apresenta o diagrama de blocos do programa de cálculos, que a partir dos valores primários estabelece os valores calculados intermediários e finais.

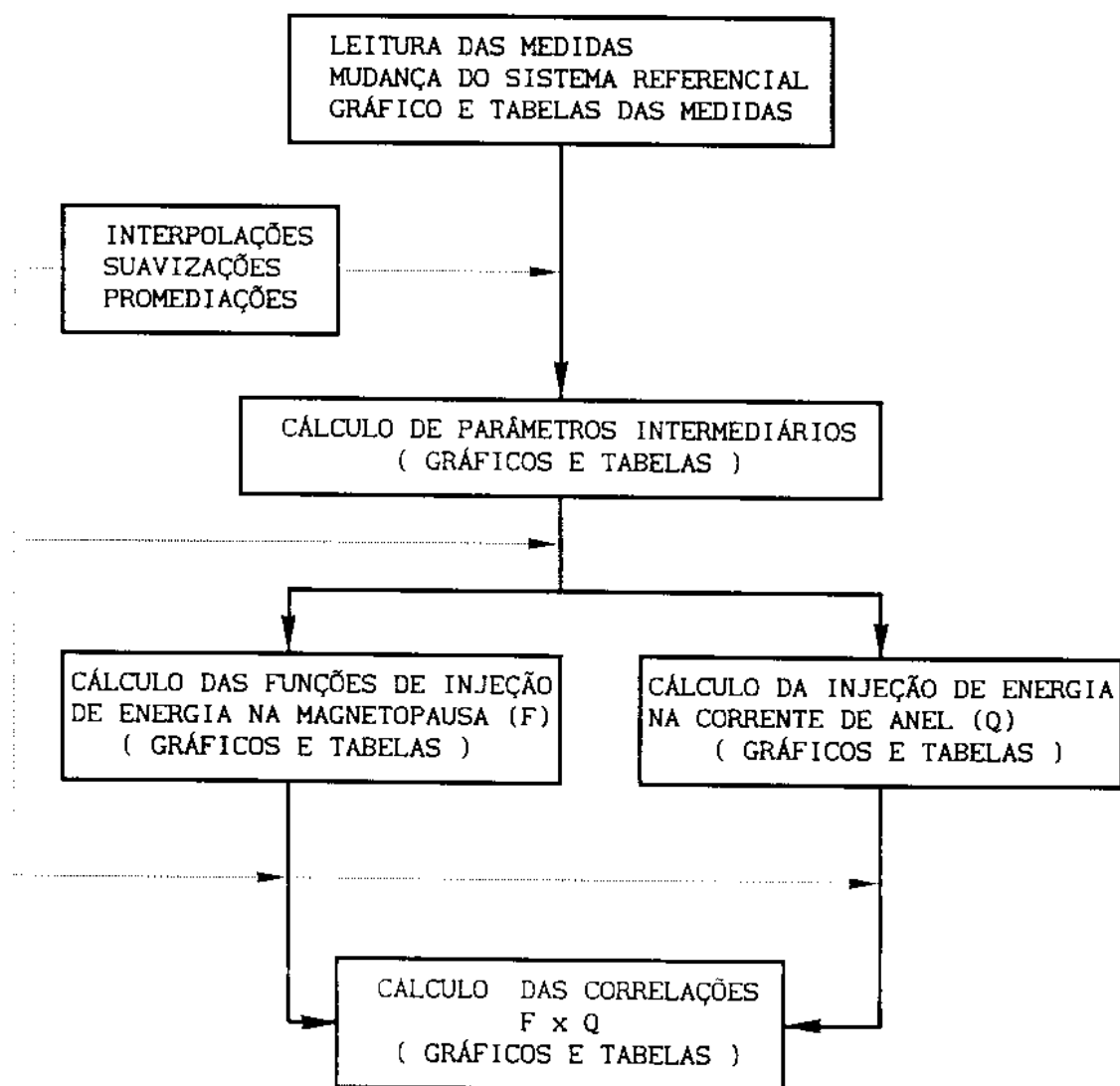


Fig. 3.10 - Diagrama de blocos do programa de computador utilizado para estudo do desenvolvimento de tempestades magnéticas.

No 1º bloco são feitas a leitura dos dados primários da fita magnética e a mudança das componentes do CMI do sistema GSE para o sistema GSM. São obtidos gráficos desses parâmetros primários e tabelas, contendo a fase principal da tempestade geomagnética estudada, para o intervalo de 2 dias. Os dados são apresentados a intervalos de 5 minutos. Um resultado ilustrativo é apresentado na Figura 3.11. No 2º bloco são feitas as interpolações nos dados, a suavização de valores (isto é, filtram-se as flutuações rápidas nas medidas) e podem ser obtidos valores médios. Um resultado desse tratamento é mostrado na Figura 3.12. A interpolação é feita sobre lacunas de até 4 pontos, isto é, sobre um intervalo de 20 minutos. A suavização é do tipo ideal, isto é, as lacunas são propagadas nas medidas para não distorcer os resultados. Os tratamentos desse bloco podem ser executados em qualquer ponto do sistema computacional de cálculos. Contudo, para a manutenção do máximo de consistência física, esse tratamento foi aplicado sobre os parâmetros primários. No 3º bloco calculam-se os parâmetros intermediários, tais como a pressão dinâmica do vento solar e a sua raiz quadrada. Um resultado é mostrado na Figura 3.13. No 4º bloco é feito o cálculo das injeções de energia na magnetopausa segundo o processo da reconexão magnética. Alguns resultados são mostrados na Figura 3.14. No 5º bloco é feito o cálculo da taxa temporal da injeção de energia na corrente de anel e também é obtido o índice Dst* (índice em que se procurou eliminar a influência das correntes da magnetopausa). As Figuras 3.15 e 3.16 mostram esses resultados, respectivamente. No 6º bloco, finalmente são obtidas a relação de Q e F e a correlação entre essas funções. A Figura 3.17 mostra um resultado (F5 e Q). A Figura 3.18 mostra a correlação correspondente. No Apêndice C estão descritos os programas quanto às entradas e saídas de dados. Detalhes desses tratamentos são apresentados a seguir.

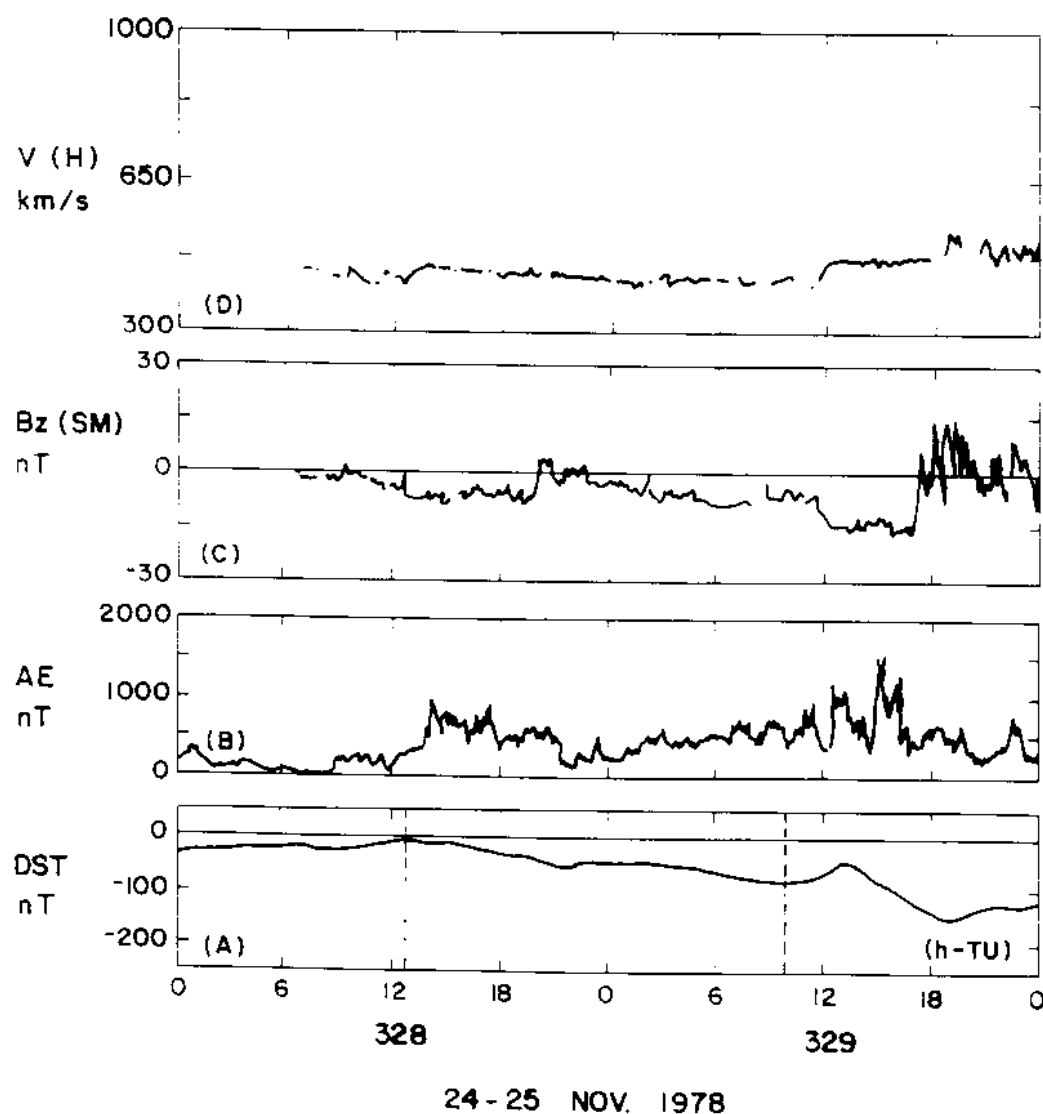


Fig. 3.11 - Dados primários referentes à tempestade do dia 24-25 de novembro de 1978.

- Apresentam-se em tempo universal o índice Dst (A); índice AE (B); a componente Bz do campo magnético interplanetário no sistema referencial da magnetosfera (C); e a velocidade do vento solar (D).

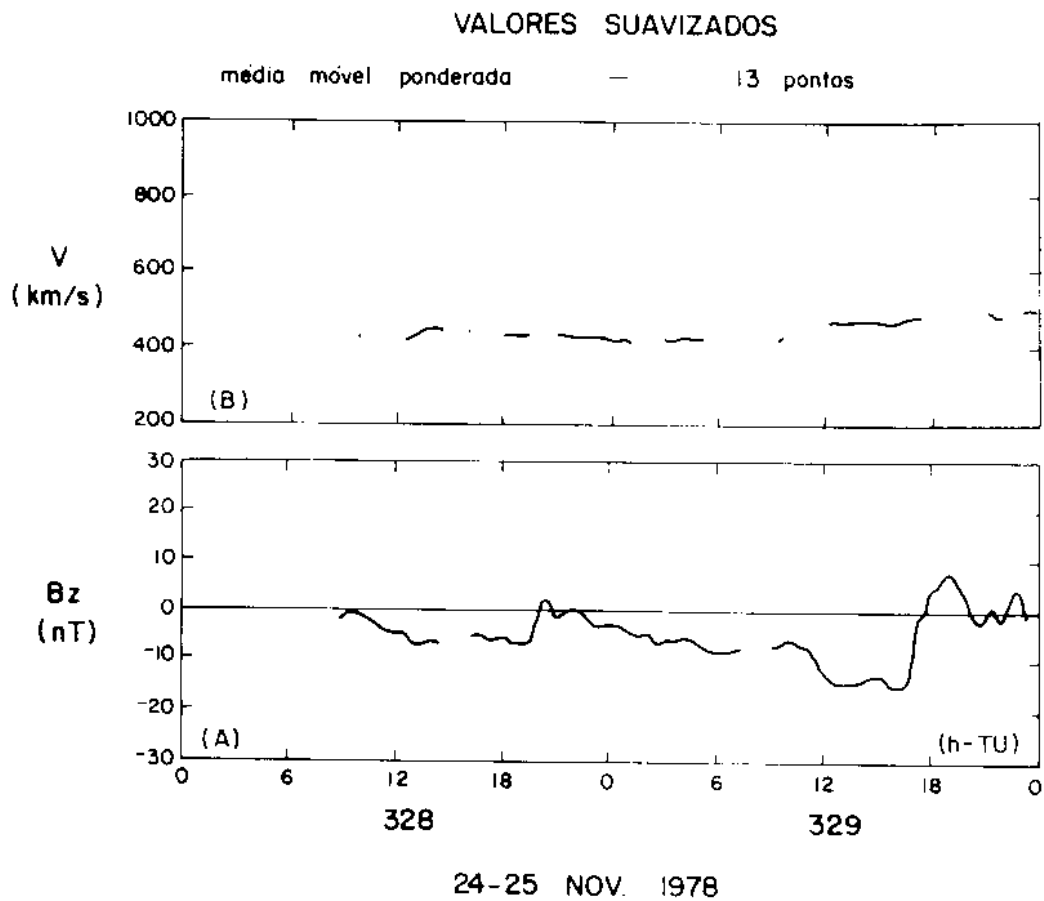


Fig. 3.12 - Parâmetros básicos suavizados: (A) a componente B_z do campo magnético interplanetário no sistema referencial da magnetosfera e (B) a velocidade V do vento solar.

- A suavização é obtida por promediação ponderada, com os coeficientes dados pelo método das ordenadas gaussianas e agindo como filtro ideal, pois propaga as lacunas.

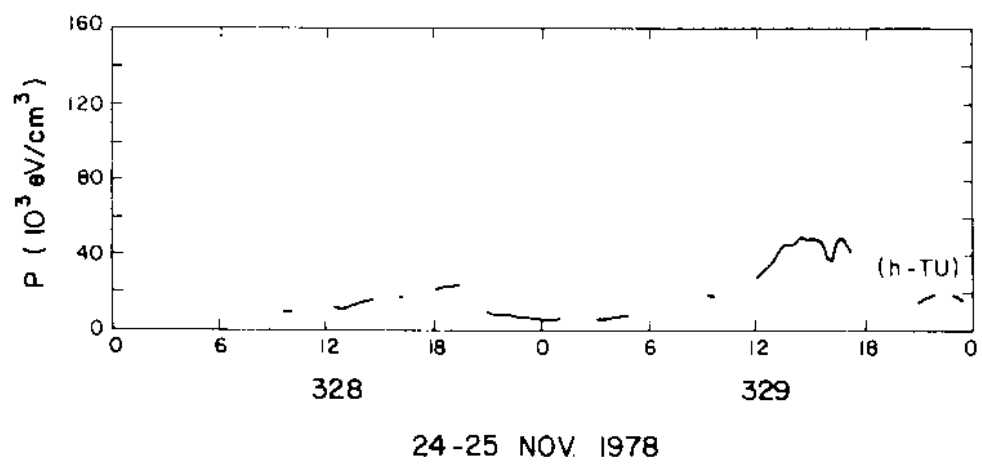


Fig. 3.13 - Pressão dinâmica do vento solar, P , suavizada para o período de 24-25 de novembro de 1978.

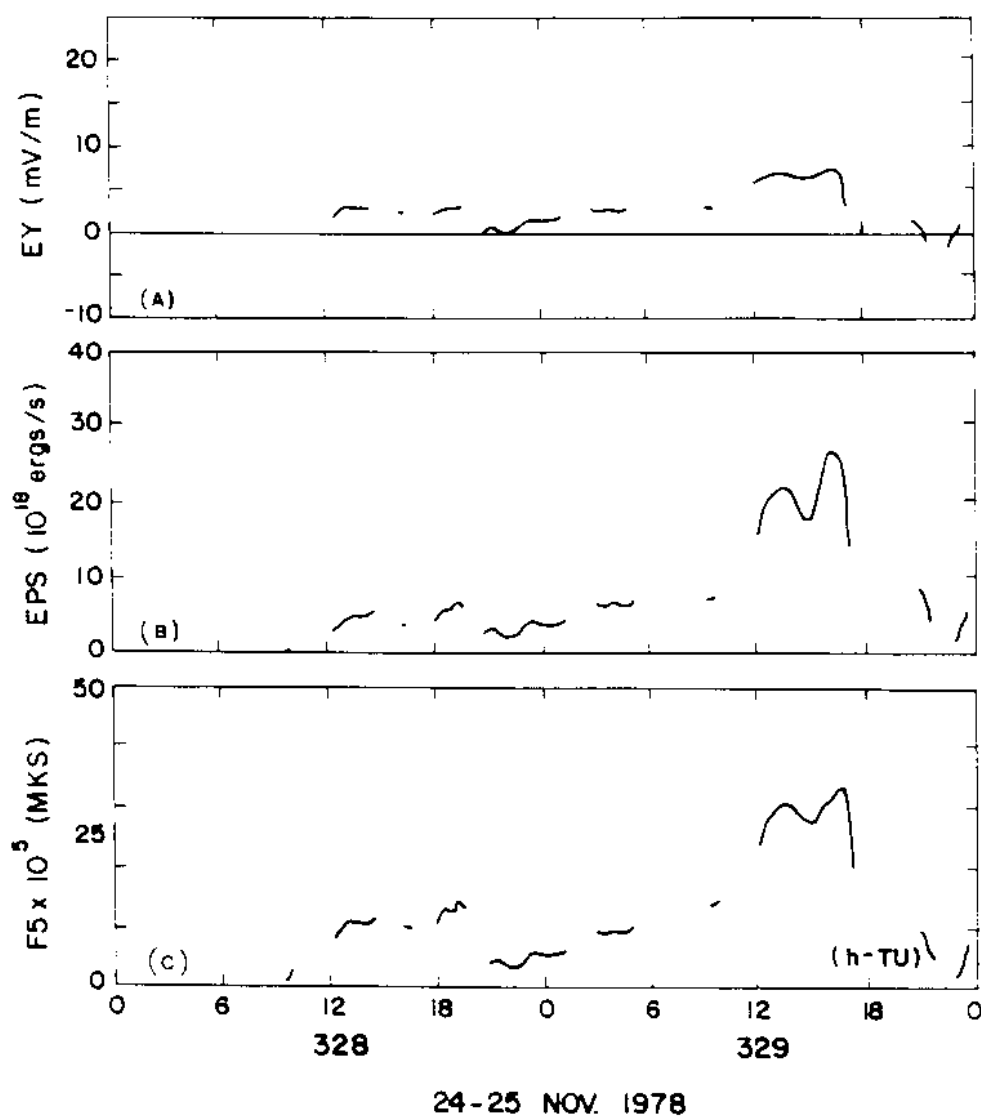


Fig. 3.14 - Funções de acoplamento energético no período de 24-25 de novembro de 1978: (A) função EY; (B) função EPS; (C) e função F5 ($=P^{1/6}V B \text{ Sen}^4(\theta/2)$).

- Onde B é a magnitude do campo magnético interplanetário, θ é o ângulo da componente no plano Y-Z e o eixo Z no sistema da magnetosfera (GSM), P é a pressão dinâmica e V é a velocidade do vento solar.

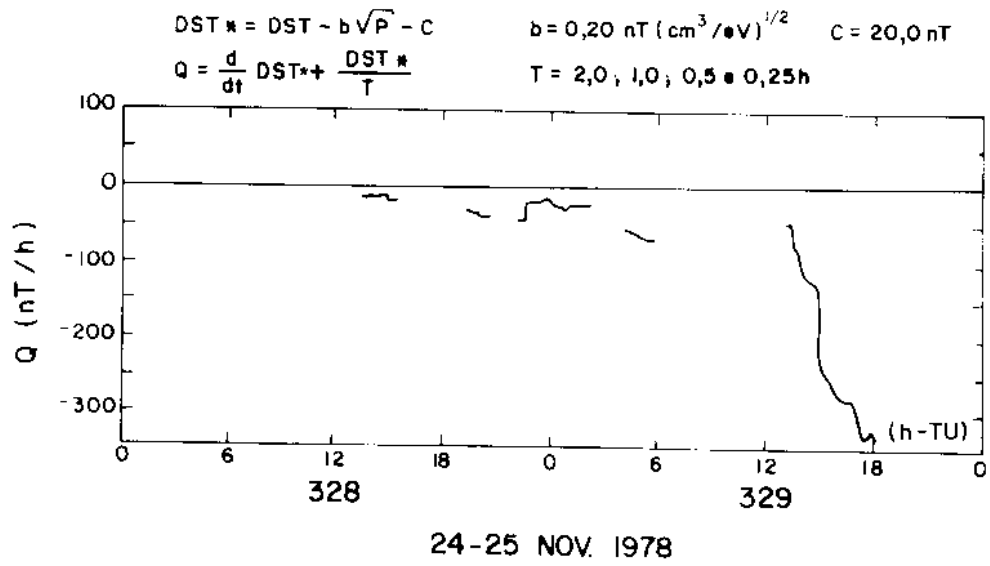


Fig. 3.15 - Função Q (taxa temporal da injeção de energia na corrente de anel) no período de 24-25/nov/1978.

- Indicam-se as equações adotadas para Q e Dst^* , onde P é a pressão dinâmica do vento solar, b e C são constantes empíricas e τ o fator de decaimento temporal igual a 2h para $-50 \leq Dst \leq 0$, 1h para $-80/-50 \text{ nT}$, 0,5h para $-100/-80 \text{ nT}$ e 0,25h para $Dst \leq -100 \text{ nT}$.

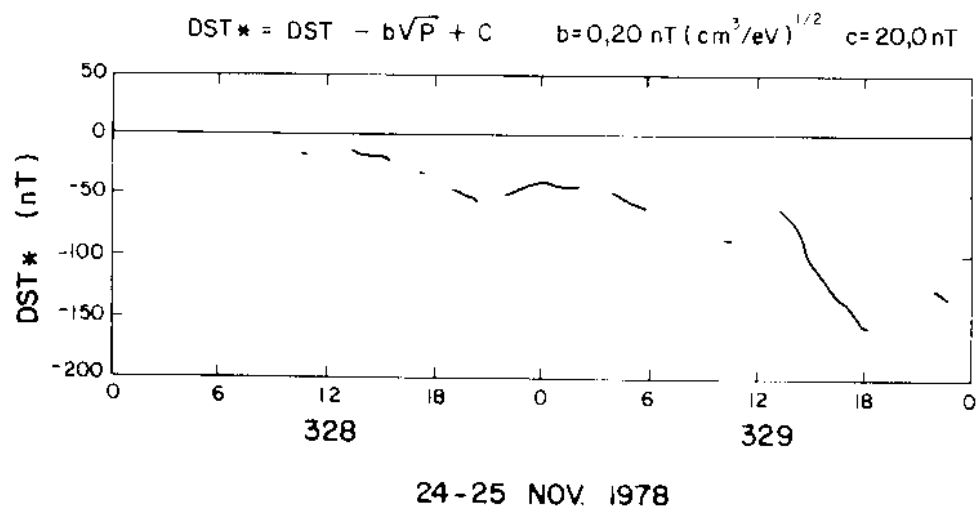


Fig. 3.16 - Apresenta-se o valor DST^* , que é o índice Dst corrigido da influência da pressão dinâmica P do vento solar.

~ Indica-se a equação e as constantes b e C .

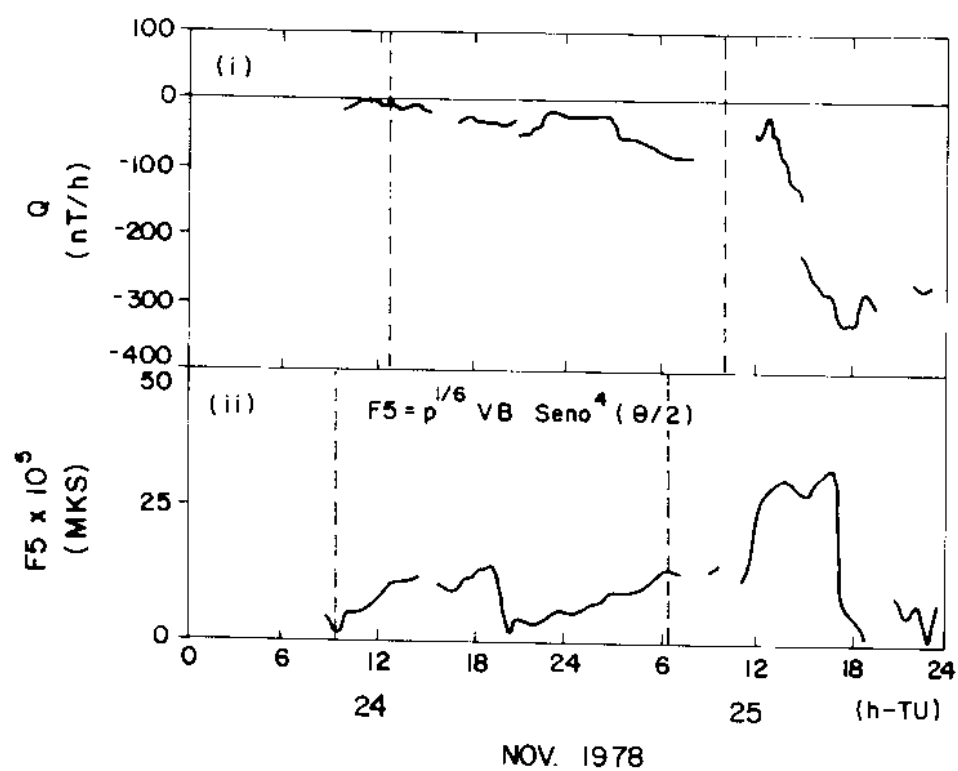


Fig. 3.17 - Taxas temporais da: (i) injeção de energia na corrente de anel e (ii) injeção de energia na magnetopausa, para a tempestade magnética moderada do período de 24-25 de novembro de 1978.

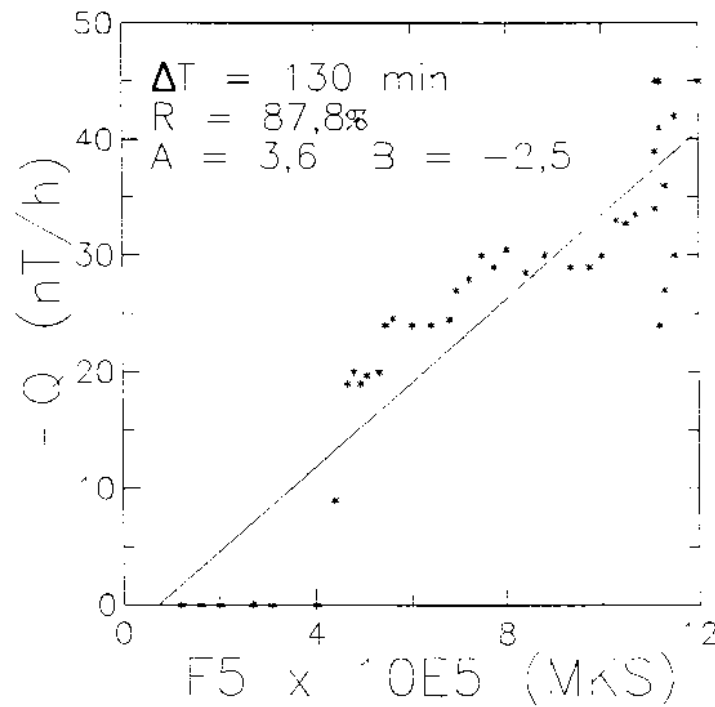


Fig. 3.18 - Cálculo da correlação (R) das taxas temporais da energia injetada na magnetopausa ($F5$) e da energia injetada na corrente de anel (Q), para a tempestade magnética moderada do período de 24-25 de novembro de 1978.

- ΔT é a defasagem temporal, incluindo o tempo de trânsito ΔT_1 e o tempo de processo ΔT_2 . No ajuste linear, A é o coeficiente de inclinação e B é a constante linear.

Com a utilização do índice Dst atual é necessário suavizar os parâmetros interplanetários com respeito às flutuações que aconteçam com períodos menores do que 1 hora; embora esse Dst não difira muito dos Dst com resoluções temporais menores (como analisado na seção anterior). A suavização (alisamento) dos parâmetros destacará as estruturas de longa duração pesquisadas. Para evitar distorções de amplitude e de fase na filtragem será utilizada a média ponderada móvel. Nessa média, os coeficientes de ponderação serão obtidos das ordenadas da curva padrão normal (denominado de método das ordenadas gaussianas), obedecendo a dois critérios:

- 1) A resposta do filtro, que é a razão das amplitudes dos sinais de saída e entrada, nas flutuações com períodos menores do que 1 hora deve ser igual ou menor que 30%;
- 2) Com a adoção de um filtro ideal, o número de termos na ponderação não deve ser excessivamente restritivo, impedindo o cálculo da correlação. Pois, para se testar a condição de não-coincidência da correlação R obtida, supondo $R \geq 70\%$, é necessário dispor de um número igual ou maior que 14 pontos (dados utilizados).

A suavização de curvas através da média ponderada (Holloway Jr., 1958; Reiff, 1983; WMO, 1966) é dada pela expressão:

$$\langle X \rangle = \sum_{k=-N}^N W_k X_k, \quad (3.1)$$

onde X_k é o valor do parâmetro, W_k é o coeficiente de ponderação e $\langle X \rangle$ é o valor alisado. Os coeficientes de ponderação são obtidos através do método das ordenadas gaussianas (descrito adiante), dados pela relação:

$$6 \sigma_G = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

onde σ_G é o desvio padrão da distribuição gaussiana (ordenadas da curva padrão normal, Tabela 46 de Spiegel (1973)); ΔT é o intervalo temporal sobre o qual se fará a média; e Δt é o intervalo de tempo em que se obteve medidas consecutivas (isto é, a resolução temporal das medidas). A resposta de um filtro com pesos obtidos por esse método cai abaixo de 50% nos comprimentos de onda ≥ 6 desvios padrões da curva gaussiana e permanece muito menor para todos os comprimentos de ondas mais curtos. Assim:

$$6 \sigma_G = \frac{60 \text{ min}}{5 \text{ min}} = 12. \quad (3.3)$$

A Tabela 3.1 apresenta os valores obtidos para os coeficientes de ponderação a partir do método das ordenadas gaussianas. k indica o k -ésimo coeficiente; X ($=|k|/\sigma_G$) é o valor da abcissa na curva gaussiana; e W_k é o coeficiente normalizado, obtido das ordenadas. Admite-se um truncamento da série quando $W_k/W_0 \leq 0,10$.

A resposta do filtro estabelecido é dada por (Holloway Jr., 1958; WMO, 1966):

$$R(f) = \exp(-2\pi^2 \sigma_G^2 f^2), \quad (3.5)$$

onde f é a frequência em ciclos por intervalo entre as observações sucessivas na série temporal ($f=\Delta t/\Delta T$, em que ΔT é o período). Assim, para $\Delta T=1h$, $\Delta t=5min$ e $\sigma_G=2$: $R(\Delta T=1h)=0,58$. Na obtenção de um filtro com $R(\Delta T=1h)\approx 0,30$, como foi proposto no trabalho, obtém-se: $\sigma_G=2,96\approx 3$. A Tabela 3.2 apresenta os coeficientes de ponderação utilizados no trabalho. A curva da Figura 3.19 mostra a resposta dos filtros com a frequência. Para o filtro adotado, há uma propagação de 13 pontos nas bordas das lacunas existentes nos dados experimentais e uma filtragem bem eficiente (pois $R(\Delta T\leq 1h) \leq 0,30$).

TABELA 3.1 - COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA $\sigma_G = 2$

Método das ordenadas gaussianas $\sigma_G = 2$ [$R(\Delta T \leq 1h) \leq 0,50$]			
k	t (= $ k /\sigma_G$)	ordenada	W_k
0	0,0	0,3989	0,2041
±1	0,5	0,3521	0,1802
±2	1,0	0,2420	0,1238
±3	1,5	0,1295	0,06627
±4	2,0	0,0540	0,02763
±5	2,5	0,0175*	
		$\Sigma=2,9111$	$\Sigma=1$

OBS.: Tabela dos coeficientes normalizados W_k utilizados na média ponderada determinados pelo método das ordenadas gaussianas. W_k é o k-ésimo coeficiente, σ_G é o desvio padrão da distribuição gaussiana, a abcissa t com que se determina a ordenada na curva gaussiana, R é a resposta do filtro passa-baixo e * indica o truncamento da série quando $W_k/W_0 < 0,10$. Σ é o somatório dos coeficientes.

TABELA 3.2 - COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO PARA $\sigma_G = 3$

Método das ordenadas gaussianas $\sigma_G = 3 \quad [R(\Delta T \leq 1h) \leq 0,30]$			
k	t (= k / σ_G)	ordenada	W_k
0	0,0	0,3989	0,1363
∓ 1	0,3333	0,3778	0,1291
∓ 2	0,6667	0,3209	0,1097
∓ 3	0,9999	0,2444	0,08353
∓ 4	1,3333	0,1647	0,05629
∓ 5	1,6667	0,1006	0,03438
∓ 6	1,9999	0,0551	0,01883
∓ 7	2,3333	0,0264*	
		$\Sigma=2,9259$	$\Sigma=1$

OBS.: Tabela dos coeficientes normalizados W_k utilizados na média ponderada determinados pelo método das ordenadas gaussianas. W_k é o k-ésimo coeficiente, σ_G é o desvio padrão da distribuição gaussiana, a abcissa t com que se determina a ordenada na curva gaussiana, R é a resposta do filtro passa-baixo e * indica o truncamento da série quando $W_k/W_0 < 0,10$. Σ é o somatório dos coeficientes.

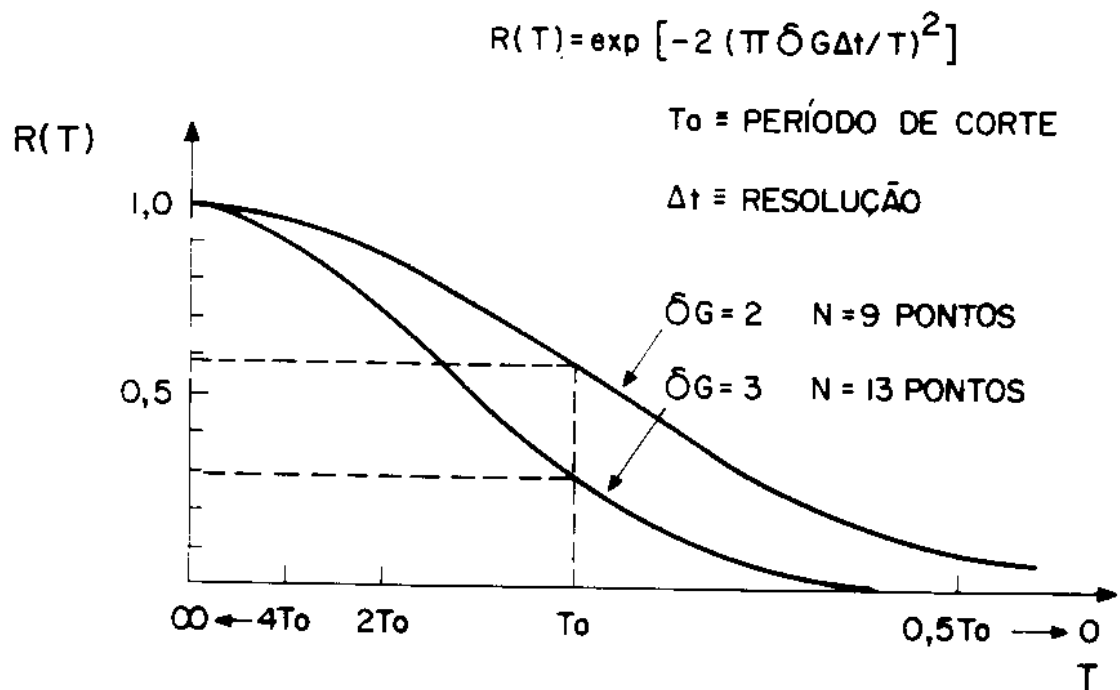


Fig. 3.19 - Curva de resposta da amplitude de sinal em função do seu período, obtida com um filtro passa-baixo produzido através de média ponderada móvel.

- Os coeficientes de ponderação são determinados pelo método das ordenadas gaussianas.

No Capítulo 5 estudar-se-á a relação dos parâmetros interplanetários, associados sob uma relação funcional $F\alpha$ de energia injetada na magnetopausa devido ao processo de reconexão, com a taxa temporal de energia injetada na corrente de anel Q . Para verificar esta relação, estabelece-se a correlação de $F\alpha$ e Q . Para dar a essa correlação o seu melhor sentido físico, trata-se matematicamente os parâmetros interplanetários antes de se obter a correlação. O índice Dst é um valor promediado horário e interpolado no intervalo de 1 hora. Comparando o índice Dst dessa média horária com um índice Dst com resolução de 5 minutos, nota-se que as suas flutuações temporais não são tão rápidas (acredita-se que o próprio processo de transferência e dissipação de energia pela reconexão tenha uma inércia relativa). O índice Dst horário interpolado é uma boa aproximação para o índice com maior resolução. Desta forma, os parâmetros primários interplanetários que compõem a função de injeção $F\alpha$ sofrerão uma suavização por média ponderada.

No cálculo da função Q da energia injetada na corrente de anel, a pressão dinâmica P do vento solar incidente na magnetopausa também será suavizada por média ponderada, devido ao Dst ser média horária.

Pelas considerações anteriores, os parâmetros básicos serão submetidos ao seguinte tratamento:

- serão promediados em 1 hora;
- o método de promediação será simples mas com uma resposta física conhecida. O método será o da média ponderada móvel, com a importância dos termos na média determinada pelo método das ordenadas gaussianas.

- O filtro para essa suavização terá características de um filtro ideal, isto é, desprezará pontos disponíveis em torno de lacunas de dados para não distorcer os valores médios obtidos. Lacunas de até 4 pontos serão interpoladas antes da promediação.

A relação das funções de acoplamento energético $F\alpha$ com a função de injeção de energia da corrente de anel Q será estudada com base na correlação cruzada de seus valores, sendo possível variar a defasagem temporal entre os valores de $F\alpha$ e Q . Considerando que os dados consistem de N pares de valores (X_i, Y_i) , o grau de correlação linear é dado pela expressão (Bevington, 1969):

$$R = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\left[N \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \right]^{1/2} \left[N \sum y_i^2 - \left(\sum y_i \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (3.6)$$

O coeficiente de correlação R , entretanto, não pode ser utilizado isoladamente para uma interpretação. É necessário informar até que ponto este resultado poderia ter sido apenas uma coincidência. A função p_c dá a probabilidade de as variáveis observadas virem de um padrão de população não-correlacionado, dada por (Bevington, 1969):

$$p_c(R, N) = 2 \int_{|R|}^1 \frac{\Gamma[(\nu+1)^{1/2}]}{\pi^{1/2} \Gamma(\nu/2)} (1-\rho^2)^{(\nu-2)/2} d\rho, \quad (3.7)$$

onde: $\nu = N-2$ e Γ é a função gama. Um valor muito pequeno de $p_c(R, N)$ significa que as variáveis observadas estão correlacionadas. Um ajuste linear para esses pares de pontos é dado pela solução:

$$Y = a + b X, \quad (3.8)$$

onde:

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.9)$$

e

$$b = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.10)$$

As correlações serão tratadas considerando ainda algumas condições:

- Para cada evento só é estabelecida uma conclusão sobre a correlação, levando em conta o seu valor ($\geq 0,7$), a probabilidade p de valor nula de correlação ($\leq 0,05$), os gráficos comparados das funções de energia $F\alpha$ e Q e o gráfico $F\alpha \times Q$ das medidas utilizadas na correlação.
- No cálculo de Q, a pressão dinâmica P é ajustada ao Dst por um tempo médio de defasagem ΔT_1 dispendido no trânsito da posição do satélite até a posição da magnetopausa.

Finalmente, como fontes valiosas de subsídios a esses tipos de tratamentos matemáticos podem ser indicados Bevington (1969) e Meyer (1975) e, quanto às análises estatísticas na Física Espacial, Baker (1986) e Reiff (1983).

CAPÍTULO 4

AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS E SUAS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS

Neste capítulo são feitas a identificação das tempestades geomagnéticas moderadas, a seleção dos eventos de tempestade a serem analisados quanto às origens interplanetárias, a identificação dos fenômenos interplanetários responsáveis pelas tempestades e ainda a comparação das tempestades moderadas com os outros regimes de tempestades.

4.1 - IDENTIFICAÇÃO DAS TEMPESTADES MODERADAS E SELEÇÃO DE EVENTOS DE TEMPESTADE

O início de uma tempestade geomagnética é definido por um decréscimo do índice Dst, sendo o Dst menor ou igual a zero. Este índice atinge um valor mínimo, denominado $Dst_{MÍN}$. O fim de uma tempestade é definido pelo Dst igual a zero após a fase de recuperação ou pelo início de uma outra tempestade que interrompe essa recuperação. Uma divisão das tempestades geomagnéticas em amplitudes procura facilitar a identificação de características associadas às tempestades, como fontes de injeção de energia na corrente de anel, processos dinâmicos de injeção, morfologia, composição e taxas temporais de dissipação da corrente de anel. As tempestades geomagnéticas intensas ($Dst_{MÍN} < -100$ nT) do período de agosto de 1978 a dezembro de 1979 foram estudadas nos trabalhos de Gonzalez et al. (1989), Gonzalez et al. (1990a, 1990b), Gonzalez e Tsurutani (1987) e Tsurutani et al. (1988b). A Figura 4.1 (Gonzalez e Tsurutani, 1987) apresenta as informações básicas das tempestades intensas desse período (origem interplanetária, início da tempestade, $Dst_{MÍN}$, a intensidade do CMI e a sua componente com orientação norte-sul, indicando-se o tempo das suas ocorrências). Não se pode extrapolar com segurança as conclusões obtidas quanto às tempestades intensas para o regime das tempestades menos intensas. Dessa forma, tornou-se importante estudar esse outro regime. As tempestades muito fracas

apresentam-se, muitas vezes, ambíguas em sua caracterização dada pela assinatura do índice Dst. Definiu-se portanto um regime de tempestades moderadas, cujo $Dst_{\text{MÍN}}$ está no intervalo de -100 nT a -50 nT, que serão estudadas essencialmente quanto ao desenvolvimento de sua fase principal. Devido às pequenas variações no próprio cálculo do índice Dst, operacionalmente as tempestades moderadas foram consideradas de -110 nT a -47 nT.

A Tabela 4.1 relaciona as tempestades geomagnéticas moderadas identificadas através do índice Dst no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979, indicando os tempos de início, de fim, do $Dst_{\text{MÍN}}$ e o próprio valor do $Dst_{\text{MÍN}}$. Nessa tabela os eventos de tempestade, definidos como as tempestades moderadas que tem um valor de Dst inicial ≥ -12 nT, são indicados por um asterisco. Esses eventos, com tempestades bem caracterizadas, permitem um estudo das origens interplanetárias e do desenvolvimento da fase principal. Supôs-se neste trabalho uma defasagem temporal ≤ 24 horas entre os fenômenos interplanetários e as tempestades, o que se mostrou consistente no prosseguimento deste estudo. Da tabulação, constatou-se a ocorrência de 78 tempestades moderadas, tendo sido obtidos 40 eventos de tempestade.

No Apêndice D são apresentados os registros de cada um dos 40 eventos de tempestades, dados pelo índice Dst, juntamente com o índice AE e os parâmetros interplanetários: as densidades numéricas do hidrogênio (NH) e do hélio (NHE), a temperatura do hidrogênio (TH), a velocidade do vento solar (V), a intensidade (B) e a polaridade (α_{SE}) do CMI e as suas componentes, no sistema de referência da magnetosfera, com orientação sul-norte (Bz) e com orientação alvorada-crepúsculo (By).

Na Tabela 4.2 estão relacionados os choques interplanetários ocorridos no período dos eventos de tempestade (Zwickl, 1982). Os choques foram identificados através dos dados de plasma solar do Laboratório de Los Alamos, Novo México, e dos dados do

CMI do JPL. A tabela apresenta a data e o tempo de ocorrência do choque interplanetário, o número de Mach e breves comentários sobre as características do choque. Houve um total de 59 choques e 4 eventos duvidosos que, por não terem sido confirmados, não foram considerados.

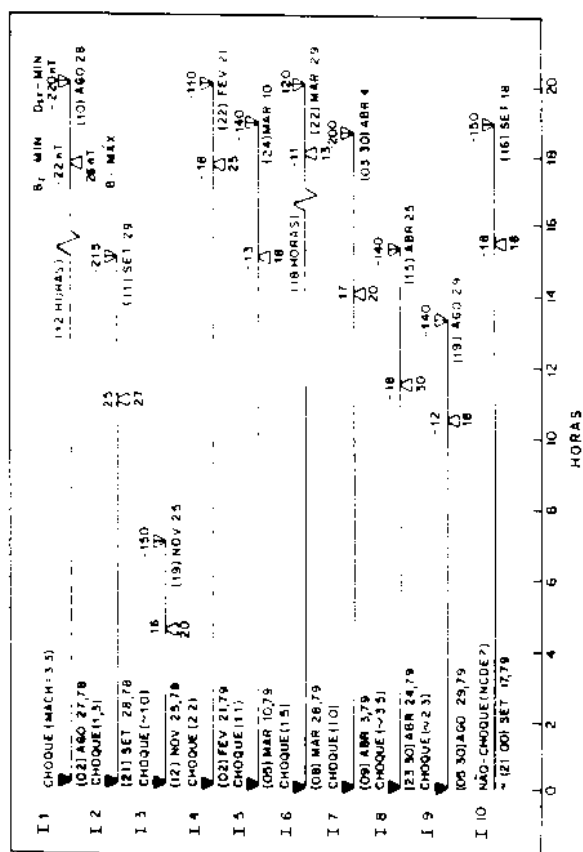


Fig. 4.1 - As tempestades geomagnéticas intensas ($Dst_{MIN} < -110$ nT) e os fenômenos interplanetários associados no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979.

FORTE: Gonzalez e Tsurutani (1987), p. 1103.

- Indica-se a origem interplanetária, o Dst_{MIN} , a intensidade máxima do campo magnético interplanetário Bz_{MAX} e a sua componente sul-norte mínima Bz_{MIN} e o tempo dessas ocorrências.

TABELA 4.1 - TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS E SELEÇÃO
DE EVENTOS DE TEMPESTADE

M. #	DATA					Dst-min		
	Ano/Mês/Dia	TU(h:min)	Dia	TU(h:min)	(nT)	Dia	TU(h:min)	
	(início)		(fim)			(mínimo)		
M.1 *	1978 09 06	05:00	07	20:30	-56,0	06	10:00	
M.2 *	07	23:20	08	22:00	-79,0	08	05:00	
M.3 *	09	05:20	10	21:00	-55,0	09	17:00	
M.4 *	25	02:00	26	03:00	-55,0	25	13:00	
M.5	26	03:00	26	14:00	-54,0	26	10:30	
M.6	26	14:00	27	16:00	-62,0	26	22:00	
M.7	27	16:00	28	22:00	-67,0	28	10:00	
M.8 *	10 04	04:00	06	02:00	-51,0	04	12:00	
M.9 *	18	01:00	18	14:00	-61,0	18	07:00	
M.10	18	14:00	20	06:00	-69,0	19	08:00	
M.11 *	26	21:00	29	06:00	-103,0	27	09:00	
M.12	29	06:00	30	04:00	-52,0	29	18:00	
M.13	30	04:00	31	19:00	-88,0	30	21:30	
M.14	31	19:00	01	18:00	-71,0	01	09:00	
M.15	11 01	18:00	03	18:00	-52,0	02	13:00	
M.16 *	07	22:30	08	18:00	-47,0	08	02:00	
M.17 *	10	16:30	11	20:30	-62,0	10	22:00	
M.18 *	12	06:00	13	14:00	-93,0	12	13:00	
M.19	13	14:00	14	11:00	-66,0	13	19:00	
M.20	14	11:00	16	04:00	-56,0	14	21:00	
M.21 *	24	13:00	25	13:00	-81,0	25	11:00	
M.22 *	12 14	06:30	15	00:30	-58,0	14	08:00	
M.23 *	15	02:30	16	02:00	-68,0	15	08:30	
M.24 *	18	05:30	21	24:00	-78,0	18	17:00	
M.25 *	25	13:30	26	24:00	-57,0	25	17:00	
M.26 *	28	16:00	29	09:00	-53,0	28	19:00	

(Continua)

Tabela 4.1 - Continuação

M.27		30	19:00	31	21:00	-57,0	31	02:00	
M.28	*1979	01	02	10:00	03	20:00	-51,0	02	24:00
M.29		03	20:00	07	08:00	-96,0	04	24:00	
M.30	*	07	13:30	09	06:00	-100,0	07	21:00	
M.31		23	12:00	25	02:00	-88,0	24	01:00	
M.32	*	25	02:00	26	17:00	-66,0	25	12:00	
M.33		26	17:00	29	16:00	-56,0	26	22:30	
M.34	*	02	04	13:00	06	01:00	-55,0	04	24:00
M.35	*	11	17:30	12	21:00	-66,0	12	07:00	
M.36	*	21	05:00	21	17:00	-95,0	21	09:00	
M.37	*	21	17:00	22	13:00	-107,0	21	22:00	
M.38		22	13:00	23	00:00	-63,0	22	17:00	
M.39		23	02:00	23	16:00	-50,0	23	04:00	
M.40		23	20:00	24	14:30	-59,0	23	23:00	
M.41		24	14:30	25	20:00	-49,0	25	06:00	
M.42		25	20:00	28	11:00	-78,0	26	24:00	
M.43		28	11:00	01	11:00	-64,0	28	21:00	
M.44		03	03	08:00	04	08:00	-50,0	03	23:00
M.45		04	08:00	04	22:00	-77,0	04	12:00	
M.46		05	01:00	05	24:00	-56,0	05	05:00	
M.47		06	00:00	09	09:00	-79,0	06	13:00	
M.48	*	22	11:30	24	01:00	-81,0	22	17:00	
M.49		24	01:00	25	01:00	-49,0	24	10:00	
M.50		25	01:00	27	12:00	-61,0	26	20:00	
M.51		04	02	01:00	03	16:00	-89,0	02	03:00
M.52	*	05	15:30	08	08:00	-50,0	06	07:00	
M.53	*	15	21:00	16	23:30	-55,0	16	05:00	
M.54	*	21	14:30	22	11:00	-99,0	22	04:00	
M.55		27	16:00	29	04:00	-88,0	28	03:00	
M.56		29	04:00	01	14:30	-75,0	29	24:00	
M.57		05	01	14:30	03	08:00	-52,0	02	04:00

(Continua)

Tabela 4.1 - Conclusão

M.58 *	21	14:00	23	10:00	-74,0	22	11:00
M.59	23	10:00	25	03:00	-49,0	24	02:00
M.60	25	03:00	27	03:00	-51,0	25	20,00
M.61 *	06	22 11:00	25	17:30	-47,0	22	22:00
M.62 *	07	26 21:00	27	19:30	-89,0	27	03:00
M.63 *	08	13 12:30	16	20:30	-71,0	13	22:00
M.64 *	18	23:30	20	06:30	-56,0	19	03:00
M.65 *	20	18:00	21	23:00	-60,0	21	03:00
M.66 *	09	18 00:30	18	06:00	-65,0	18	03:00
M.67	20	12:00	21	03:00	-57,0	20	17:00
M.68	21	03:00	22	12:00	-51,0	21	09:00
M.69 *	09	24 03:00	25	14:00	-52,0	25	05:00
M.70	25	14:00	26	10:00	-51,0	25	18:00
M.71 *	10	06 12:00	07	13:00	-59,0	07	07:00
M.72	07	20:00	08	20:00	-79,0	08	11:00
M.73	08	20:00	09	21:00	-76,0	09	06:00
M.74	09	21:00	11	08:00	-49,0	09	23:00
M.75 *	21	16:00	23	21:00	-47,0	22	07:00
M.76 *	11	07 16:30	08	20:30	-47,0	08	11:00
M.77 *	13	01:00	15	23:00	-92,0	13	17:00
M.78 *	23	20:30	26	08:30	-61,0	25	04:00

OBS.: Os asteriscos indicam os eventos de tempestade (tempestades com Dst inicial ≥ -12 nT). TU é tempo universal.

TABELA 4.2 - CHOQUES INTERPLANETÁRIOS NO PERÍODO DE
AGOSTO DE 1978 A DEZEMBRO DE 1979

S. #	DATA		Nº de MACH	COMENTÁRIOS
	Ano/Mês/Dia	TU(h:min)		
S.1	1978 08 18	12:26	1,6	claro
S.2		27 02:11	3,3	claro
S.3	09 05	18:17	1,9	claro
S.4		25 07:05	...	claro, faltam dados
S.5		28 20:40	1,3	pequeno
S.6	10 04	00:04	...	claro
S.7		09 02:37	1,7	pequeno
S.8		17 03:54	0,23	pequeno
S.9		26 08:27	...	reverso, pequeno
S.10		29 10:32	0,78	pequeno
S.11	11 08	01:12	2,3	claro
S.12		12 00:28	4,7	claro
S.13		16 18:46	...	pequeno
S.14		18 22:51	...	pequeno
S.15		25 11:44	...	pequeno
S.16		26 01:40	...	reverso, pequeno
S.17	12 14	00:00-00:59	...	claro, faltam dados
S.18		25 11:18	...	pequeno
S.19	1979 01 06	00:32	...	pequeno
S.20		09 02:56	...	claro
S.21		25 00:40	3,2	pequeno
S.22	02 03	17:37	1,3	claro
S.23		11 00:53	...	claro, faltam dados
S.24		18 02:19	1,5	claro
S.25		21 02:19	2,2	claro
S.26	03 06	07:30-07:41	1,04	pequeno, faltam dados
S.27		09 07:21	2,2	claro

(Continua)

Tabela 4.2 - Continuação

S.28	10	04:53	1,1	questionável
S.29	15	04:54	...	pequeno
S.30	21	12:51	1,4	muito pequeno
S.31	22	07:48	2,4	claro
S.32	28	07:54	1,5	claro, faltam dados
S.33	04 01	21:14	...	claro
S.34	03	09:25	1,02	pequeno
S.35	05	01:21	2,9	claro
S.36	05	11:38	...	pequeno
S.37	24	23:30	...	claro
S.38	25	12:50	...	reverso, claro
S.39	29	18:18	2,2	claro
S.40	06 06	18:43	...	claro
S.41	13	10:51	...	reverso?, pequeno
S.42	07 05	06:08	...	claro
S.43	06	18:53	3,0	claro
S.44	26	17:25	1,5	claro
S.45	28	19:37	...	pequeno
S.46	08 11	17:30	2,0	pequeno
S.47	20	05:52	1,7	claro
S.48	20	19:53	...	questionável
S.49	23	07:39	1,9	questionável
S.50	29	04:10-05:43	...	claro, faltam dados
S.51	31	05:10	1,3	pequeno
S.52	10 06	10:38	2,1	claro
S.53	11 07	12:55	1,6	claro
S.54	11	01:47	1,8	claro
S.55	18	01:39	...	claro
S.56	20	04:00	...	faltam dados
S.57	29	15:42	...	claro
S.58	30	06:49	...	claro

(Continua)

Tabela 4.2 - Conclusão

S.59	12 01	20:22	...	reverso, pequeno
POSSÍVEIS MAS NÃO CONFIRMADOS:				
	1978 08 28	18:30?	...	faltam dados
	09 08	19:15?	...	faltam dados
	1979 03 04	02:30?	...	faltam dados
	06 07	05:04	...	reverso?, incerto

Baseada em Zwickl (1982).

OBS.: Os choques interplanetários foram identificados a partir das observações do satélite ISEE-3. Os comentários referem-se à habilidade de se observar as características do choque através dos dados de plasma. Claro significa uma assinatura clara, pequeno refere-se a uma mudança pequena mas perceptível nos parâmetros de plasma e questionável quando a assinatura é ambígua. TU é tempo universal.

4.2 - IDENTIFICAÇÃO DAS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS DAS TEMPESTADES MODERADAS

A partir das identificações dos eventos de tempestade (Tabela 4.1), da relação dos choques interplanetários (Tabela 4.2) e considerando os fenômenos interplanetários descritos na Seção 2.3.2, montou-se a Tabela 4.3, que relaciona as ocorrências interplanetárias próximas ao período dos eventos de tempestade geomagnética moderada. Essa tabela dá a defasagem temporal do fenômeno interplanetário identificado na posição do satélite ISEE-3 com respeito ao tempo de início da tempestade geomagnética medida na superfície da Terra em latitudes médias ($t_{\text{ISEE-3}} - t_i$). Os fenômenos indicados são o choque interplanetário, a troca de setores (TS) ou incursão de setor (IS), o feixe de plasma solar, a densidade máxima do plasma solar ($NH_{\text{MÁX}}$), a intensidade máxima do CMI ($BM_{\text{MÁX}}$) e a existência de ondas do tipo alfvênicas. O evento de tempestade, indicado por M.# (onde # significa número), é apresentado com a data de ocorrência, seu início (t_i), a duração de sua fase principal ($\Delta t = t_{\text{MÍN}} - t_i$) e o $Dst_{\text{MÍN}}$.

A Tabela 4.4, estabelecida a partir da análise da Tabela 4.3 e das Figuras do Apêndice D, apresenta para cada um dos eventos de tempestade a discussão dos parâmetros interplanetários, levanta algumas questões e aponta o fenômeno interplanetário que causou a tempestade geomagnética. Dessa maneira, verificou-se que, dos 40 eventos de tempestade, 16 estão associados a choques interplanetários e 24 a fenômenos não-choques.

TABELA 4.3 - OCORRÊNCIAS INTERPLANETÁRIAS PRÓXIMAS AOS EVENTOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS

M. #	OCORRÊNCIAS:		TEMPESTADES MODERADAS:							
	CHOQUE	TS/IS	FEIXE	NH _{MAX}	BN _{MAX}	ALFVEN	ANO/MÊS/DIA	T _I	ΔT	DST _{MIN}
	T _{ISEE-3} - T _I (h)							(h:min)	T _{MIN} -T _I (h)	(nT)
M.1	-11	-	-	-	-	-	1978 set. 06-07	05:00	05:00	-56,0
M.2	-	-	-6	-3	0	-	07-08	23:10	05:40	-79,0
M.3	-	(12) 0	-5	-2	-8	-	09-10	05:20	11:40	-55,0
M.4	5	(12) -4	-4	-9	5	A	25-26	02:00	11:00	-55,0
M.8	-4	-	-	-	-	-	out. 04-06	04:00	08:00	-51,0
M.9	-21	0	-3	-3	1	A	18	01:00	06:00	-61,0
M.11	-13	(04) -6	-5	-8	6	-	26-29	21:00	12:00	-103,0
M.16	3	(03) 0	-3	-8	-2	-	nov. 07-08	22:30	03:30	-47,0
M.17	-	-	-	-5	1	-	10-11	16:30	05:30	-62,0
M.18	-6	-	-	-	-	-	12-13	06:00	07:00	-93,0
M.21	-	-	-	-4	15	-	24-25	13:00	22:00	-81,0
M.22	-5	19	-	-	-	-	dez. 14-15	06:30	01:30	-58,0
M.23	-25	0	-3	-2	-5	-	15-16	02:30	06:00	-68,0
M.24	-	-	-3	-8	-5	A	18-21	05:30	11:30	-78,0
M.25	-3	-	-	-	-	-	25-26	13:30	03:30	-57,0

(Continua)

Tabela 4.3 - Continuação

M.26	-	-12	-2	-1	1	-	28-29	16:00	03:00	-53,0
M.28	...	...	...	...	...	...	1979			
M.30	-37	(10)	-4	5	4	-	jan. 02-03	10:00	14:00	-51,0
M.32	-2	0	-2	-1	-2	A	07-09	13:30	07:30	-100,0
M.34	-19	(06)	-3	1	0	A	25-26	02:00	10:00	-66,0
M.35	-14	-11	-	-	-	-	fev. 04-06	13:00	11:00	-55,0
M.36	-2	-	-	-	-	-	11-12	17:30	13:30	-66,0
M.37	-15	-	-	-	-	-	21	05:00	04:00	-95,0
M.48	-4	24	-	-	-	-	21-22	17:00	05:00	-107,0
M.52	-14	22	-	-	-	-	mar. 22-24	11:30	05:30	-81,0
M.53	-	-	-	-	-	-	abr. 05-08	15:30	15:30	-50,0
M.54	-	-4	-2	-4	6	A	15-16	21:00	08:00	-55,0
M.58	-	-	13	-3	9	A	21-22	14:30	13:30	-99,0
M.61	-	(07)	-2	2	8	-	maio 21-23	14:00	21:00	-74,0
M.62	-4	15	-	-	-	-	jun. 22-24	11:00	11:00	-47,0
M.63	-	-	-7	-12	-2	-	jul. 26-27	21:00	06:00	-89,0
M.64	-	(08)	-5	0	1	-	ago. 13-16	12:30	09:30	-71,0
M.65	-12	-	-	-	-	-	18-20	23:30	03:30	-56,0
M.66	-	(04)	-	-2	-1	-	20-21	18:00	09:00	-60,0
							set. 18	00:30	02:30	-65,0

(Continua)

Tabela 4.3 - Conclusão

M.69	-	-	-	-	-	A	24-25	03:00	26:00	-52,0
M.71	-2	(07)	0	-	-	-	out. 06-07	12:00	19:00	-59,0
M.75	-	-	-	-	-	A	21-23	16:00	15:00	-47,0
M.76	-4	(12)-15	-	0	-	A	nov. 07-08	16:30	18:30	-47,0
M.77	-	-	1	-1	-4	-	13-15	01:00	16:00	-92,0
M.78	-	(30)	24	-5	1	2	23-26	20:30	31:30	-61,0

OBS.: Na tabela estão indicados os tempos das ocorrências interplanetárias, medidas na posição do satélite ISEE-3, relativo ao início da tempestade, medida na superfície da Terra. Todos os tempos são dados em tempo universal. Ti é o início da tempestade, Tmín é quando foi atingido o Dst mínimo e TISEE-3 é quando a ocorrência foi detectada. NHMAX é a densidade máxima do plasma solar, Bmáx é a intensidade máxima do Campo Magnético Interplanetário. Quanto à Troca ou Incurção de Setor (TS/IS), o número entre parênteses indica que era uma incurção e a sua duração. A letra A indica a presença de flutuações do tipo ondas de Alfvén.

TABELA 4.4 - ANÁLISE DOS EVENTOS DE TEMPESTADE

M. #	Ano/Mês/Dia	DISCUSSÃO (D)/COMENTÁRIOS (C):
M.1	1978 09 06	D: Descontinuidade na estrutura do <u>choque</u> lidera a formação do Bz sul, parece manifestação de uma nuvem de plasma magnetizado. Grande mudança de Bz, By, NH e NHE, mas não é choque reverso. C: $N > 40 \text{ cm}^{-3}$ na bainha magnética? Como? Aumento da temperatura, campo magnético não liso implica que não é um fluxo de gás (driver gas) clássico.
M.2	1978 09 07	D: Evento pequeno de <u>feixe</u> de maior velocidade (B, NH, V). Aumento não causou um choque. Deflexão do campo na bainha (descontinuidade).
M.3	1978 09 09	D: Similar ao comentário anterior. Nota-se em 8/set. aumento em B, NH e T de um <u>feixe</u> pequeno. Deflexão de Bz norte-sul associado a isso. C: O que são essas deflexões? Uma ondulação do campo devido interação de feixes/distorções?
M.4	1978 09 25	D: Bz sul iniciou com uma interação de feixes, foi intensificado em uma estrutura de <u>choque</u>. A tempestade pode não ser simples. C: Observa-se V baixo (350) e NH alto (30) antes do choque. Houve incursões de setor próximas. Houve ainda flutuações do tipo ondas alfvênicas.

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

M.8	1978 10 04	D: Bz sul devido ao <u>choque</u> . C: By da bainha magnética parece relacionada a uma estrutura de nuvem de plasma magnetizado.
M.9	1978 10 18	D: Bz sul devido ao <u>choque</u> . C: Antes do choque $Bz \approx 0$. O Dst mínimo está aparentemente defasado com Bz mínimo.
M.11	1978 10 26	D: <u>Interação de feixes</u> com alteração em V e NH na descontinuidade. C: Está próximo a uma incursão de setor. NH grande (60), V baixo (325) antes. Aumentos em V e Bz ocorrem na descontinuidade. Decréscimo em NHE (de 4) e NH (de 50).
M.16	1978 11 07	D: <u>Interação de feixes</u> com uma descontinuidade. Houve um aumento em B, V e NH. A 2ª descontinuidade que encerra o Bz sul é um choque. C: Próximo à lâmina de corrente. Nota-se $NH=40$, $V \approx 350$ anterior ao evento.
M.17	1978 11 10	D: Estranho ativamento do aumento do B em uma porção posterior de um feixe mais rápido. Não usual. NH está associado. <u>NCDE</u> .
M.18	1978 11 12	D: Flutuações norte e sul do Bz na bainha posterior ao <u>choque</u> . C: NH atinge até 40 part/cm^{-3} .
M.21	1978 11 24	D: Bz está na parte posterior de um feixe rápido. Bz sul de maior duração. <u>NCDE</u> .

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

M.22	1978 12 14	D: Flutuação do Bz na bainha posterior ao <u>choque</u> . C: N=60 e V=300. Observa-se a lâmina de corrente próxima antes (incursão de setor) e depois (troca de setor).
M.23	1978 12 15	D: Na parte posterior de um <u>feixe</u> mais rápido. Não comum. Não é um fluxo clássico de plasma solar pois o evento ocorre em região de fraco campo após campo intenso. C: Não usual. Pode ser uma nuvem de plasma magnetizado.
M.24	1978 12 18	D: <u>Interação de feixes</u> . Há uma intensificação do campo possivelmente devido a uma compressão do plasma. A variação norte e sul do Bz é devido a distorção na região. C: Há a presença de ondas do tipo ondas de Alfven.
M.25	1978 12 25	D: Intensificação do Bz sul na estrutura de um <u>choque</u> .
M.26	1978 12 28	D: Pequeno <u>feixe</u> com intensificação do Bz sul.
M.28	1978 01 02	D: Faltam dados.
M.30	1979 01 07	D: Evento dinâmico complexo. Bz ocorre muito antes do choque ($\approx 30h$ mais tarde). V aumenta durante todo o tempo. Comportamento do Bz poder ser devido ao <u>feixe</u> anterior. C: Não seria um múltiplo evento? Bz parece indicar uma nuvem de plasma magnetizado.

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

M.32	1979 01 25	D: <u>Interação de feixes</u> . O aumento de densidade ($NH \approx 30$) ocorre um pouco antes da velocidade. A variação de Bz parece estar associada a isso. C: Não parece ser um choque.
M.34	1979 02 04	D: Um Bz sul logo após o início de um <u>feixe</u> . Não parece ser nem a bainha ou fluxo de gás posterior ao choque. Nota-se um aumento pequeno do V. C: Aumento significativo de N através do choque. NH varia de 1-2 a 45.
M.35	1979 02 11	D: Bz devido a um <u>choque</u> . Caso clássico. C: Interessante o padrão sul-norte na bainha. Há um grande NH (30) apesar do choque fraco.
M.36	1979 02 21	D: Bz devido a um <u>choque</u> . Caso clássico. C: Interessante o padrão norte-sul da componente Bz.
M.37	1979 02 21	D: Bz sul na região do fluxo de plasma posterior ao <u>choque</u> . No entanto T é baixo, mas NH (20-40) é alto.
M.48	1979 03 22	D: Bz intensificado na turbulência da bainha posterior ao <u>choque</u> . C: Observa-se B_y com assinatura negativa-positiva como em uma nuvem de plasma magnetizado. Estranho.
M.52	1979 04 05	D: Bz norte-sul claro originado do <u>choque</u> . C: Observa-se a lâmina de corrente próxima. Corrente de fluxo acima $NH=20$ e $V=325$. NH salta até 60.

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

M.53	1979 04 15	D: <u>Ondas do tipo alfvênicas</u> C: Observa-se sobre a região de crescimento gradativo do feixe suave.
M.54	1979 04 21	D: Isto é muito similar ao de 18/dez/1978. <u>Interação de feixes</u> . Há uma intensificação do campo possivelmente devido à compressão do plasma. A variação no Bz está associada à turbulência. C: Observa-se a troca de setor. Há uma flutuação do tipo onda de Alfvén.
M.58	1979 05 21	D: Pequeno aumento de NH (até 15) em 21-22/maio. B aumenta levemente defasado. A maior parte do Bz está associado com a densidade (NCDE). Mais tarde o campo é afetado pela interação de feixes. C: Há flutuações do tipo onda de Alfvén.
M.61	1979 06 22	D: Observa-se a mesma assinatura de 21/maio/79. <u>Interação de feixes</u> . A descontinuidade em Bz está associada com a descontinuidade em NH.
M.62	1979 07 26	D: Bz sul claramente localizado na estrutura do <u>choque</u> . C: Observa-se a proximidade da lâmina de corrente. No feixe corrente acima: NH=20 e V=325. NH atinge até 60.
M.63	1979 08 13	D: <u>Interação de feixes</u> . C: Nota-se a proximidade da lâmina de corrente (através de incursões de setor rápidas, <6h).

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

M.64	1979 08 18	D: No dia 18/ago. há uma redução da velocidade e aumento da densidade. Após há um aumento da velocidade e de densidade. Isso parece indicar um <u>feixe</u> . Bz sul foi intensificado no feixe. Na metade do dia 19/ago. parece acontecer uma interação de feixes. Alta densidade (NH atinge até 84) e aumento de velocidade.
M.65	1979 08 20	D: Bz sul na parte turbulenta da bainha posterior ao <u>choque</u> .
M.66	1979 09 18	D: <u>NCDE</u> . Bz associado a NH. Ondulação? C: Está na porção da cauda de um feixe pequeno. Próximo à lâmina de corrente.
M.69	1979 09 24	D: Bz está associado a <u>ondas do tipo alfvênicas</u> . Não parece ser uma tempestade simples.
M.71	1979 10 06	D: Bz sul intensificado na estrutura de <u>choque</u> . C: Próximo à lâmina de corrente (NH $\approx$ 20, V<400). NH aumenta até 60-80.
M.75	1979 10 21	D: O Bz sul associado à tempestade está distante do NCDE, restam as flutuações do tipo <u>onda de Alfven</u> . C: Não se está próximo da lâmina de corrente.
M.76	1979 11 07	D: Talvez uma estrutura de <u>choque</u> esteja associado ao evento. Apesar do salto do B, não ocorre no T. O aumento de V é muito pequeno. C: Próximo à lâmina de corrente (NH=10-20, V $\approx$ 325).

(Continua)

Tabela 4.4 - Conclusão

M.77	1979 11 13	D: <u>Feixe</u> complexo. Descontinuidade iniciou Bz sul.
		C: Próximo à lâmina de corrente, mas breve.
M.78	1979 11 23	D: O Bz sul que surgiu e foi intensificado aparentemente associa-se a um <u>feixe</u> muito suave.
		C: A lâmina de corrente não está tão próxima (foi posterior ao Bz sul de 24h).

As Figuras de 4.2a a 4.2d apresentam esquematicamente as informações básicas dos eventos de tempestade ($Dst_{MÍN}$, a componente sul mínima do CMI e a duração da fase principal) e das causas interplanetárias: choque (com número de Mach) (4.2a); da interação de feixes (com velocidade e a densidade máximas) (4.2b); de feixe simples (com o início do aumento na velocidade e a densidade máxima) (4.2c); e NCDE (com valor de densidade máxima) (4.2d). Os eventos associados a ondas do tipo Alfvénicas não foram esquematizados, por não acrescentarem nenhuma informação. Indica-se ainda a troca ou incursão de setor coincidentes com o período.

No período estudado, através da análise da polaridade do CMI (Apêndice D), verificou-se que a orientação primordial ou para sul ou para norte da componente Bz do CMI está relacionada com o setor de polaridade. Constatou-se que as tempestades geomagnéticas ocorreram quando o Bz tinha sentido sul. Constatou-se ainda que a ocorrência de fenômenos interplanetários (choques, feixes simples, interação de feixes, NCDE e flutuações do tipo ondas de Alfvén) intensificaram o Bz existente ou mesmo modificaram o seu sentido. Assim, de um total de 33 trocas de setores, 17 ocorreram associadas a tempestades (o Bz apresentado era sul). Verificou-se que nas trocas ou incursões de setores associadas a tempestades sempre estavam presentes um dos fenômenos interplanetários já mencionados. Nas trocas havia uma criação ou intensificação do Bz-sul e nas incursões uma criação do Bz-sul com certa intensidade e duração.

Com base na discussão contida na Tabela 4.4, as evidências permitem afirmar que os fenômenos interplanetários isolados (no início deste trabalho propostos como choques interplanetários e fenômenos não-choques) são aspectos de categorias mais abrangentes: ou fenômenos de ejeção de massa coronal (EMC) ou fenômenos não-EMC. No EMC podem ocorrer feixes rápidos (produzindo choques) ou feixes lentos, caracterizando feixes simples, interação de feixes, aumento não compressivo de densidade (NCDE) do plasma solar e incursão de setor. Sob o NÃO-EMC, estariam troca de setores, ondas do tipo

alfvênica e outros. Na Tabela 4.5 são apresentados os fenômenos interplanetários associados às tempestades geomagnéticas moderadas e relacionados como causadores do campo magnético com orientação norte-sul que dá origem às tempestades. Na tabela constam os choques interplanetários, os feixes solares, a interação de feixes, o aumento não compressivo da densidade do meio interplanetário, as flutuações do tipo ondas de Alfvén, a proximidade da lâmina de corrente através das trocas ou incursões de setores, e fenômenos não identificados. A Figura 4.3 sintetiza quantitativamente as causas interplanetárias das tempestades geomagnéticas. Dos 40 eventos de tempestade moderada, 90% são causados por fenômenos EMC. Dessa categoria, 45% são choques interplanetários. Nos fenômenos EMC restantes (como feixes lentos), 25% são feixes simples, 20% são interação de feixes e 10% são NCDE. Dos 4 eventos causados por fenômenos não-EMC, 3 estão associados a ondas do tipo alfvênicas e 1 a um fenômeno não identificado (por lacuna nos dados). Dos fenômenos EMC, 47% ocorrem próximos da lâmina de corrente heliosférica. Dos 16 choques, 7 estão próximos da lâmina. Dos 9 feixes simples, 5 estão próximos da lâmina; das 7 interações de feixes, 5 estão próximas; e nenhum dos 4 NCDE estão próximos da lâmina de corrente.

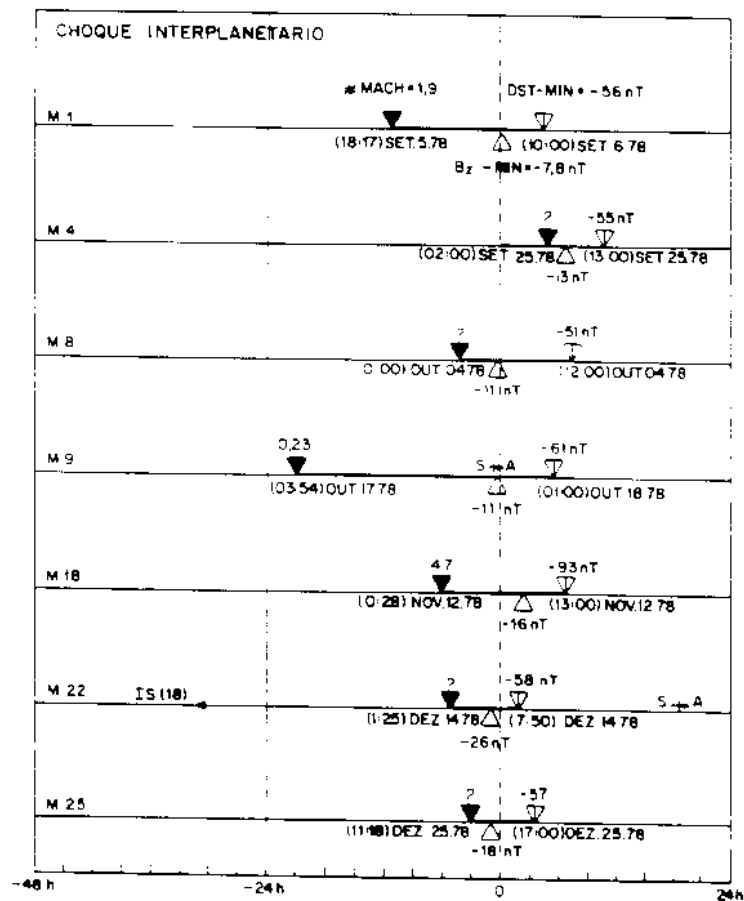


Fig. 4.2a - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas ao choque interplanetário.

- Indicam-se o choque (número de Mach e data), o Bz mínimo associado, e a tempestade (o início da fase principal pelo tracejado e o Dst mínimo com data embaixo). A troca de setor é indicada por uma seta horizontal (S=CMI dirigido para o Sol/A=CMI afastando-se do Sol) e a Incursão de Setor (IS) contida entre setinhas (com a sua duração entre parênteses).

(Continua)

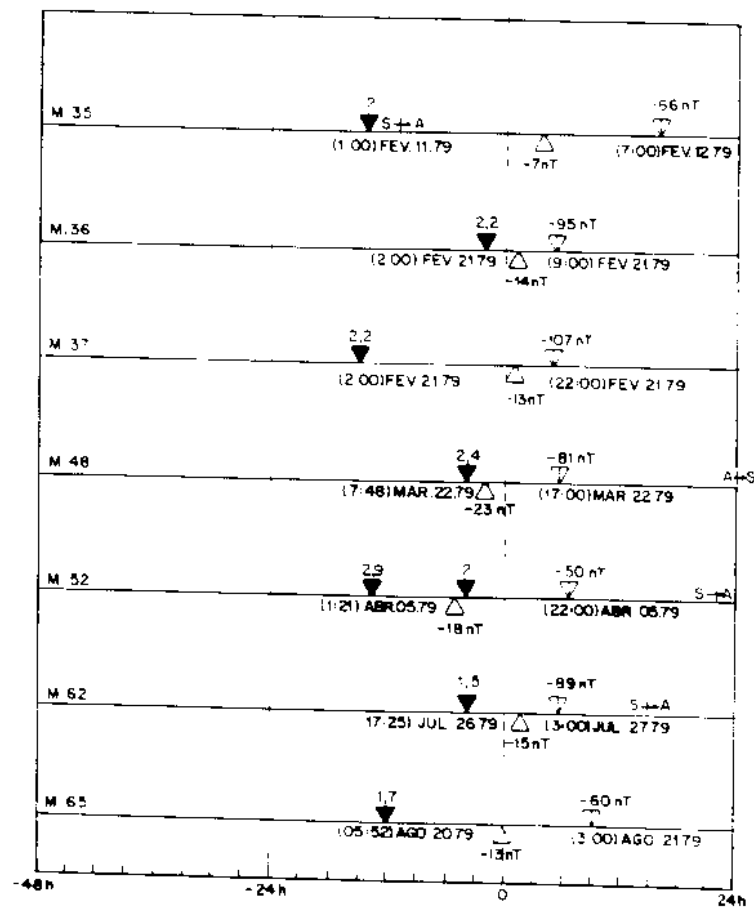


Fig. 4.2a - Continuação

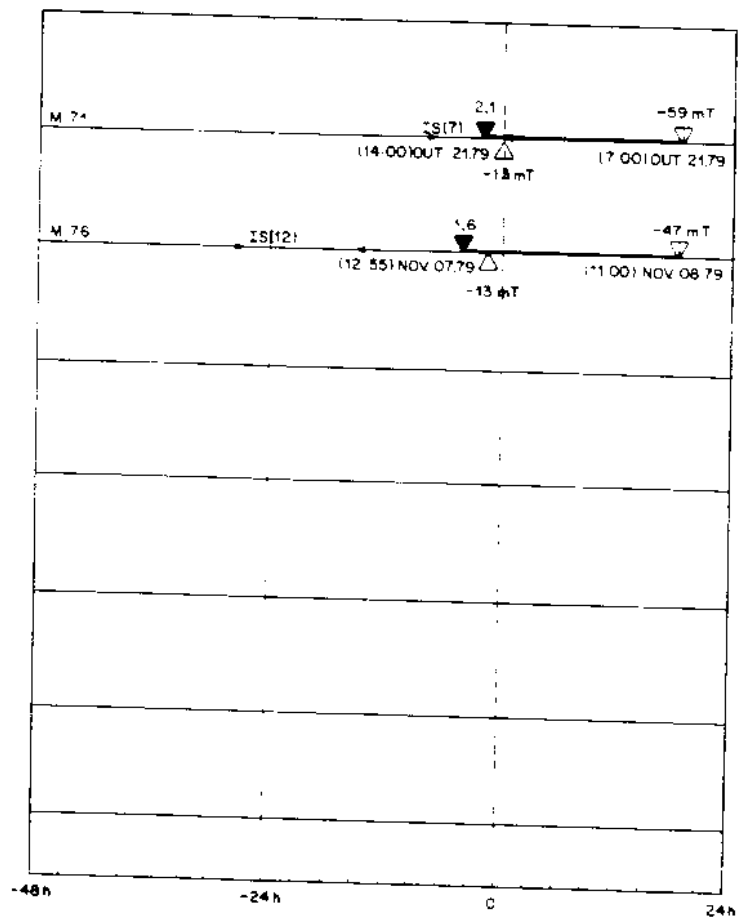


Fig. 4.2a - Conclusão

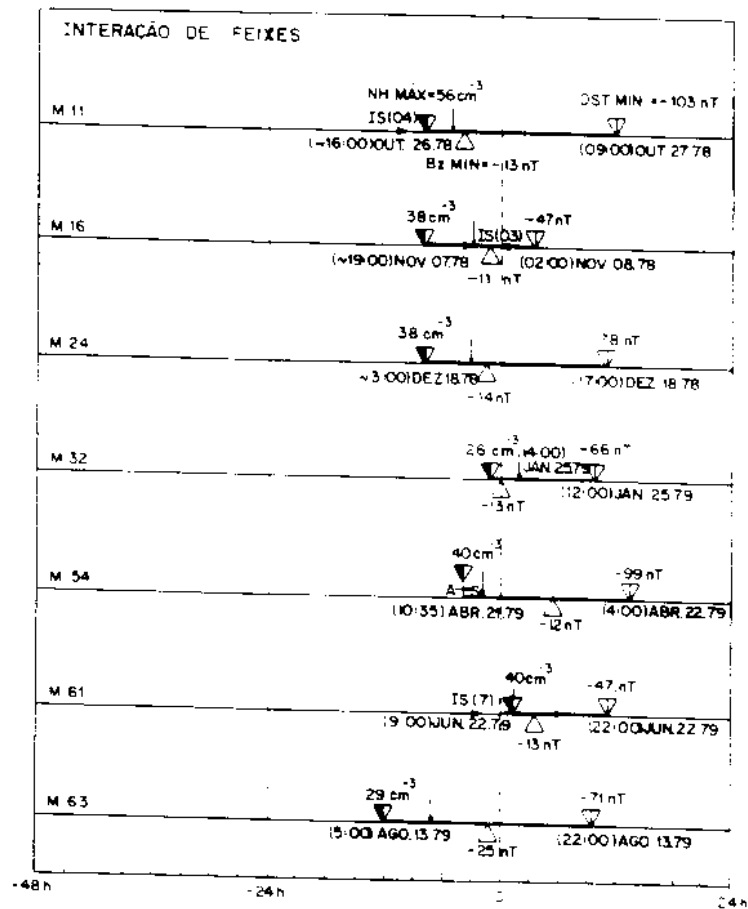


Fig. 4.2b - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas a interação de feixes.

- Indicam-se o aumento de velocidade do feixe (flecha vertical com data embaixo), a densidade máxima NH associada, o Bz mínimo associado, e a tempestade (o início da fase principal pelo tracejado e o Dst mínimo com data embaixo). A troca de setor é indicada por uma seta horizontal (S=CMI dirigido para o Sol/A=CMI afastando-se do Sol) e a Incursão de Setor (IS) contida entre setinhas (com a sua duração entre parênteses).

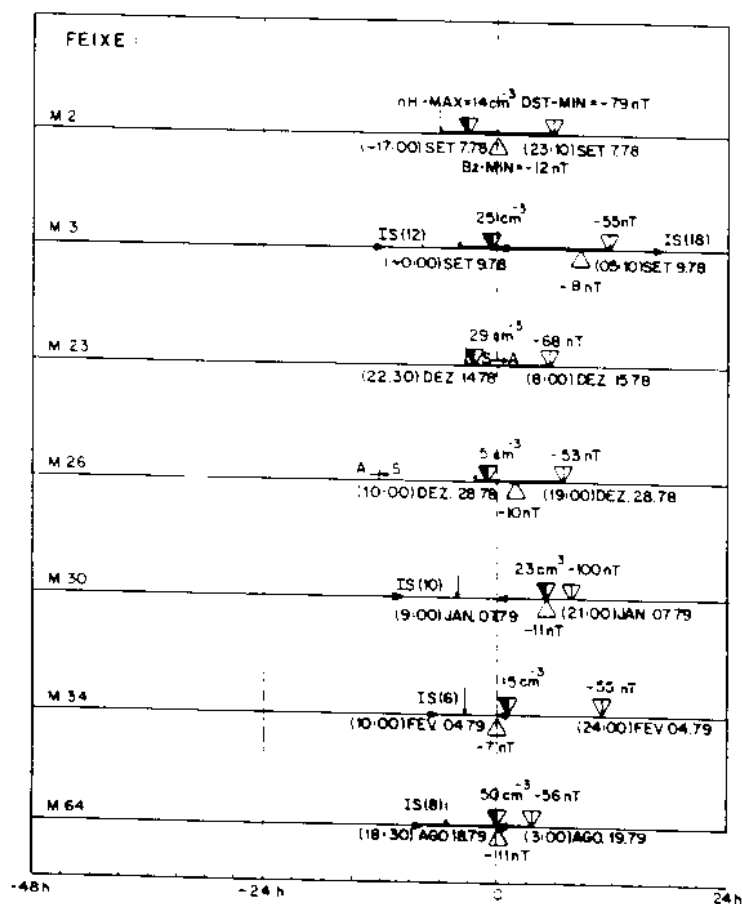


Fig. 4.2c - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas a feixes simples.

- Indicam-se o aumento da velocidade do feixe (flecha vertical com data embaixo), a densidade máxima NH associada, o Bz mínimo associado, e a tempestade (o início da fase principal pelo tracejado e o Dst mínimo com data embaixo). A troca de setor é indicada por uma seta horizontal (S=CMI dirigido para o Sol/A=CMI afastando-se do Sol) e a Incursão de Setor (IS) contida entre setinhas (com a duração entre parênteses).

(Continua)

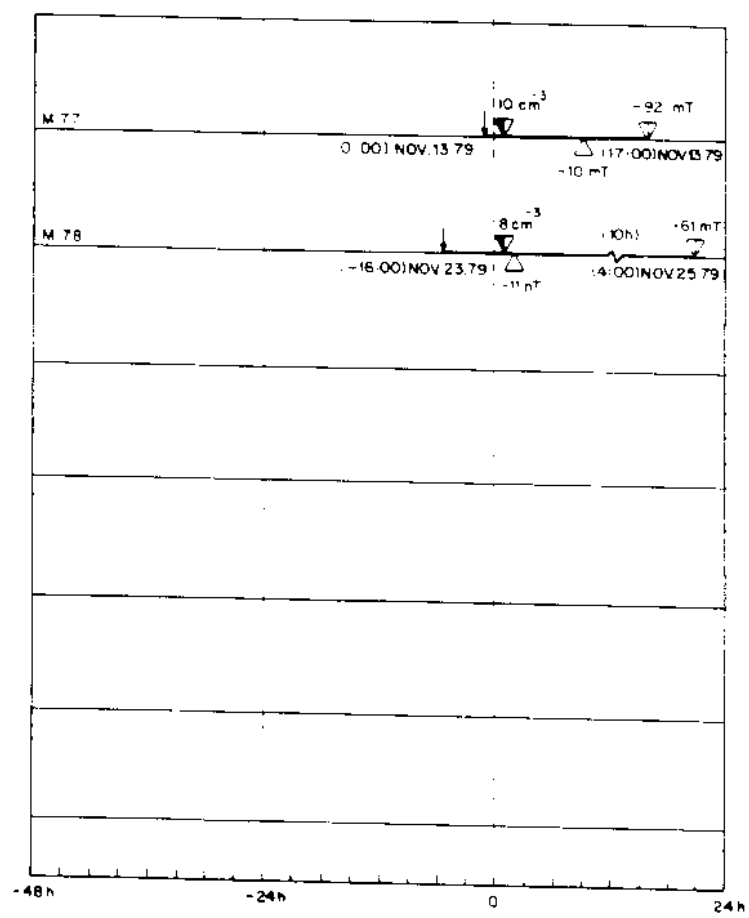


Fig. 4.2c - Conclusão

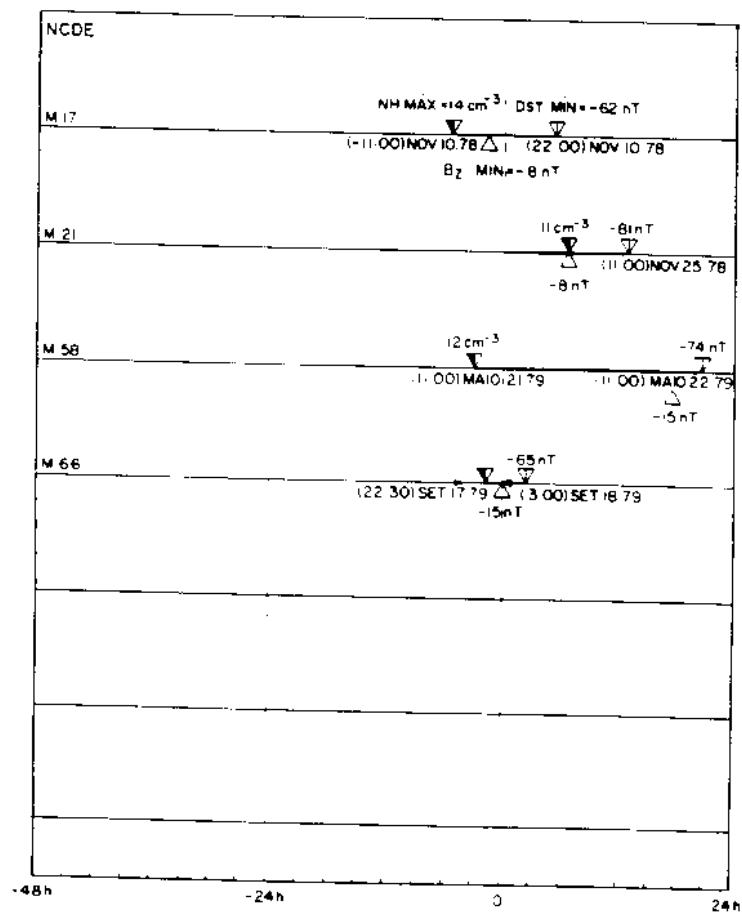


Fig. 4.2d - Esquema temporal das tempestades geomagnéticas moderadas associadas ao NCDE (Elevação não compressiva de densidade).

- Indicam-se a densidade Máxima NH associada (com data embaixo), o Bz mínimo associado, e a tempestade (o início da fase principal pelo tracejado e o Dst mínimo com data embaixo). A troca de setor é indicada por uma seta horizontal (S=CMI dirigido para o Sol/A=CMI afastando-se do Sol) e a Incursão de Setor (IS) contida entre setinhas (com a sua duração entre parênteses).

TABELA 4.5 - CAUSAS INTERPLANETÁRIAS DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS

M. #	EJEÇÃO DE MASSA CORONAL					NÃO-EJEÇÃO DE MASSA CORONAL			
	FEIJE RÁPIDO	FEIJE LENTO			NCDE	INTERAÇÃO	I. SETOR	T. SETOR	N-IDENTIFICADO
	CHOQUE	SIMPLES							
M.1	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.2	-	X!	-	-	-	-	-	-	-
M.3	-	X!	-	(12) 0	-	-	-	-	-
M.4	X!	-	-	-	-	-	-	A	-
M.8	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.9	X!	-	-	-	-	-	0	A	-
M.11	-	-	X!	(04) -6	-	-	-	-	-
M.16	-	-	X!	(03) 0	-	-	-	-	-
M.17	-	-	-	-	X!	-	-	-	-
M.18	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.21	-	-	-	-	X!	-	-	-	-
M.22	X!	-	-	-	-	-	19	-	-
M.23	-	X!	-	-	-	-	0	-	-
M.24	-	-	X!	-	-	-	-	A	-
M.25	X!	-	-	-	-	-	-	-	-

(Continua)

Tabela 4.5 - Continuação

M.26	-	X!	-	-	-	-	-	-	-
M.28	...	...	...	...	...	...	...	X!	-
M.30	-	X!	-	-	-	-	-	-	-
M.32	-	-	X!	-	-	0	-	-	-
M.34	-	X!	-	-	(06)	0	-	-	-
M.35	X!	-	-	-	-	-11	-	-	-
M.36	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.37	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.48	X!	-	-	-	-	24	-	-	-
M.52	X!	-	-	-	-	22	-	-	-
M.53	-	-	-	-	-	-	-	A!	-
M.54	-	-	X!	-	-	-4	-	-	-
M.58	-	-	-	X!	-	-	-	-	-
M.61	-	-	X!	-	(07)	-2	-	-	-
M.62	X!	-	-	-	-	15	-	-	-
M.63	-	-	X!	-	-	-	-	-	-
M.64	-	X!	-	-	(08)	0	-	-	-
M.65	X!	-	-	-	-	-	-	-	-
M.66	-	-	-	X!	-	-	-	-	-

(Continua)

Tabela 4.5 - Conclusão

M.69	-	-	-	-	-	-	-	-
M.71	X!	-	-	-	-	-	-	-
M.75	-	-	-	-	-	-	-	-
M.76	X!	-	-	-	(12)-15	-	-	-
M.77	-	X!	-	-	(04) -2	-	-	-
M.78	-	X!	-	-	-	-	-	-

OBS.: O sinal de exclamação indica as causas interplanetárias dos eventos de tempestade e as outras indicações simultâneas são ocorrências coincidentes no período. A interrogação indica fenômenos que não estão bem caracterizados. Os números indicam o intervalo temporal a partir do início da tempestade e entre parênteses a duração em horas.

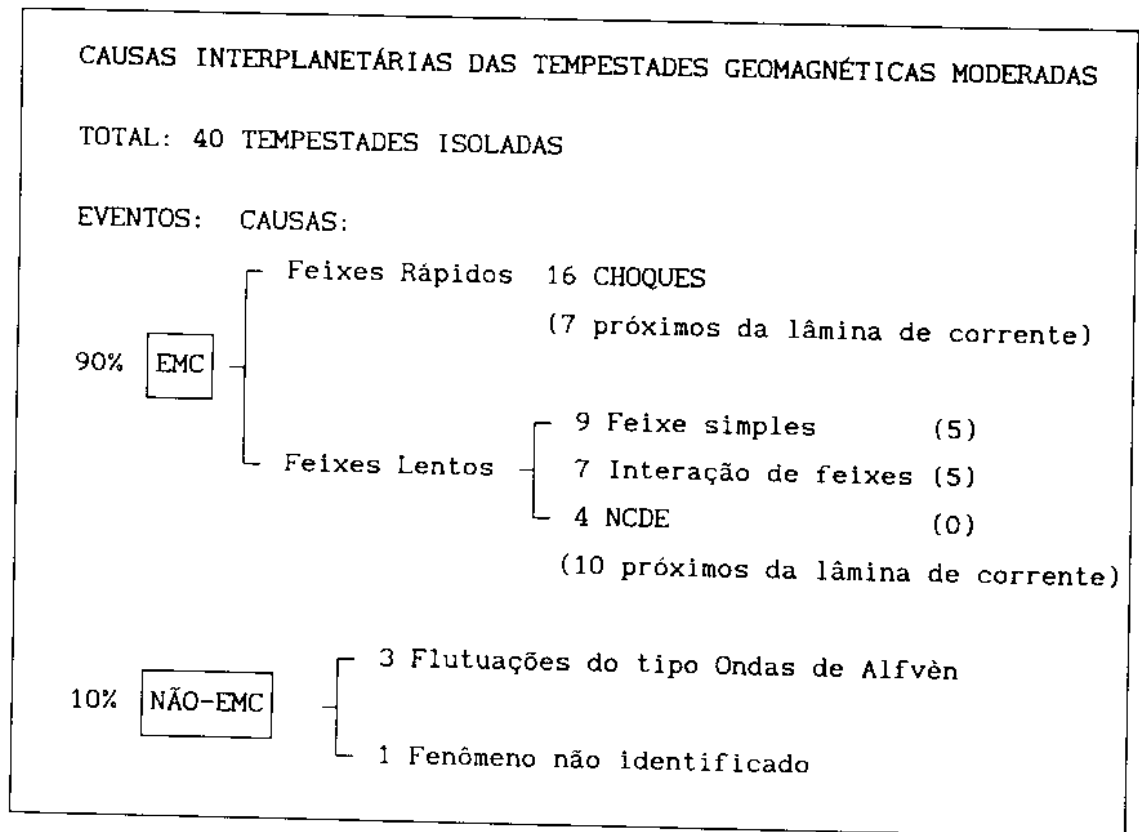


Fig. 4.3 - Causas interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas de agosto de 1978 a dezembro de 1979.

- EMC significa ejeção de massa da corona solar e NCDE aumento não compressivo de densidade no plasma solar.

4.3 - COMPLEMENTAÇÃO E COMPARAÇÃO COM OUTROS REGIMES DE TEMPESTADES

No Apêndice E apresenta-se uma relação dos eventos de tempestades geomagnéticas fracas, no intuito de complementar, embora de forma simples, as informações sobre tempestades geomagnéticas no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979. Sob a forma de tabela, apresentam-se a data da tempestade, seu início, a duração da fase principal, o Dst_{MfN} , quando ocorreu um choque e uma troca ou incursão de setor e a indicação sucinta de características interessantes nos parâmetros interplanetários.

A Tabela 4.6 relaciona a ocorrência de tempestades geomagnéticas após os choques interplanetários. Essa análise visa completar a análise anterior que partia da existência das tempestades moderadas para associar-lhes um fenômeno interplanetário dentro de 24 horas. Já nessa tabela, associou-se a cada choque a ocorrência ou não de tempestades. As tempestades estão separadas pela intensidade. As letras que seguem a identificação do choque (S.#, onde # significa número) indicam a sequência cronológica de tempestades associadas a um mesmo choque. As datas indicam tempestades que não se apresentaram como isoladas, isto é, tiveram Dst inicial < -12 nT). Sob o título sem-tempestade, são indicadas as datas dos choques que não se associaram a nenhuma tempestade. Juntamente à indicação da tempestade, indicou-se (quando disponível) o número de Mach do choque. A Figura 4.4 apresenta, em um diagrama de Venn (conjuntos com regiões de intersecção), as distribuições dos choques com a intensidade das tempestades geomagnéticas. O círculo indica o regime de tempestades que ocorreram após o choque e o número refere-se ao total de choques.

Analisando um total de 59 choques quanto à ocorrência posterior de tempestades, dentro de um intervalo de 24 horas, verificou-se que 15 choques não foram seguidos de tempestades e 3 foram ambíguos. Verificou-se também que o número de Mach não está relacionado com a intensidade das tempestades geomagnéticas.

A Tabela 4.7 apresenta os choques interplanetários relacionados com os inícios súbitos (tabulados no Solar Geophysical Data) no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979. A Figura 4.5, construída a partir dessa tabela, apresenta a análise do choque interplanetário quanto a ocorrência de uma alteração magnética súbita na atividade geomagnética medida na superfície da Terra. O impulso súbito é a alteração súbita sem tempestade e o início súbito é com a ocorrência de uma tempestade. Do total de 59 choques, 37 foram seguidos de início súbito de tempestade (denominado internacionalmente SSC, Storm Sudden Commecement). Concluiu-se que o impulso súbito tende a ocorrer após um choque (75% do total de choques no período estudado) e que o impulso súbito freqüentemente precede uma tempestade (80% do total de inícios súbitos). Portanto, um início súbito pode servir como um alerta rudimentar, com antecedência de poucas horas, da ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Por fim, a Figura 4.6 apresenta as tempestades geomagnéticas relacionadas aos choques interplanetários de acordo com a intensidade das tempestades, dentro de um intervalo de 36 horas. Nessa distribuição, associados aos choques interplanetários estão 90% das tempestades intensas ($Dst_{\text{Mín}} \leq -110$ nT), 40% dos eventos de tempestades moderadas ($-110 \text{ nT} \leq Dst_{\text{Mín}} \leq -47$ nT) e 24% dos eventos de tempestades fracas ($Dst_{\text{Mín}} \geq -47$ nT).

TABELA 4.6 - OCORRÊNCIA DE TEMPESTADES APÓS CHOQUE INTERPLANETÁRIO

S. #	TEMPESTADE FRACA	S. #	TEMPESTADE MODERADA	S. #	TEMPESTADE INTENSA	S. # SEM TEMPESTADE
S.1 (1,6)	W.1	S.3 (1,9)	M.1	S.2B (3,3)	I.1	S.13
S.2A (3,3)	W.2	S.4A	M.4	S.5B (1,3)	I.2	S.29
S.7 (1,7)	W.7	S.4B	M.5	S.15 (1,0)	I.3	S.30 (1,4)
S.11 (2,3)	W.9	S.5A (1,3)	28/09/1978	S.28B(1,1)	I.4	S.39 (2,2)
S.14A	W.10	S.6	M.8	S.32C(1,5)	I.5	S.41
S.14B	W.11	S.8 (0,23)	M.9	S.34 (1,02)	I.6	S.42
S.19	06/01/1979	S.9	M.11	S.37 (3,5)	I.7	S.45
S.20A	W.16	S.10A(0,78)	M.12	S.50 (2,3)	I.8	S.46 (2,0)
S.20B	W.17	S.10B(0,78)	M.13			S.49 (1,9)
S.22A(1,3)	W.23	S.12 (4,7)	M.18			S.54 (1,8)
S.22B(1,3)	04/02/1979	S.17A	M.22			S.55
S.24 (1,5)	18/02/1979	S.17B	M.23			S.56
S.27A(2,2)	W.27	S.18 (1,7)	M.25			S.57
S.27B(2,2)	W.28	S.21 (3,2)	M.32			S.58
S.27C(2,2)	W.29	S.22C(1,3)	M.34			S.59
S.28A(1,1)	10/03/1979	S.23	M.35			
S.31A(2,4)	22/03/1979	S.25A(2,2)	M.36			

(Continua)

Tabela 4.6 - Conclusão

S.32A(1,5)	28/03/1979	S.25B(2,2)	M.37		
S.35A(2,9)	W.32	S.26 (1,04)	M.47		
S.35B(2,9)	W.33	S.31B(2,4)	M.48		
S.40	W.38	S.32B(1,5)	29/03/1979		
S.43 (3,0)	W.43	S.33	M.51		
S.51 (1,3)	31/08/1979	S.36	M.52		
S.53A(1,6)	07/11/1979	S.44 (1,5)	M.62		
		S.47 (1,7)	M.65		
		S.52 (2,1)	M.71		
		S.53B(1,6)	M.76		
OBSERVAÇÕES:					
S.16	OCORREU NA FASE DE RECUPERAÇÃO (26/11/1978)				
S.38	OCORREU PRÓXIMO A PICO DE TEMPESTADE INTENSA (1.8)				
S.48	OCORREU LOGO APÓS S.47 E COM TEMPESTADE				

OBS.: As tempestades ocorreram dentro do intervalo de 24 horas a contar do choque interplanetário. As tempestades que apresentam características complexas estão indicadas por datas. As letras após a notação dos choques indicam choques associados a mais de uma tempestade, em ordem cronológica. Os números de Mach medidos estão indicados entre parênteses.

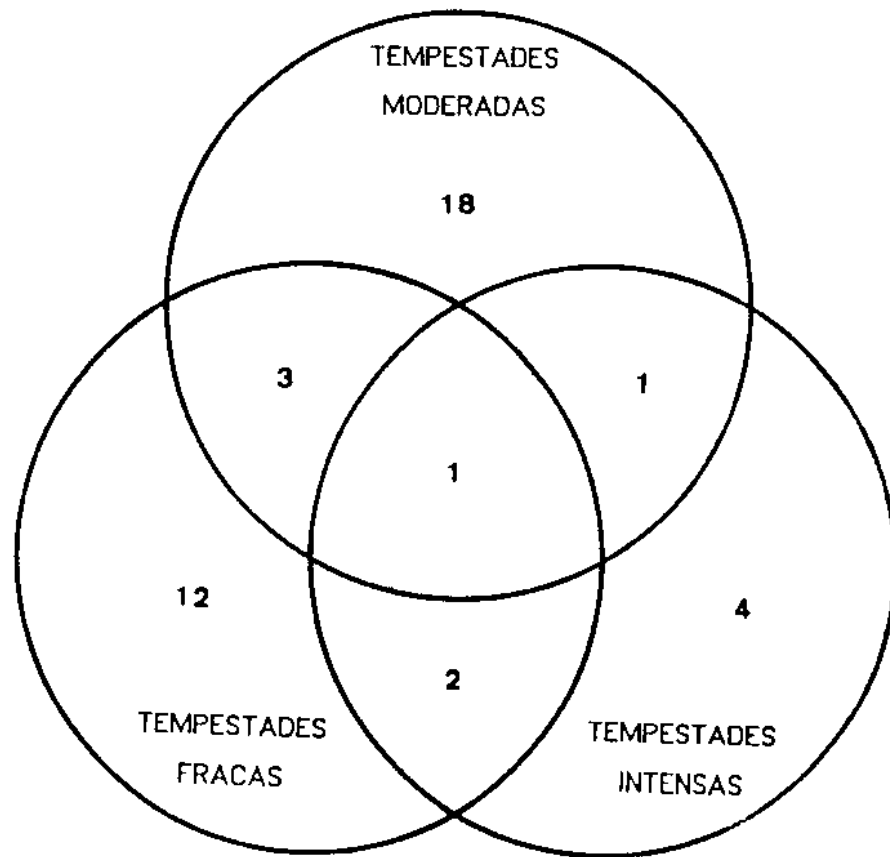


Fig. 4.4 - Distribuição dos choques com a intensidade das tempestades geomagnéticas. Os círculos são relativos aos regimes de tempestades e os números, aos choques.

- De agosto/1978 a dezembro/1979, houve um total de 59 choques. 15 deles não foram seguidos de tempestade e 3 foram ambíguos. Os choques estão dentro de 24 horas do início das tempestades. Têm-se que para tempestades geomagnéticas intensas $Dst_{mín} < -110$ nT; para moderadas $-110 \leq Dst_{mín} \leq -47$ nT; e fracas $Dst_{mín} > -47$ nT.

TABELA 4.7 - CHOQUES INTERPLANETÁRIOS E INÍCIOS SUBITOS

CHOQUE INTERPLANETÁRIO			Nº MACH		INÍCIO SUBITO			TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA	
S. #	ANO/MÊS/DIA	TU (h:min)	TU (h:min)		AH (nT)		ΔTsc (h:min)	DSTmin (nT)	DIA TU (h:min) ΔT
S.1	1978 08 18	12:26	1,6	12:42	...	...	0:16	-37,7	18 18:40 05:00
S.2	27	02:11	3,3	02:46	26	22	0:35	-22,6	27 10:40 04:00
S.3	09 05	18:17	1,9	18:58	...	...	0:41	-56,0	06 05:00 05:00
S.4	25	07:05	...	07:19	...	5	0:14	-55,0	25 02:00 11:00
S.5	28	20:40	1,3	21:05	...	...	0:25	-60,0	28 21:40 02:00
S.6	10 04	00:04	...	00:47	...	...	0:43	-51,0	04 04:00 08:00
S.7	09	02:37	1,7	03:23	...	...	0:46	-30,2	09 23:00 04:40
S.8	17	03:54	0,23	04:30	...	...	0:36	-61,0	18 01:00 06:00
S.9	26	08:27	...	—	—	—	—	-103,0	26 21:00 12:00
S.10	29	10:32	0,78	11:16	...	...	0:48	-44,0	29 12:00 04:00
S.11	11 08	01:12	2,3	01:53	...	...	0:41	-47,0	07 22:30 03:30
S.12	12	00:28	4,7	01:01	26	34	0:33	-93	12 05:55 07:05
S.13	16	18:46	...	—	—	—	—	—	—
S.14	18	22:51	...	23:40	...	...	0:49	-22,6	19 11:40 01:20
S.15	25	11:44	...	12:25	...	10	0:41	-150,0	25 12:00 06:30
S.16	26	01:40	...	—	—	—	—	RECUP.	26

(Continua)

Tabela 4.7 - Continuação

S.17	12 14	00:00-00:59	...	01:27	18	36	1:27-0:28	-58,0	14 06:25	01:35
S.18	25	11:18	...	12:12	...	11	0:54	-57	25 13:00	04:00
S.19	1979 01 06	00:32	...	01:28	...	...	1:00	-44,0	06 11:20	04:40
S.20	09	02:56	...	03:40	...	...	0:44	-22,6	09 06:20	01:40
S.21	25	00:40	3,2	01:39	...	...	1:00	-66,0	25 02:00	10:00
S.22	02 03	17:37	1,3	18:23	...	...	0:46	-22,6	03 22:30	03:40
S.23	11	00:53	...	01:47	...	...	0:54	-66,0	11 15:00	16:00
S.24	18	02:19	1,5	03:05	...	21	0:46	<-15,0	18	
S.25	21	02:19	2,2	03:02	18	27	0:43	-95,0	21 04:00	05:00
S.26	03 06	07:41	1,04	08:18	...	...	0:37	-74,0	06 08:40	04:40
S.27	09	07:21	2,2	08:09	11	...	0:47	-30,2	09 09:00	01:20
S.28	10	04:53	1,1	—	—	—	—	<-37,0	10	
S.29	15	04:54	...	05:56	...	...	1:02	—	—	
S.30	21	12:51	1,4	—	—	—	—	—	—	
S.31	22	07:48	2,4	08:26	20	28	0:38	-81,0	22 11:30	05:30
S.32	28	07:54	1,5	08:27	04	16	0:33	<-44,0	28	
S.33	04 01	21:14	...	21:50	...	38	0:36	-81,0	02 00:40	02:00
S.34	03	09:25	1,02	10:01	05	14	0:36	-200,0	03 16:00	12:00
S.35	05	01:21	2,9	01:55	19	39	0:34	-22,6	05 07:00	01:00

(Continua)

Tabela 4.7 - Continuação

S.36	05	11:38	...	—	—	—	—	—	-44,4	05 10:00	00:40
S.37	24	23:30	...	23:58	20	48	0:28	—	-141,0	25 01:40	12:40
S.38	25	12:50	...	—	—	—	—	—	<-141	25	—
S.39	05 29	18:18	2,2	18:51	26	22	0:33	—	—	—	—
S.40	06 06	18:43	...	...	...	...	...	—	-30,2	07 04:00	01:20
S.41	13	10:51	...	—	—	—	—	—	—	—	—
S.42	07 05	06:08	...	—	—	—	—	—	—	—	—
S.43	06	18:53	3,0	19:30	...	...	0:37	—	<-23,0	07 14:20	01:20
S.44	26	17:25	1,5	18:34	19	...	1:09	—	-89,0	26 21:10	05:50
S.45	28	19:37	...	21:15	...	...	0:38	—	—	—	—
S.46	08 11	17:30	2,0	18:12	...	...	0:42	—	—	—	—
S.47	20	05:52	1,7	06:25	21	14	0:33	—	-60,0	20 18:00	09:00
S.48	20	19:53	...	—	—	—	—	—	<-60,0	20 18:00	09:00
S.49	23	07:39	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—
S.50	29	04:10-05:43	...	05:58	...	13	1:48-0:15	—	-133,0	29 06:40	12:00
S.51	31	05:10	1,3	—	—	—	—	—	<-23,0	31	—
S.52	10 06	10:38	2,1	11:20	...	06	0:42	—	-59,0	06 12:00	19:00
S.53	11 07	12:55	1,6	13:49	...	...	0:54	—	-47,0	07 16:30	18:30
S.54	11	01:47	1,8	02:25	...	...	0:48	—	—	—	—

(Continua)

Tabela 4.7- Conclusão

S.55	18	01:39	...	02:09	...	...	0:30	—	—
S.56	20	04:00	...	—	—	—	—	—	—
S.57	29	15:42	...	16:47	...	...	1:05	—	—
S.58	30	06:49	...	07:39	...	34	0:50	—	—
S.59	12 01	20:22	...	—	—	—	—	—	—

OBS.: As medidas dos choques interplanetários são feitas na posição do satélite ISEE-3 e as medidas do início súbito na superfície. Os observatórios de San Juan (SJ) e Hermanus (HE) localizam-se a aproximadamente 30° de latitude geomagnética. — indica que não ocorreu o fenômeno e ... indica indisponibilidade de medidas.

CHOQUE INTERPLANETÁRIO RELACIONADO COM O INÍCIO SÚBITO
(AGOSTO DE 1978 A DEZEMBRO DE 1979)

TOTAL: 59 CHOQUES

CHOQUES SEGUIDOS DE:		TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA	
		NÃO	SIM
ALTERAÇÃO SÚBITA NO CAMPO MAGNÉTICO	NÃO	6 *	7
	SIM	9 (SI)	37 (SSC)

Fig. 4.5 - Distribuição dos choques interplanetários considerando o início súbito.

- A alteração súbita do campo magnético seguida por uma tempestade geomagnética é o início súbito de uma tempestade (Storm Sudden Commecement, SSC) e sem a tempestade geomagnética é o impulso súbito (Sudden Impulse, SI). O asterisco significa valores do Dst considerados sem a correção do efeito da pressão dinâmica do vento solar.

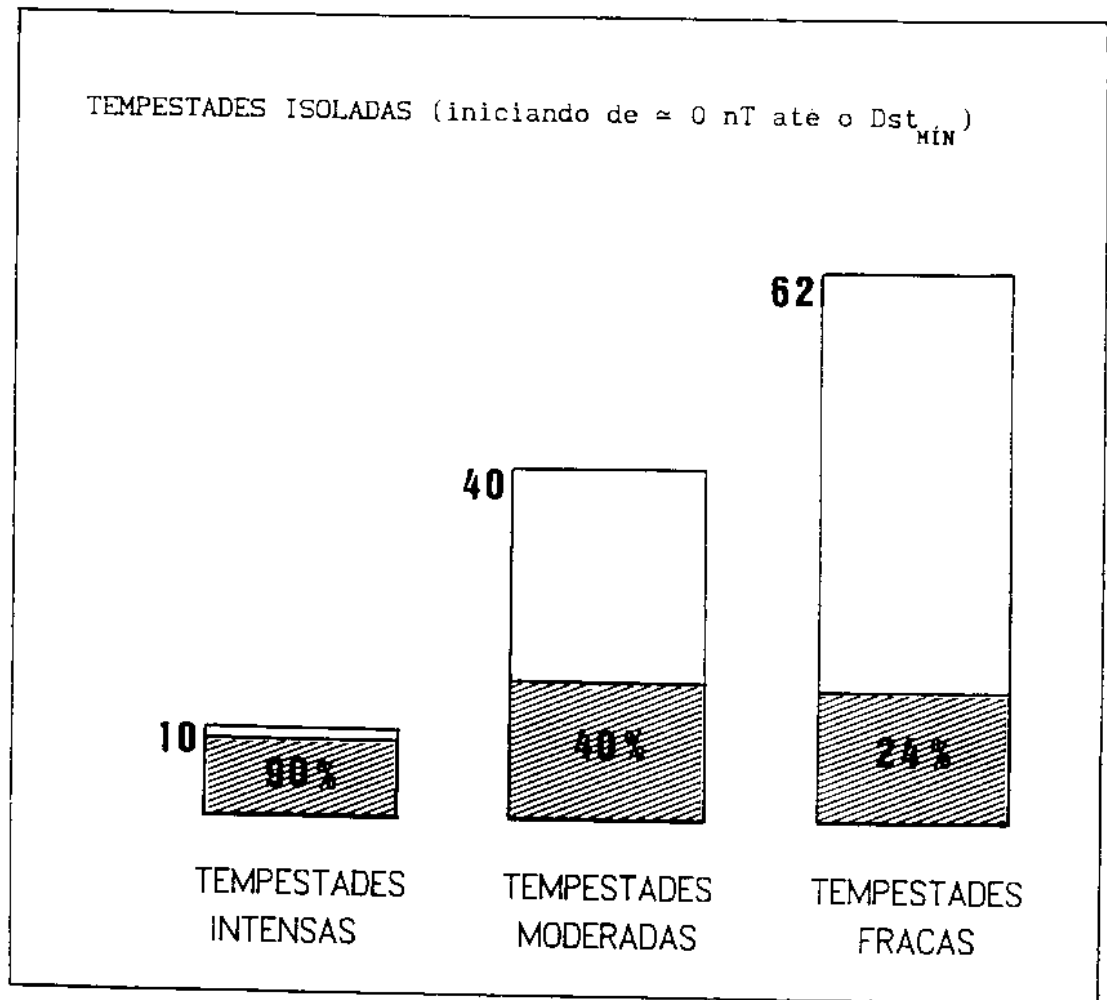


Fig. 4.6 - Tempestades geomagnéticas associadas aos choques interplanetários no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979.

- Distribuição dos choques: 90% associados às tempestades intensas; 40% a eventos de tempestades moderadas; e 24% a eventos de tempestades fracas. Os choques estão dentro de um intervalo de 36 horas do início da tempestade.

CAPÍTULO 5

FUNÇÕES DE ACOPLAMENTO ENERGÉTICO

Este capítulo tem por objetivos apresentar: (a) o cálculo quantitativo das funções de acoplamento $F\alpha$ (EY, EPS, F4, F5, F6, F6A, F11A, F14 e F14A), que procuram representar a taxa temporal de injeção de energia na magnetopausa; (b) os cálculos da perturbação Dst^* devida basicamente à corrente de anel e da taxa temporal de energia injetada na corrente de anel Q ; (c) a obtenção do gráfico $Q \times F\alpha$ para a determinação de uma relação entre essas funções de injeção de energia; (d) o cálculo da correlação R nessas relações funcionais e a confiabilidade $p_c(R, N)$ desse valor; e (e) as interpretações desses resultados.

5.1 - CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DOS EVENTOS DE TEMPESTADES MODERADAS A SEREM ESTUDADOS

Para se calcular valores do acoplamento energético, os eventos de tempestade devem satisfazer os requisitos seguintes:

- a) O número de pontos úteis na correlação deve ser ≥ 13 , para possibilitar uma significância alta no teste da confiabilidade da correlação. Somente lacunas com até quatro pontos serão interpoladas, para não distorcer as informações. Um filtro ideal (isto é, que propaga as lacunas) será utilizado na suavização dos parâmetros básicos. Essas 2 condições reduzem o número de pontos úteis, mas evitam que os resultados sofram qualquer distorção.
- b) O índice Dst deve ser contínuo durante a fase principal da tempestade. O valor inicial do Dst deve ser ≥ -12 nT. O Dst deve ter um comportamento aproximado ao de uma função monótona (do tipo não crescente) durante a fase principal.

A Tabela 5.1 apresenta a relação dos casos de tempestade a serem estudados. Dos 40 eventos de tempestades moderadas, 23 casos apresentaram condições iniciais de serem utilizados no estudo do acoplamento energético.

5.2 - TRATAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS NAS FUNÇÕES CALCULADAS

Os parâmetros físicos utilizados nos cálculos do acoplamento energético sofrerão tratamentos matemáticos para aproximarem o mais possível das condições físicas existentes na magnetosfera.

Como a magnetosfera não parece responder prontamente às flutuações rápidas nos parâmetros interplanetários quanto ao acoplamento energético e o Dst é um valor horário interpolado, os parâmetros primários (B_z , B_y , B , V , NH , NHE) serão suavizados. A suavização será feita por uma média ponderada móvel, para não haver distorções de amplitude ou fase nos parâmetros. Os coeficientes de ponderação são obtidos pelo método das ordenadas gaussianas, com as características seguintes: desvio padrão $\sigma_G = 3$, que implica resposta de filtragem $R(\leq 1h) \leq 0,30$ e número de coeficientes $N=13$ pontos.

5.3 - FATORES E PARÂMETROS ADOTADOS NOS CÁLCULOS

Os parâmetros primários são coletados na posição do satélite ISEE-3, demorando um tempo médio de deslocamento ΔT_1 até a magnetopausa (tempo de trânsito). Há ainda um tempo médio, ΔT_2 , de transferência da energia injetada na magnetopausa para a corrente de anel (tempo de processo). No estudo das correlações, esses tempos estão implícitos nas defasagens temporais obtidas.

TABELA 5.1 - EVENTOS DE TEMPESTADES MODERADAS
PARA ESTUDO DO ACOPLAMENTO ENERGÉTICO

M. 3	M. 28	M. 65
M. 4	M. 30	M. 66
M. 8	M. 36	M. 77
M. 11	M. 37	
M. 16	M. 48	
M. 17	M. 52	
M. 18	M. 53	
M. 21	M. 54	
M. 22	M. 62	
M. 25	M. 64	

A pressão dinâmica do vento solar modula as correntes na magnetopausa, cuja influência pode ser sentida na superfície da Terra (implícita no Dst) quase instantaneamente, pois $\Delta t \leq 15$ minutos. Desta forma, no cálculo do Dst* e do Q, a pressão dinâmica utilizada corresponde a um tempo corrigido do tempo de trânsito ΔT_1 .

As constantes adotadas no cálculo do Dst* e, por conseguinte, na própria equação do balanço de energia associado à corrente de anel (funções apresentadas no Capítulo 2), conforme Burton et al. (1975) e Feldstein et al. (1984), são dadas por: $b = 0,2 \text{ (eV/cm}^3\text{)}^{-1/2}$ e $C = 20 \text{ nT}$. Nas funções de acoplamento, os parâmetros (descritos no Capítulo 2) são:

$$P = (NH \text{ MH} + NHE \text{ MHE}) V^2 = (NH + 4NHE) 1,673 \times 10^{-27} V^2$$

$$B_T = (B_z^2 + B_Y^2)$$

$$B_M = 2 B_T^{1/2} (8\pi P + B^2)^{1/4}$$

$$K(s, \theta) = \frac{(1 - s \cos \theta)(s - \cos \theta)^2}{(1 + s^2 - 2 s \cos \theta)}$$

e

$$s = \frac{(8\pi P + B^2)^{1/4}}{2 B_T^{1/2}},$$

para $s > 1$ e $1 > s \cos \theta$. Explicitam-se os sistemas de unidades das funções de acoplamento como: EY em mV/m; EPS em 10^{18} erg/s ; F4, F14 e F14A em unidades gaussianas, F5, F6, F6A, e F11A em unidades MKS. O fator de decaimento da corrente de anel τ é analisado na secção seguinte e comparado com os valores disponíveis da literatura internacional.

5.4 - ESTUDO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS E DO TRATAMENTO MATEMÁTICO NO COMPORTAMENTO DOS CÁLCULOS

Analisaram-se as funções $F\alpha$ e Q e a correlação resultante considerando as seguintes possibilidades para o cálculo:

- 1) a forma do tratamento dos dados primários;
- 2) o intervalo temporal de promediação no filtro de suavização;
- 3) o tempo de trânsito do satélite até a magnetopausa ΔT_i ;
- 4) e o fator temporal de decaimento da corrente de anel τ .

Quanto à forma de tratamento dos dados primários, consideraram-se:

- a) os dados sem nenhum tratamento;
- b) suavizando só os dados do campo magnético interplanetário;
- c) suavizando os dados pela média ponderada;
- d) e interpolando as lacunas de até 4 pontos e então suavizando.

O resultado melhor e mais consistente foi obtido com o tratamento da suavização pela média ponderada em todos os dados primários, o que confirma as hipóteses físicas anteriores (atenuação das flutuações rápidas no acoplamento energético e insensibilidade relativa do Dst atual). Uma interpolação de até 4 pontos não afeta os resultados.

Quanto à suavização pela média ponderada móvel com os pesos definidos pelo método das ordenadas gaussianas, obteve-se com o filtro ideal ($\sigma_g=3$, $N=13$ pontos e $R(\leq 1h) \leq 0,30$), que tem resposta conhecida, um resultado melhor e mais consistente do que o obtido com um afrouxamento do critério ($\sigma_g=2$, $n=9$ pontos e $R(\leq 1h) \leq 0,50$) para aproveitar maior número de pontos nos cálculos. Esse resultado confirma a nossa preocupação anterior de não distorcer os dados e os cálculos com a adoção de critérios de tratamentos matemáticos pouco rigorosos com relação aos critérios físicos.

O filtro de suavização foi considerado sob 3 médias de promediação. A suavização foi feita para um tempo de promediação de 30 minutos (flutuações mais rápidas), de 60 minutos (flutuações mais lentas) e de 90 minutos (flutuações bem lentas). O 2º tempo médio de promediação deu resultados melhores. Isto confirma a nossa hipótese de que há uma atenuação das flutuações rápidas pela magnetosfera no que diz respeito ao acoplamento energético. Desta forma, o índice Dst parece ser coincidentemente um bom índice quanto à resolução temporal.

Quanto ao tempo de trânsito ΔT_1 , ele foi analisado da forma seguinte. Como as distâncias extremas na posição do satélite com respeito à Terra eram conhecidas ($L_{\min}=200$ raios terrestres e $L_{\max}=300$ raios terrestres) e como as velocidades máximas e mínimas ($V_{\max}$ e $V_{\min}$, respectivamente) do fluxo do vento solar podiam ser determinadas, para cada período correspondente de tempestade, calculou-se a partir das situações extremas ($\Delta T_{\max}=L_{\max}/V_{\min}$ e $\Delta T_{\min}=L_{\min}/V_{\max}$) o tempo de trânsito ΔT_1 de cada evento. Obteve-se que o tempo médio ΔT_1 foi aproximadamente de 60 minutos.

Supõe-se que o decaimento temporal da corrente de anel seja descrito por uma função da intensidade da corrente, dada atualmente em termos de um fator temporal, denominado τ (Equação 2.19). Como o τ representa uma conjugação complexa de fenômenos da corrente de anel (morfologia, localização, composição, dinâmica, região de injeção de partículas e processo de perdas de partículas), e que somente agora começam a ser medidos mais intensivamente por satélites, ainda não existe uma formulação analítica para esse fator. Descreve-se o τ , então, por valores definidos a intervalos de Dst*, que é consistente fisicamente por estar associado diretamente à corrente de anel. No entanto, a comunidade internacional tem utilizado o τ por intervalos de Dst, por não existir um satélite no meio interplanetário medindo continuamente a pressão dinâmica do vento solar. Este trabalho é uma das escassas oportunidades de contribuir nessa área de estudo.

Quanto ao fator temporal de decaimento τ , para o regime das tempestades geomagnéticas moderadas, examinaram-se vários conjuntos de valores obtiveram-se os resultados melhores com: $\tau = 4h$ para $-50 \text{ nT} \leq \text{Dst}^* \leq 0 \text{ nT}$; $2h$ para $-80 \text{ nT} \leq \text{Dst}^* \leq -50 \text{ nT}$; e $1h$ para $-110 \text{ nT} \leq \text{Dst}^* \leq -80 \text{ nT}$. Para permitir comparações, calculou-se também o τ por intervalos de Dst, obtendo os valores de $\tau = 2h, 1h$ e $0,7h$ para os intervalos respectivos em Dst, que é um resultado concordante com os obtidos por Gonzalez et al. (1990a) e Vasyliunas (1987). Coincidentemente, esse conjunto de τ por intervalo de Dst mostrou-se equivalente, nos cálculos efetuados, aos τ respeitando a consistência física (isto é, τ por intervalo de Dst^*).

5.5 - ANÁLISE DOS EVENTOS CALCULADOS

As funções de acoplamento $F\alpha$ e a função de injeção de energia na corrente de anel Q foram obtidas de acordo com os critérios rigorosos expostos acima.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados gerais dos cálculos, obtidos da análise de cada um dos 23 eventos. Na tabela, identifica-se o evento (M.#), indicam-se o tempo de trânsito ΔT_1 , a informação se o Dst^* inicial era maior que -12 nT , a qualidade da distribuição dos pontos nos gráficos $F\alpha \times Q$, o Dst^* mínimo da tempestade, e o tempo de correlação $\Delta T_1 + \Delta T_2$ (onde ΔT_2 é o tempo de processo). 4 eventos (que são M.16, M.22, M.62 e M.66) puderam ser selecionados para uma análise detalhada do acoplamento energético, por serem tempestades isoladas e terem uma distribuição boa de pontos nas funções de injeção energética.

Verificou-se que o tempo de trânsito médio ΔT_1 para os casos bons (4 casos) foi $\langle \Delta T_1 \rangle = 67 \text{ min}$ (desvio padrão $\sigma = 9 \text{ min}$) e considerando todos os casos (23 casos), $\langle \Delta T_1 \rangle = 53 \text{ min}$ ($\sigma = 4 \text{ min}$).

TABELA 5.2 - CÁLCULOS DO ACOPLAMENTO ENERGÉTICO

M.#	$\Delta T_1 \mp \delta(\Delta T_1)$ (min)	Dst* ≥ -12 nT	Distr. Pontos (qualidade)	Dst*-mín (nT)	$\Delta T_1 + \Delta T_2$ (min)
M.3	56,5 $\mp$ 14,5	...	Ruim	...	...
M.4	67,0 $\mp$ 24,0	...	Ruim	...	...
M.8	60,5 $\mp$ 15,5	...	Ruim	...	...
M.11	67,0 $\mp$ 21,0	Não	Ruim	...	...
M.16	77,0 $\mp$ 20,0	Sim	Bom	-57,0	130
M.17	63,5 $\mp$ 14,5	Sim	Ruim	...	...
M.18	43,0 $\mp$ 12,5	Não	Ruim	...	...
M.21	42,0 $\mp$ 16,0	Não	Ruim	...	...
M.22	54,0 $\mp$ 17,0	Sim	Bom	-74,5	85
M.25	60,5 $\mp$ 15,5	Não	Ruim	...	...
M.28	52,5 $\mp$ 18,5	Sim	Ruim	...	...
M.30	49,5 $\mp$ 14,5	Não	Ruim	...	...
M.36	59,5 $\mp$ 26,5	Não	Ruim	...	...
M.37	49,5 $\mp$ 14,5	Não	Ruim	...	...
M.48	58,0 $\mp$ 15,0	Sim	Ruim	...	...
M.52	30,0 $\mp$ 10,0	Não	Ruim	...	...
M.53	47,5 $\mp$ 14,5	Não	Ruim	...	...
M.54	73,0 $\mp$ 24,0	Sim	Ruim	...	...
M.62	82,0 $\mp$ 24,0	Sim	Bom	-109,1	250
M.64	74,0 $\mp$ 17,0	Sim	Ruim	...	...
M.65	40,0 $\mp$ 11,0	Sim	Ruim	...	...
M.66	65,5 $\mp$ 15,5	Sim	Bom	-75,8	110
M.77	61,5 $\mp$ 19,5	Sim	Ruim	...	...

Nos cálculos deste trabalho, o tempo ΔT_1 de cada evento é o utilizado; e não mais a aproximação dada por um valor médio ($\Delta T_1 = 60$ min), como em trabalhos anteriores. Quem define o intervalo da função Q a ser correlacionada com a função $F\alpha$ é o comportamento do Dst^* , isto é, o intervalo temporal em que nele identifica-se a fase principal de uma tempestade geomagnética.

As Figuras 5.1 a 5.4 apresentam o índice Dst^* , a taxa temporal de injeção energética na corrente de anel Q e as funções de acoplamento na magnetopausa $F\alpha$ para as tempestades moderadas das datas 7-8/nov./1978 (M.16), 13-14/nov./1978 (M.22), 26-27/jul/1978 (M.62) e 17-18/set/set./1979 (M.66), respectivamente. O tracejado nas figuras indica o período de melhor ajuste e, portanto, da maior correlação entre Q e $F\alpha$ (discutida adiante).

Considerando as Figuras 5.1 a 5.4 e as figuras do Apêndice D para os períodos correspondentes, fez-se uma análise geral dos eventos quanto ao acoplamento.

Quanto ao M.16, uma interação de feixes foi a sua causa interplanetária, estabelecendo um $B_z < -8,5$ nT durante 5h 30min e $Dst_{min} = -47$ nT ($Dst^*_{min} = -57$ nT). Houve um período precedente de calma no índice Dst^* maior que 20 h. Embora existente, a injeção de energia na região auroral, dada pelo índice AE, não foi modulada pelo B_z -sul. A injeção de energia na corrente de anel está relacionada a injeção através da magnetopausa, embora evidencie-se um comportamento de transferência complexo. Isto sugere formas concorrentes de transferência de energia não proporcionais ou mesmo estocamento.

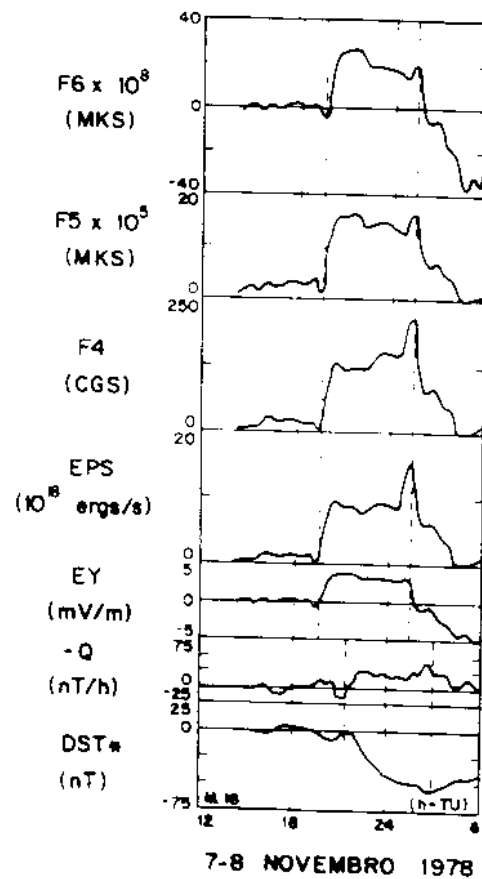


Fig. 5.1 - Para o evento M.16, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.

- O tracejado indica o período relacionado com a tempestade.

(Continua)

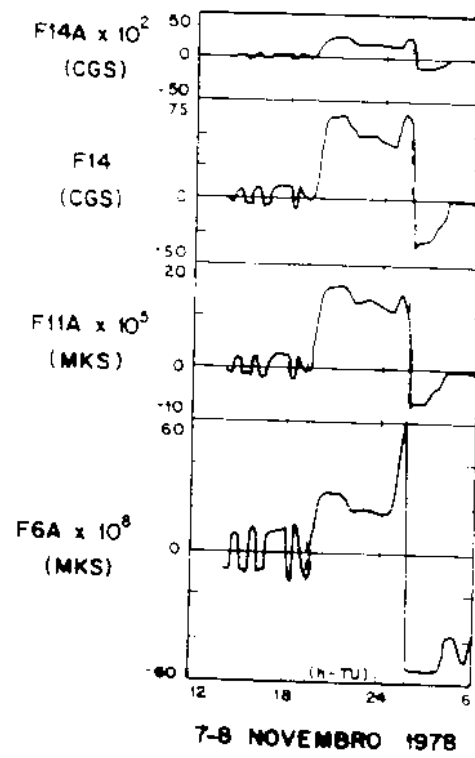


Fig.5.1 - Conclusão.

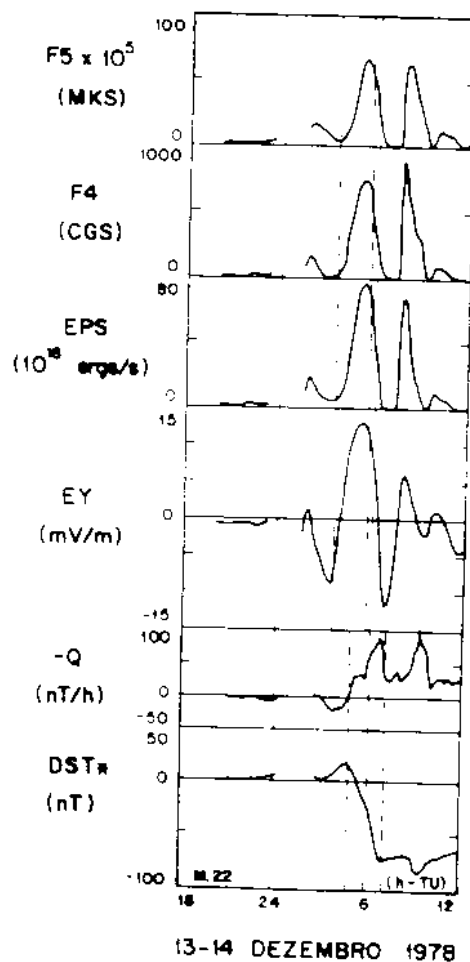


Fig. 5.2 ~ Para o evento M.22, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.

- O tracejado indica o período relacionado com a tempestade.

(Continua)

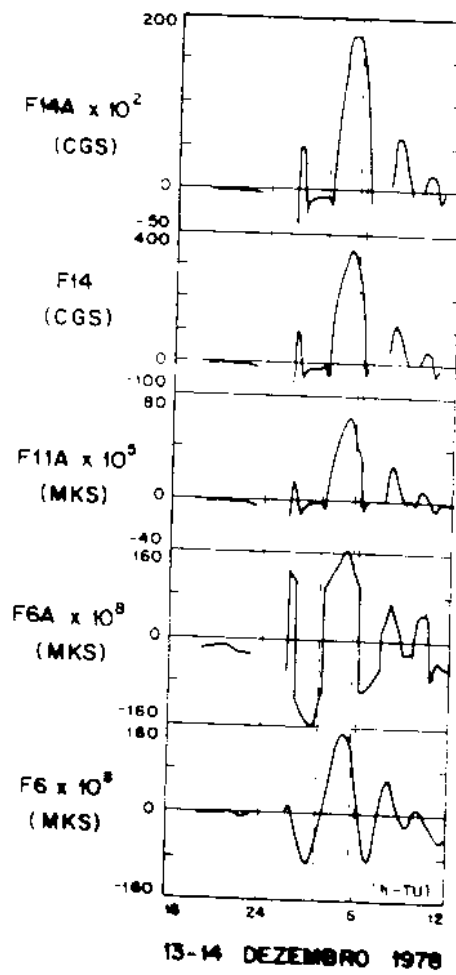


Fig.5.2 ~ Conclusão.

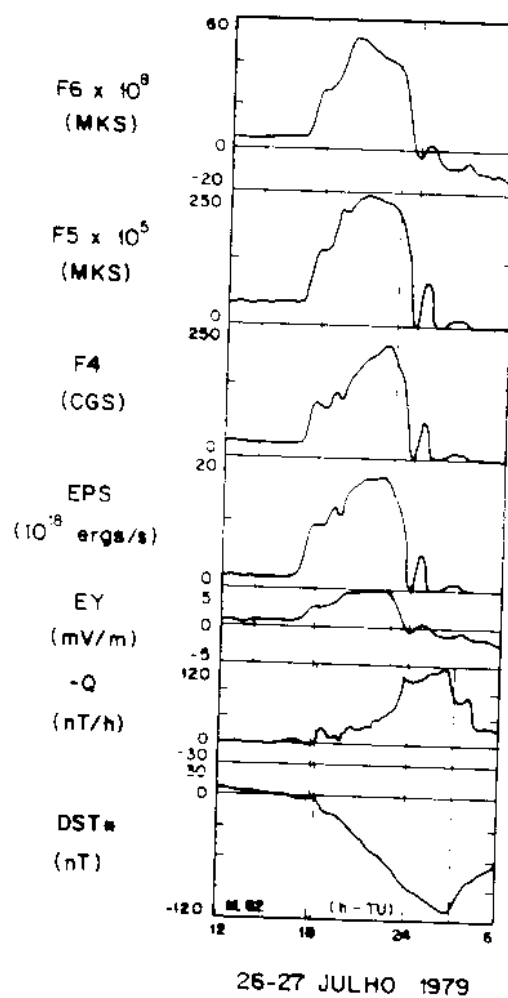


Fig. 5.3 - Para o evento M.62, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.

- O tracejado indica o período relacionado com a tempestade.

(Continua)

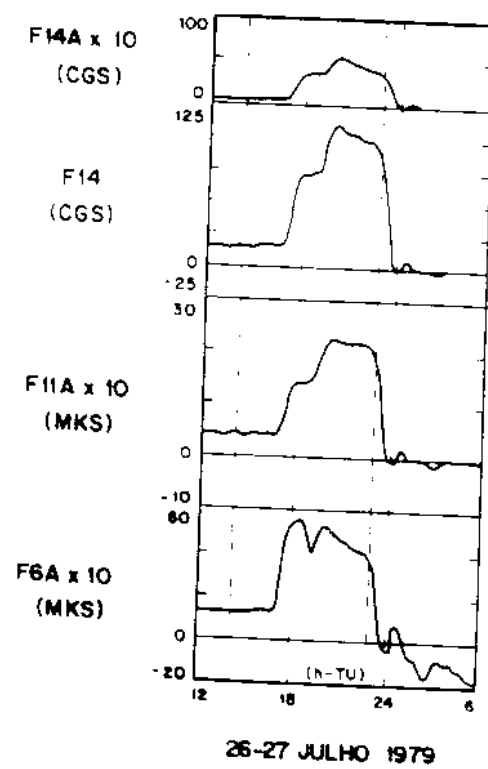


Fig.5.3 - Conclusão.

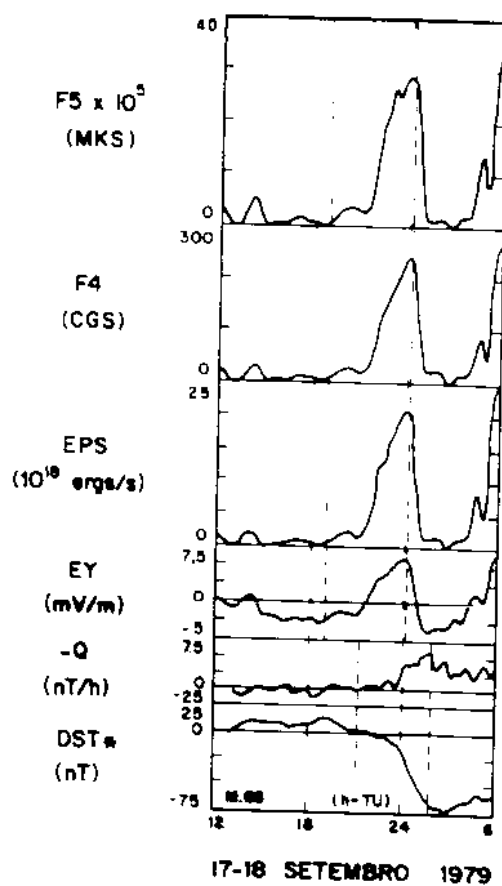


Fig. 5.4 - Para o evento M.66, apresentam-se o índice Dst, a taxa temporal da injeção de energia Q na corrente de anel e as funções de acoplamento energético na magnetopausa.

- O tracejado indica o período relacionado com a tempestade.

(Continua)

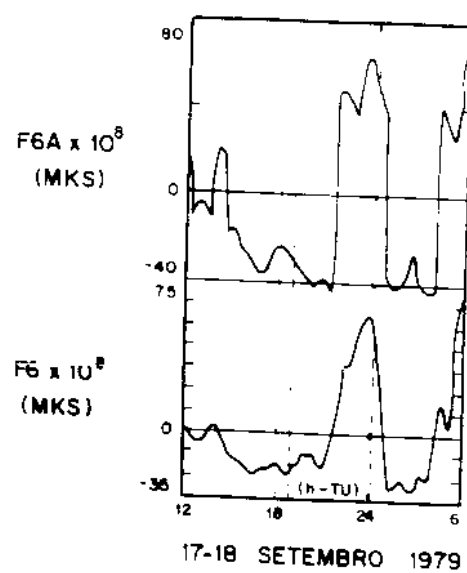


Fig.5.4 - Continuação.
(Continua)

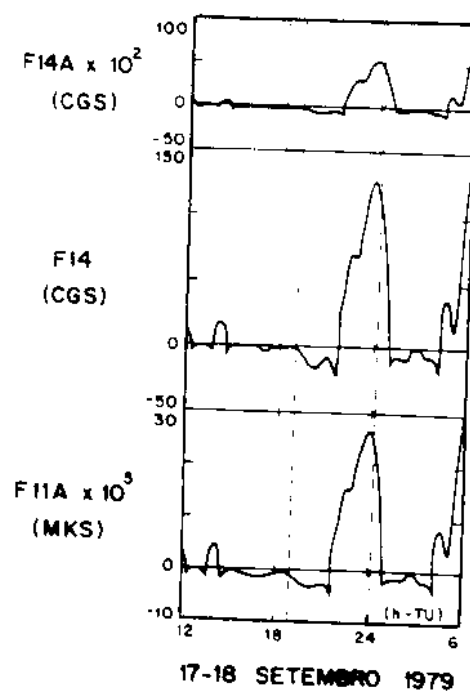


Fig.5.4 - Conclusão.

Quanto ao M.22, um choque foi a sua causa interplanetária, estabelecendo um $B_z < -15$ nT durante 1h 48min e $Dst_{mín} = -58$ nT ($Dst^* = -74,5$ nT). Houve um período precedente de calma no índice Dst^* maior que 8 h. O aumento na pressão dinâmica do vento solar intensificou as correntes na magnetopausa, criando a fase inicial. Com o aparecimento de um Bz-sul intensificado, a influência da corrente de anel predominou, resultando na tempestade. A injeção na região auroral está comandada pelo Bz-sul. A injeção de energia na corrente de anel acompanha a injeção através da magnetopausa, embora evidencie-se uma complexidade.

Quanto ao M.62, um choque interplanetário foi a sua causa interplanetária, estabelecendo um $B_z < -10$ nT durante 4 h e $Dst_{mín} = -89$ nT ($Dst^*_{mín} = -109,1$ nT). Houve um período precedente de calma no índice Dst^* maior que 24 h. Quando Bz-sul foi intensificado, a influência da pressão dinâmica do vento solar na atividade geomagnética foi superada, resultando na tempestade. A injeção de energia na região auroral foi influenciada pelo Bz-sul. Quando o Bz-sul foi intensificado, a energia passou a ser injetada também na corrente de anel.

Quanto ao M.66, um NCDE foi a sua causa interplanetária, criando um $B_z < -10$ nT durante 2 h e $Dst_{mín} = -65$ nT ($Dst^* = -75,8$ nT). Houve um período precedente de calma no índice Dst^* maior que 24 h. A criação do Bz-sul superou a influência da pressão dinâmica do vento solar e, desta forma, a fase inicial cedeu lugar à tempestade. A injeção de energia na região auroral, dada pelo índice AE, foi produzida pelo Bz-sul. A injeção de energia na corrente de anel acompanha a injeção através da magnetopausa, embora evidencie-se a complexidade dessa transferência.

No cálculo do acoplamento energético e na dissipação energética no interior da magnetosfera (Equação 2.28), verificou-se que a contribuição devida ao índice AE é pequena relativa ao índice Dst, de maneira que $Q(Dst^*, AE) = Q(Dst^*)$. Desta forma, no

regime das tempestades moderadas, a corrente de anel, através de Q , está fortemente relacionada à injeção de energia na magnetopausa, através de $F\alpha$. No entanto, o AE parece manter uma relação pico a pico com a componente Bz-sul, e mesmo eventualmente com B. Isto parece significar que o AE (correntes elétricas e fluxos energéticos na região auroral) e o Dst (corrente de anel) dispõem de mecanismos próprios de dissipação de energia, apesar de manterem também uma certa vinculação (acoplamento), uma vez que parecem modelados independentemente pelo Bz-sul. Dessa forma, o sistema dinâmico de correntes (ou de circulação de energias) parece ser mais complexo e intrigante do que uma simples relação direta.

Todos os eventos foram precedidos de um intervalo de tempo magneticamente calmo ($Dst^* \geq 0$ nT) por um período mínimo de 8 h. Isso caracterizou tempestades geomagnéticas realmente isoladas.

Ainda considerando as Figuras 5.1 a 5.4, analisou-se o comportamento das funções de acoplamento $F\alpha$, detalhadas na Tabela 2.3, dos 4 eventos selecionados.

O parâmetro Bz está presente em todas as funções de acoplamento, de forma direta ou implicitamente tanto na componente transversal B_r como no módulo do campo de indução magnética B. Como todas as funções apresentaram um comportamento similar dentro de cada evento, isso implica que, no regime das tempestades moderadas, a componente Bz-sul é quem essencialmente modula o acoplamento energético. Em geral, essa transferência de energia não é simples, pois há mecanismos múltiplos possíveis de canalização da energia (injeção na região auroral, estocamento na cauda, plasmóides e a própria complexidade da corrente de anel).

A função $F6A$ traz uma descontinuidade em seu comportamento devido à sua formulação matemática. Bz está implícito na componente transversal, porém como a injeção de energia é regulada pelo sinal de Bz (referente a sua orientação norte ou sul), pode

ocorrer uma mudança súbita de uma situação de injeção para de não-injeção (ou vice-versa), com saltos bruscos mesmo a valores elevados. Para a utilização como função de acoplamento, ela deve ser revista.

Para cada um dos eventos e cada uma das 9 funções de acoplamento, através de uma varredura a cada 5 minutos na defasagem temporal ($\Delta T_1 + \Delta T_2$) de Q e $F\alpha$, encontrou-se o valor em que houve a maior correlação. Na Figura 5.5, como um resultado típico desse cálculo, mostra-se a curva de correlação (R) de $Q \times EY$ para o evento M.66, com a correlação dada em percentagem e em função do intervalo temporal $\Delta T_1 + \Delta T_2$.

As correlações obtidas neste estudo minucioso estão apresentadas na Tabela 5.3. A tabela apresenta a correlação de $Q \times F\alpha$ para cada um dos 4 eventos e também o tempo de processo ΔT_2 . Em todos os eventos e para todas as funções, o teste de confiabilidade da correlação R deu um resultado alto, pois $P_c(R,N)$, Equação 3.7, foi menor que 0,001%.

Para ilustrar a análise da correlação, a Figura 5.6 apresenta a relação da função Q e das funções $F\alpha$ (que são, respectivamente, (a) EY , (b) EPS , (c) $F4$, (d) $F5$, (e) $F6$, (f) $F6A$, (g) $F11A$, (h) $F14$ e (i) $F14A$) para o evento M.66.

A Figura 5.7, mostrando as relações (a) $Q \times F6A$ do evento M.66 e (b) $Q \times F14$ do evento M.16, ilustra casos de baixa correlação linear.

A Figura 5.8 apresenta a relação da função Q com a função EPS para os vários eventos (respectivamente, (a) M.16, (b) M.22, (c) M.62 e (d) M.66), função comumente preferida, e que ficou caracterizada neste trabalho como uma das funções de acoplamento de mais alta correlação em todos os eventos de tempestade moderada.

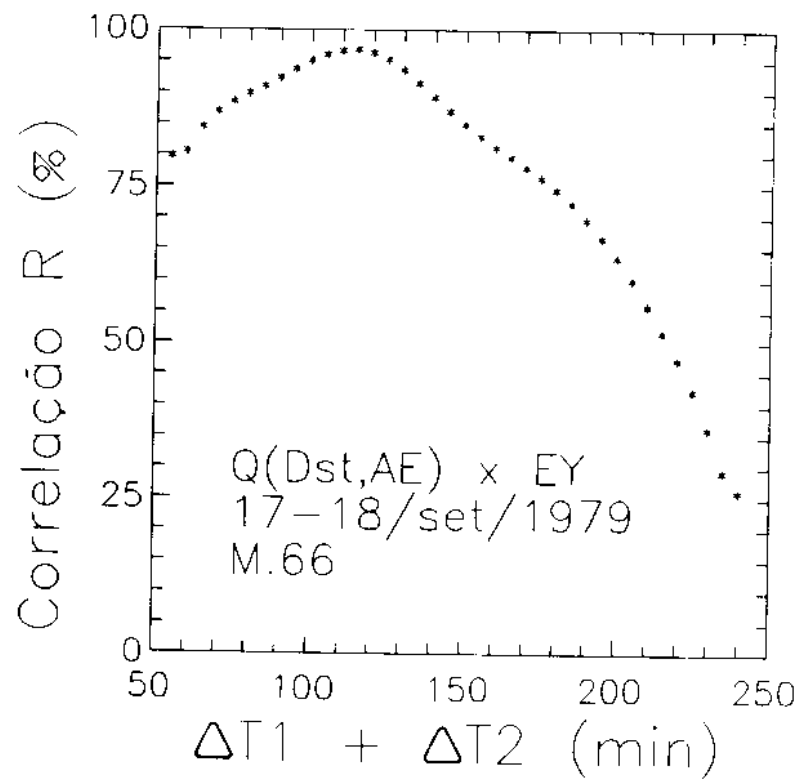


Fig. 5.5 - Curva da correlação da função de dissipação na corrente de anel Q versus a função de acoplamento na magnetopausa EY para o evento M.66 em termos da defasagem temporal $\Delta T1 + \Delta T2$ (tempo de trânsito e tempo de processo).

TABELA 5.3 - CORRELAÇÕES Q x F α

Eventos:	M.16	M.22	M.62	M.66
$\Delta T_2 \mp \delta(\Delta T):$ (min)	53 $\mp$ 20	31 $\mp$ 17	168 $\mp$ 24	44,5 $\mp$ 15,5
F α :	Correlação R (%)			
EY	72,7	82,4	95,7	96,6
EPS	86,4	83,2	94,1	95,8
F4	81,5	87,0	96,1	95,7
F5	85,8	78,7	91,6	94,8
F6	78,2	82,2	88,6	96,7
F6A	84,4	69,7	60,7	82,1
F11A	75,4	90,2	92,8	93,5
F14	43,4	81,2	89,4	93,4
F14A	50,4	81,1	82,6	93,4

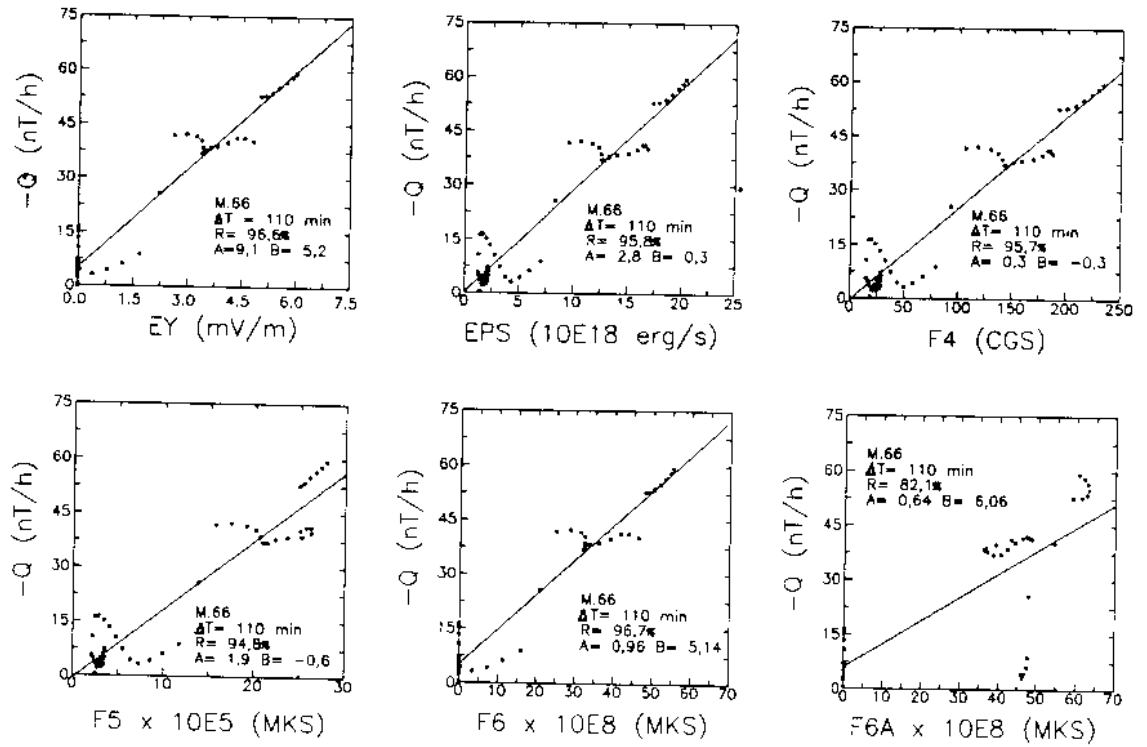


Fig. 5.6 - Para o evento M.66, apresenta-se a relação da função de dissipação Q com as funções de acoplamento: (a) EY, (b) EPS, (c) F4, (d) F5, (e) F6, (f) F6A, (g) F11A, (h) F14 e (i) F14A.

- ΔT é a defasagem temporal contendo o tempo de trânsito, R é a correlação, A é o coeficiente de inclinação e B é o coeficiente constante do ajuste linear.

(Continua)

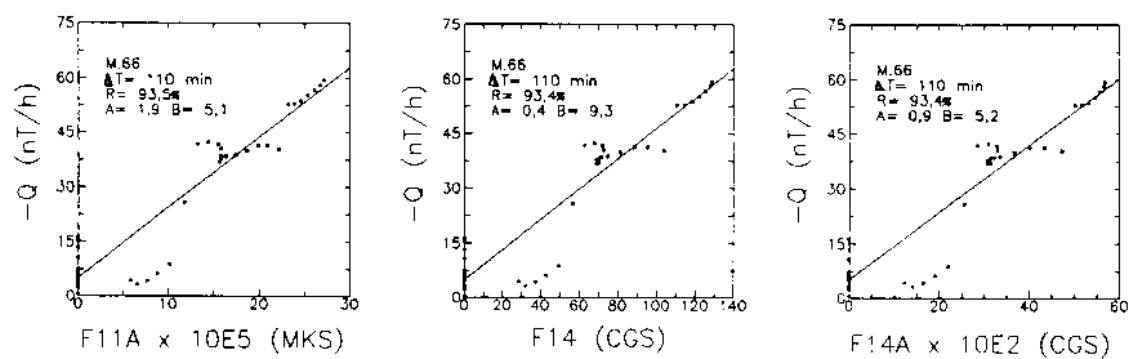


Fig. 5.6 - Conclusão.

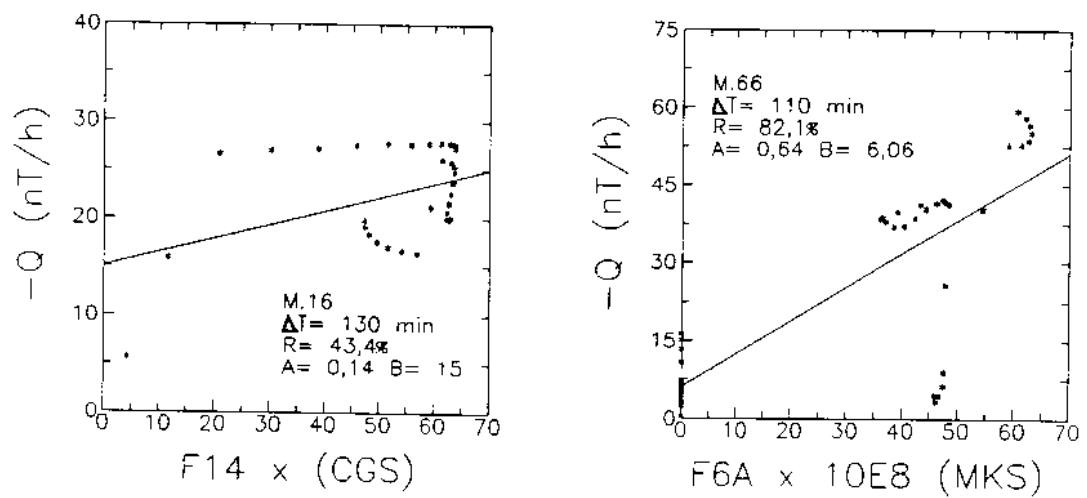


Fig. 5.7 - Exemplos de correlação fraca: (a) $Q \times F6A$ do evento M.66 e (b) $Q \times F14$ do evento M.16.

- ΔT é a defasagem temporal contendo o tempo de trânsito, R é a correlação, A é o coeficiente de inclinação e B é o coeficiente constante do ajuste linear.

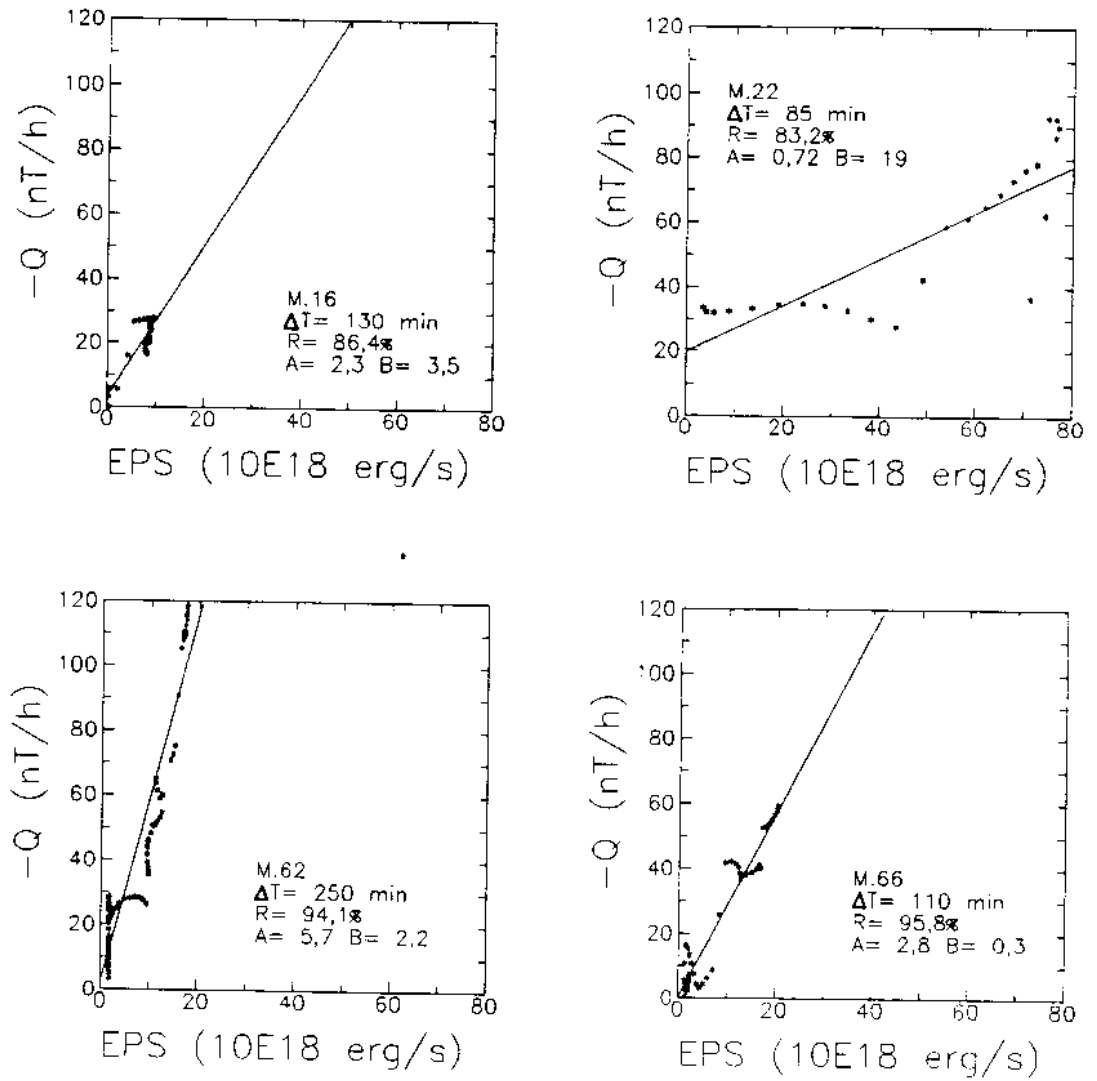


Fig. 5.8 - Relação da função de dissipação Q com a função de acoplamento EPS para os vários eventos: (a) M.16, (b) M.22, (c) M.62 e (d) M.66.

- ΔT é a defasagem temporal contendo o tempo de trânsito, R é a correlação, A é o coeficiente de inclinação e B é o coeficiente constante do ajuste linear.

Considerando as correlações da Tabela 5.3 e as funções de acoplamento da Tabela 2.3, pôde-se analisar comparativamente o desempenho das funções.

Das funções do tipo campo elétrico (1ª linha da Tabela 2.3), EY tem boa correlação. F6 contendo a influência da pressão dinâmica do vento solar não melhorou o desempenho de EY. F6A apresentou fraco desempenho e tem uma problema de formulação (descontinuidade no comportamento).

Das funções do tipo potência elétrica (2ª linha da Tabela 2.3), EPS e F4 apresentaram alta correlação. O termo de pressão dinâmica em F4 parece ter melhorado levemente o desempenho da EPS. F5 não deu um resultado tão bom quanto EPS. F11A apresentou um desempenho comparável a F5.

Na 3ª linha da Tabela 2.3, as funções F14 e F14A apresentaram um comportamento similar e não conseguiram superar os desempenhos de EPS e EY.

Como resultado da comparação global, para essas tempestades geomagnéticas moderadas isoladas e, afortunadamente, com causas interplanetárias distintas, concluiu-se que as funções EY e EPS não foram superadas pelo desempenho das demais funções de acoplamento. Encontrou-se também que a função F4, contendo o termo da pressão dinâmica do vento solar, melhora levemente o desempenho da função EPS. Isto se justifica por esse parâmetro representar a alteração da geometria da magnetosfera, isto é, modular a área frontal exposta ao processo de reconexão magnética. A função F6A foi a que demonstrou globalmente o mais fraco desempenho. O evento M.16, causado por uma interação de feixes, foi o que apresentou as correlações mais baixas.

No entanto, a alta correlação, embora necessária, não é suficiente para conclusões com respeito ao acoplamento energético. Uma análise dos gráficos de $F\alpha \times Q$, nas situações de maiores correlações, sob diferentes comparações, permitirá responder a importantes questões.

A Figura 5.6 mostra que um aumento de injeção na magnetopausa relaciona-se a um aumento de injeção na corrente de anel. No entanto, a distribuição dos pontos demonstra que essa relação é complexa. Na parte de injeção mais fraca de $F\alpha$, a transferência apresenta-se não linear. Torna-se necessário avaliar melhor a contribuição de processos de injeção de energias não proporcionais na reconexão magnética como também processos diferentes, como, por exemplo, a interação viscosa na magnetopausa. Por consequência, é importante dispor também de constantes muito bem definidas no cálculo do Dst^* (Equação 2.16), pois esses valores influem no nível básico da função Q .

Na parte de injeção mais intensa de $F\alpha$, o comportamento tende a um ajuste linear na transferência energética.

A utilização de τ por intervalos de Dst^* resulta em descontinuidades nas mudanças de intervalo e em um comportamento um pouco alterado na relação de $Q \times F\alpha$ (posição dos pontos). Isto motiva a um esforço para obter uma função analítica para o termo de decalmento da corrente de anel. Porém essa formulação exige um conhecimento mais completo e aprofundado da corrente de anel através de medidas diretas. Enquanto obtido indiretamente, ressalta-se que o τ tem seu valor mínimo limitado pela necessidade física da energia injetada na corrente de anel ter de ser menor que a energia injetada na magnetopausa, aspecto que deve ser obedecido em simulações que se fazem nessa área de estudo.

A Figura 5.7a mostra uma relação pobre, apesar da correlação alta ($R=82\%$), ocasionada por problemas de descontinuidade

na função de acoplamento F6A. A Figura 5.7b mostra uma relação pobre, com correlação baixa ($R=43\%$). Isso exemplifica os cuidados necessários na análise das correlações.

A Figura 5.8 apresenta as relações de Q com função de acoplamento EPS, que, juntamente com F4, caracterizou-se por apresentar uma das mais altas correlações. Novamente, evidenciou-se a complexidade do acoplamento energético. Com um aumento na injeção na magnetopausa por $F\alpha$, há um aumento na injeção na corrente de anel em Q. Na região de mais fraca injeção de $F\alpha$, a transferência não apresenta um comportamento linear; já para valores mais altos, há uma tendência a esse ajuste linear. Apesar dessas tempestades ocorrerem como eventos verdadeiramente isolados, verificou-se que o processo direto de transferência de energia (driven process) não ficou caracterizado de forma exclusiva. Além do mais, os tempos de processos ΔT_2 diferentes de cada evento são evidências de um comportamento de transferência mais complexo. Sugere-se, dessa forma, para o futuro, uma análise do histórico da magnetosfera quanto à transferência de energia para a corrente de anel ou, ainda mesmo, a identificação e caracterização do processo de descarga súbita de energia (unload process) armazenada na cauda magnetosférica, que pode contribuir para a corrente de anel.

Por fim, sugere-se ainda, como inevitável, para uma verdadeira compreensão do comportamento complexo da corrente de anel em sua interação com a magnetosfera, que sejam analisados detalhadamente nos estudos futuros de acoplamentos energéticos os aspectos: morfologia, localização, composição, região de injeção de partículas na corrente de anel, mecanismos de perdas de partículas e mecanismos de acoplamento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões quanto às origens interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas (Dst_{min} no intervalo de -110 nT a -47 nT) e quanto às funções de acoplamento energético vento solar/corrente de anel durante a fase principal dessas tempestades.

No período de agosto de 1978 a dezembro de 1979, a partir do índice Dst identificaram-se 78 tempestades geomagnéticas moderadas. Dessas tempestades, 40 iniciaram com $Dst \geq -12$ nT, caracterizando tempestades isoladas, denominadas eventos de tempestade. Utilizando os parâmetros interplanetários medidos pelo satélite ISEE-3, pode-se estudar as origens interplanetárias dos eventos de tempestade, e que juntamente com o índice AE permitiram estudar também o acoplamento energético do vento solar/corrente de anel.

6.1 - CONCLUSÕES QUANTO ÀS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS DOS EVENTOS DE TEMPESTADE

Inicialmente, em um estudo mais clássico, verificou-se que 18 eventos de tempestade seguiram choques interplanetários e 22 seguiram fenômenos não-choques.

Ampliando essa análise para todos os regimes de tempestade, verificou-se que, dentro de um intervalo de 24 horas, de um total de 59 choques, 15 choques não foram seguidos de tempestades e 3 foram ambíguos. Verificou-se que o número de Mach não está relacionado com a intensidade das tempestades.

Do total de 59 choques, 78% foram seguidos de impulso súbito (sudden impulse) e 80% dos súbitos impulsos foram seguidos de tempestades, caracterizando início súbito de tempestades (storm sudden commencement). Portanto, o início súbito pode servir como uma advertência da possibilidade de ocorrência de tempestade geomagnética.

Verificou-se, por fim, que os choques interplanetários causaram 90% das tempestades intensas ($Dst_{\min} \leq -110$ nT), 40% dos eventos de tempestades moderadas (-110 nT $\leq Dst_{\min} \leq -47$ nT) e 24% dos eventos de tempestades fracas (-47 nT $\leq Dst_{\min} \leq 0$ nT).

No entanto, como resultado original, descobriu-se que as origens interplanetárias das tempestades geomagnéticas moderadas formam uma estrutura abrangente e com uma hierarquia de caracterização.

Os fenômenos interplanetários causadores das tempestades geomagnéticas puderam ser enquadrados sob 2 categorias mais abrangentes: fenômenos de ejeção de massa coronal (EMC) ou fenômenos do tipo não-EMC. No EMC podem ocorrer feixes rápidos (produzindo choques interplanetários) ou feixes lentos, caracterizando feixes simples, interação de feixes, aumento não compressivo de densidade (NCDE) do plasma solar e incursão de setor. No não-EMC estariam ondas do tipo alfvênicas, troca de setores e outros.

Dos 40 eventos de tempestade, 90% são causados por fenômenos EMC. Dessa categoria, 45% são choques interplanetários. Nos fenômenos EMC restantes, como feixes lentos, 25% são feixes simples, 20% são interação de feixes e 10%, NCDE.

Os eventos restantes (10%) são causados por fenômenos não-EMC, onde 3 são flutuações do tipo ondas de Alfvén e 1 é um fenômeno não identificado (devido a lacunas nos dados).

Dos fenômenos EMC, 47% ocorreram próximos da lâmina de corrente heliosférica (dentro de 24 horas). 7 dos 16 choques; 5 dos 9 feixes simples; e 5 das 7 interações de feixes estavam próximos da lâmina. Já nenhum dos 4 NCDE estavam próximos da lâmina.

Concluiu-se que a orientação primordial do campo magnético interplanetário está relacionada ao setor de polaridade magnética do sol. No entanto, os fenômenos interplanetários modulam essa orientação, intensificando a componente B_z (no sistema da magnetosfera) ou mudando a sua orientação.

Verificou-se que os choques interplanetários são causas de tempestades de qualquer intensidade; já as flutuações do tipo alfvênicas foram identificadas como causas de tempestades moderadas.

As tempestades moderadas (1978-1979), comparadas com as intensas, apresentaram maior diversidade de causas interplanetárias.

6.2 - CONCLUSÕES QUANTO AO ACOPLAMENTO ENERGÉTICO DURANTE A FASE PRINCIPAL DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS MODERADAS

Da análise da injeção de energia na magnetopausa com respeito a injeção na corrente de anel, pela aplicação de filtros de suavização, concluiu-se que, em termos da transferência de energia, a magnetosfera atua como um filtro passa-baixo. As flutuações com períodos menores do que 30 minutos são fortemente atenuadas. Esse comportamento é decorrente da energia, proveniente da magnetopausa, atingir a corrente de anel principalmente através de uma região delgada de plasmas e de correntes na cauda magnetosférica.

A existência dessa atenuação foi comprovada também, neste trabalho, pela comparação do índice Dst equatorial horário (do World Data Center) com o índice Dst com resolução de 2,5 min, obtido de 10 estações, calculado por Burton et al. (1975). Isto explica

porque, apesar de ser obtido de apenas 4 estações espaçadas em longitudes, o índice Dst horário apresenta-se nos estudos de acoplamento como um bom índice, isto é, índice capaz de descrever o acoplamento.

Como o fator temporal de decaimento τ representa uma conjugação complexa de fenômenos da corrente de anel (morfologia, localização, composição, dinâmica, região de injeção de partículas e processos de perdas), e que somente agora começam a ser investigados mais intensivamente por satélites, ainda não existe uma formulação analítica para esse fator. Em uma das escassas oportunidades de contribuir com essa área de estudo, consequência da inexistência de um satélite para a obtenção contínua de medidas interplanetárias, este trabalho calculou e concluiu que os valores de τ são: 4 h para $0 \geq Dst^* \geq -50$ nT, 2 h para $-50 \text{ nT} > Dst^* \geq -80$ nT, e 1 h para $-80 \text{ nT} > Dst^* \geq -110$ nT. Considerando os cálculos feitos com τ por intervalos de Dst, como utilizados rudimentarmente pela comunidade internacional pela dificuldade já mencionada, obteve-se os valores de $\tau = 2$ h, 1 h e 0,7 h para os intervalos respectivos em Dst, que é um resultado concordante com os obtidos por Gonzalez et al. (1990) e Vasyliunas (1987). Esse conjunto de τ por intervalos de Dst mostrou-se equivalente, no regime das tempestades moderadas, aos τ respeitando a característica física (isto é, τ por intervalo de Dst^*).

Durante o regime das tempestades geomagnéticas moderadas, como todas as funções de acoplamento calculadas apresentaram comportamento similar, concluiu-se que a componente Bz-sul é quem modula essencialmente o acoplamento energético.

Analisando de forma geral os termos que contribuem para a dissipação da energia injetada através do acoplamento energético na magnetopausa, concluiu-se que Bz-sul produz a injeção de energia na região auroral e na corrente de anel. O índice AE mantém, em geral, uma relação pico a pico com a componente Bz-sul (flutuações) e o índice Dst com um Bz-sul integrado no tempo. Isso indica que os

fenômenos associados ao AE (correntes elétricas e fluxos na região auroral) e o Dst (corrente de anel) dispõem de mecanismos próprios de dissipação de energia, apesar de manterem uma certa vinculação (acoplamento), uma vez que mostram-se modelados independentemente pelo Bz-sul. Resultado que aponta para uma transferência de energia mais complexa do que uma simples relação direta (driven process).

Quanto ao acoplamento energético no regime moderado, concluiu-se do estudo das 9 funções de acoplamento energético que as funções EY (do tipo campo elétrico) e EPS (do tipo potência elétrica) não foram superadas pelo desempenho das demais funções. Encontrou-se também que a função F4, contendo o termo de pressão dinâmica do vento solar, melhora levemente o desempenho da função EPS. Isto se justifica por esse parâmetro representar a alteração da geometria da magnetosfera, isto é, representar a modulação da área frontal exposta ao processo da reconexão magnética.

A função F6A é inadequada para ser utilizada como função de acoplamento, pois apresenta uma descontinuidade em seu comportamento devida a sua formulação atual. O parâmetro Bz está implícito na componente transversal, porém como uma injeção de energia é regulada pelo sinal de Bz (referente a sua orientação norte ou sul), pode ocorrer uma mudança súbita de uma condição de injeção para de não-injeção (ou vice-versa), com saltos bruscos mesmo a valores elevados.

A análise detalhada de tempestades moderadas isoladas mostrou que o processo direto de transferência de energia (driven process) não ocorre de forma exclusiva. No regime fraco de injeção de energia ($\leq 10-40$ erg/s) na magnetopausa, o processo de transferência não é linear, demonstrando complexidade. Quando a injeção se intensifica, a relação tende a linearizar-se (o processo direto predomina). Além do mais, os tempos de processos diferentes (de 30 a 170 min) são evidências de um comportamento de transferência mais complexo. No regime das tempestades moderadas, devem contribuir

processos de injeção de energias não proporcionais (através dos vários meios de dissipação de energia) como também a injeção através de interação viscosa na magnetopausa.

Concluiu-se que para estudos das tempestades geomagnéticas, principalmente nos regimes moderado e fraco, é necessário dispor de constantes bem definidas no cálculo do Dst corrigido da pressão, pois esse cálculo afeta os valores de base das relações de transferência (isto é, quando a energia injetada na magnetopausa é pequena, $< 10^{18}$ erg/s).

Finalmente, verificou-se que o τ por intervalos de Dst resulta em descontinuidades na relação $Q \times F\alpha$ (dissipação na corrente de anel versus função de acoplamento) e altera um pouco a posição dos pontos nesta relação. É necessário pesquisar uma função analítica para o termo de decaimento da corrente de anel; porém essa formulação exige um conhecimento mais completo e aprofundado da corrente de anel através de medidas diretas.

6.3 - PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS

Com os estudos detalhados das origens interplanetárias e do desenvolvimento da fase principal das tempestades moderadas realizados neste trabalho, evidenciaram-se as necessidades seguintes:

- Analisar as origens interplanetárias das tempestades geomagnéticas fracas ($Dst > -50$ nT).
- Analisar o desenvolvimento da fase principal das tempestades fracas.
- Comparar os parâmetros característicos associados às tempestades geomagnéticas (como, por exemplo, o fator temporal de decaimento da corrente de anel) durante as fases principal e de recuperação.

- Determinar uma função, em termos da hora local, que descreva a assimetria da corrente de anel. Isto permitirá análises da dinâmica da corrente de anel, da sua morfologia, da região de injeção de partículas e dos processos de acoplamento de correntes elétricas. Será útil ainda no estudo de outros fenômenos de superfície que possam ser influenciados por perturbações magnéticas localizadas.
 - Analisar a influência do histórico da magnetosfera quanto à transferência de energia para a corrente de anel, como também identificar e caracterizar o processo de descarga súbita da energia armazenada na cauda magnetosférica (unload process), que pode contribuir com a corrente de anel.
 - Analisar a corrente de anel, em termos da morfologia, localização, composição, região de injeção de partículas, mecanismos de perdas e mecanismos de acoplamentos, através de medidas efetuadas por satélites na região da corrente e vizinhanças, em bases contínuas e simultaneamente em várias posições.
- .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akasofu, S.-I. The solar wind-magnetosphere energy coupling and magnetospheric disturbances. **Planetary Space Science**, 28:495-509, 1980.
- _____. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. **Space Science Reviews**, 28:121-190, 1981.
- Akasofu, S.-I.; Chapman, S. **Solar terrestrial physics**. Oxford, Claredon, 1972.
- Akasofu, S.-I.; Fry, C.F. A first generation numerical geomagnetic storm prediction scheme. **Planetary Space Science**, 34(1):77-92, 1986.
- Baker, D.N. Statistical analyses in the study of solar wind-magnetosphere coupling. In: Kamide, Y.; Slavin, J.A., ed. **Solar wind-magnetosphere coupling**. Tokyo, Terra Scientific (Terrapub), 1986. p. 17-38.
- Baker, D.N.; Akasofu, S.-I.; Baumjohann, W.; Bieber, J.W.; Fairfield, D.H.; Hones Jr., E.W.; Mauk, B.; McPherron, R.L.; Moore, T.E. Substorms in the magnetosphere. In: Butler, D.M.; Papadopoulos, K., ed. **Solar terrestrial physics: present and future**. Maryland, University of Maryland, 1984. cap. 8, p. 1-55. (NASA-1120).
- Baker, D.N.; Zwickl, R.D.; Bame, S.J.; Hones Jr., E.W.; Tsurutani, B.T.; Smith, E.J.; Akasofu, S.-I. An ISEE-3 high time resolution study of interplanetary parameter correlations with magnetospheric activity. **Journal of Geophysical Research**, 88(A8):6230-6242, 1983.

- Baumjohann, W. Merits and limitations of the use of geomagnetic indices in solar wind-magnetosphere coupling studies. In: Kamide, Y.; Slavin, J.A., ed. **Solar wind-magnetosphere coupling**. Tokyo, Terra Scientific, 1986. p. 3-15.
- Bavassano-Cattaneo, M.B.; Tsurutani, B.T.; Lin, R.P. Subcritical and supercritical interplanetary shocks: Magnetic field and energetic particle observations. **Journal of Geophysical Research**, 91(A11):11,929-11,935, Nov. 1986.
- Bevington, P.R. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**. New York, McGraw-Hill, 1969.
- Block, L.P. The magnetosphere. In: Egeland, A.; Holter, O.; Omholt, A. **Cosmical geophysics**. Oslo, Universitetsforlaget, 1973. cap. 8, p. 103-119.
- Burlaga, L.F. Hydromagnetic waves and discontinuities in the solar wind. **Space Science Reviews**, 12:600-657, 1971.
- _____. Interplanetary streams and their interaction with the Earth. **Space Science Reviews**, 17:327-352, 1975.
- Burlaga, L.F.; McDonald, F.B.; Ness, N.F.; Schwenn, R.; Lazarus, A.J.; Mariani, F. Interplanetary flow systems associated with cosmic ray modulation in 1977-1980. **Journal of Geophysical Research**, 89(A8):6579-6587, 1984.
- Burton, R.K.; McPherron, R.L.; Russell, C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. **Journal of Geophysical Research**, 80(31):4204-4214, Nov. 1975.
- Cospar Plenary Meeting, 27., Helsinki, Finland, July 23, 1988. **Proceedings on Solar-Terrestrial Energy Program**. Urbana, SCOSTEP, University of Illinois, 1988.

- Feldstein, Y.I.; Pisarsky, V.YU.; Rudneva, N.M.; Grafe, A. Ring current simulation in connection with interplanetary space conditions. *Planetary Space Science*, 32(8):975-984, 1984.
- Gibson, E.G. Description of solar structure and processes. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 10(2):395-461, May 1972.
- Gloeckler, G.; Wilken, B.; Stüdemann, W.; Ipavich, F.M.; Hovestadt, D.; Hamilton, D.C.; Kremser, G. First composition measurement of the bulk of the storm-time ring current (1 to 300 keV/e) with AMPTE-CCE. *Geophysical Research Letters*, 12(5):325-328, 1985.
- Gonzalez, W.D. Efficiency of electric field transfer at Earth's magnetopause and flow amplitudes related to reconnection. *Conference Achievements of The IMS*, Graz, Austria, 1984.
- _____ Electric field and energy transfer by magnetopause reconnection. In: Kamide, Y.; Slavin, J.A., ed. *Solar wind-magnetosphere coupling*. Tokyo, Terra Scientific, 1986. p. 315-320.
- _____ A unified view of solar wind-magnetosphere coupling functions. *Planetary Space Science*, 38(5):627-632, 1990.
- Gonzalez, W.D.; Gonzalez, A.L.C. Influence of the Bx component of the interplanetary magnetic field on magnetopause reconnection. *Geophysical Research Letters*, 7(10):773-776, 1980.
- _____ Solar wind energy and electric field transfer to the Earth's magnetosphere via magnetopause reconnection. *Geophysical Research Letters*, 8(3):265-268, 1981.
- _____ Energy transfer by magnetopause reconnection and the substorm parameter ϵ . *Planetary Space Science*, 32(8):1007-1012, 1984.

- Gonzalez, W.D.; 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*, 38(6):765-769, 1990a.
- Gonzalez, W.D.; Gonzalez, A.L.C.; Tsurutani, B.T. On equivalence of the solar wind coupling parameter ϵ and the magnetospheric energy output parameter U_r during intense Geomagnetic storms. *Planetary Space Science*, 38(3):341-342, 1990b.
- Gonzalez, W.D.; Mozer, F.S. A quantitative model for the potential resulting from reconnection with an arbitrary interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 79(28):4186-4194, Oct. 1974.
- Gonzalez, W.D.; Tsurutani, B.T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). *Planetary Space Science*, 35(9):1101-1109, 1987.
- Gonzalez, W.D.; Tsurutani, B.T.; Gonzalez, A.L.C.; Smith, E.J.; Tang, F.; Akasofu, S.-I. Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 94(A7):8835-8851, 1989.
- Gosling, J.T.; Asbridge, J.R.; Bame, S.J.; Feldman, W.C. Solar wind stream interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 83(A4): 1401-1412, 1978.
- Gosling, J.T.; Borrini, G.; Asbridge, J.R.; Bame, S.J.; Feldman, W.C.; Hansen, R.T. Coronal streamers in the solar wind at 1 AU. *Journal of Geophysical Research*, 86(A7):5438-5448, 1981.

- Gosling, J.T.; Hildner, E.; Asbridge, J.R.; Bame, S.J.; Feldman, W.C. Noncompressive density enhancements in the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 82(32):5005-5010, Nov. 1977.
- Gringauz, K.I. Plasmasphere and its interaction with the ring current. *Space Science Reviews*, 34:245-257, 1983.
- Hamilton, D.C.; Glockler, G.; Ipavich, F.M.; Stüdemann, W.; Wilken, B.; Kremser, G. Ring current development during the great geomagnetic storm of February 1986. *Journal of Geophysical Research*, 93(A12):14343-14355, Dec. 1988.
- Hill, T.W. Highlights of theoretical progress related to the international magnetospheric study. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 20(3):671-684, 1982.
- Holloway Jr., J.L. Smoothing and filtering of time series and space fields. In: Landsberg, H.E.; Miegheem, J.V., ed. *Advances in geophysics*. New York, Academic, 1958. v. 4, p. 351-389.
- Kamide, Y.; Akasofu, S.-I. Notes on the auroral eletrojet indices. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 21(7):1647-1656, Aug. 1983.
- Kan, J.R.; Lee, L.C. Energy coupling functions and solar wind-magnetosphere dynamo. *Geophysics Research Letters*, 6:577-580, 1979.
- Klein, L.W.; Burlaga, L.F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *Journal of Geophysical Research*, 87(A2):613-624, Feb. 1982.
- Lanzerotti, L.J.; Uberoi, C. Earth's magnetic environment. *Sky & Telescope*, 76(4):360-362, Oct. 1988.

- Lee, L.C. Toward a time-dependent magnetic reconnection model. *EOS, Transactions*, 69(49):1617-1632, Dec. 1988.
- Lee, L.C.; Kan, J.R.; Akasofu, S.-I. Ring current energy injection rate and solar wind-magnetosphere energy coupling. *Planetary Space Science*, 30(7):627-634, 1982.
- Lockwood, M.; Cowley, S.W.H.; Sandholt, P.E. Transient reconnection: Search for ionospheric signatures. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 71(20):709-724, May 1990.
- Lui, A.T.Y.; McEntire, R.W.; Krimigis, S.M. Evolution of the ring current during two geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 92(A7):7459-7470, July 1987.
- Lyons, L.R.; Williams, D.J. *Quantitative aspects of magnetospheric physics*. Boston, D. Reidel, 1984.
- McEntire, R.W.; Lui, A.T.Y.; Krimigis, S.M.; Keath, E.P. AMPTE/CCE energetic particle composition measurements during the September 4, 1984 magnetic storm. *Geophysical Research Letters*, 12(5):317-320, May 1985.
- Mendes Jr.; O. *Estudo sobre os campos elétricos plasmasféricos e suas influências sobre a dinâmica das partículas carregadas*. (Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, set. 1985. 132 p. (INPE-3849-TDL/214).
- Meyer, S.L. *Data analysis for scientists and engineers*. New York, John Wiley & Sons, 1975.

- Murayama, T. Coupling function between solar wind parameters and geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 20(3):623-629, 1982.
- Murayama, T. Coupling function between the solar wind and the Dst index. In: Kamide, Y.; Slavin, J.A., ed. *Solar wind-magnetosphere coupling*. Tokyo, Terra Scientific, 1986. p. 119-126.
- Nishida, A. *Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere*. New York, Springer-Verlag, 1978.
- _____. Critical issues in the solar wind/magnetosphere coupling and the magnetotail dynamics. In: *Cospar Plenary Meeting, 27.*, Helsinki, Finland, July 23, 1988. *Proceedings on Solar-Terrestrial Energy Program*. Urbana, SCOSTEP, University of Illinois, 1988. p. 31-51.
- Okida, R.; Tsurutani, B. *Coordinate transformation from IS(SE) to solar magnetospheric (SM)*. Pasadena, California, 1980. Comunicação pessoal a Walter Demétrio Gonzalez-Alarcon, em 15 de julho de 1980.
- Perreault, P.; Akasofu, S.-I. A study of geomagnetic storms. *Geophysics Journal of Radio-Astronomy Society*, 54:547, 1978.
- Press, W.H.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T. *Numerical Recipes The Art of Scientific Computing*. Cambridge, Cambridge University, 1988.
- Reiff, P.H. The use and misuse of statistical analyses. In: Carovillano, R.L.; Forbes, J.M. *Solar-terrestrial physics*. Dordrecht, D. Reidel, 1983. p. 493-522.
- Rostoker, G. Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 10(4):935-990, Nov. 1972.

- Russell, C.T. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic Electrodynamics*, 2(2):184-196, 1971.
- Russell, C.T.; Siscoe, G.L.; Smith, E.J. Comparison of ISEE-1 and -3 interplanetary magnetics field observations. *Geophysical Research Letters*, 7(5):381-384, May 1980.
- Schwenn, R. Transport of energy and mass to the outer boundary of the earth system. In: Cospar Plenary Meeting, 27., Helsinki, Finland, July 23, 1988. *Proceedings on Solar-Terrestrial Energy Program*. Urbana, SCOSTEP, University of Illinois, 1988. p. 13-30.
- Shelley, E.G.; Klumpar, D.M.; Peterson, W.K.; Ghielmetti, A.; Balsiger, H.; Geiss, J.; Rosenbauer, H. AMPTE/CCE observations of the plasma composition below 17 keV during the September 4, 1984 magnetic storm. *Geophysical Research Letters*, 12(5):321-324, 1985.
- Smith, E.J. Interplanetary magnetic fields. *Reviews of Geophysics And Space Physics*, 17(4):610-623, June 1979.
- Spiegel, M.R. *Manual de fórmulas e tabelas matemáticas*. [Mathematical handbook of formulas and tables (Schaum's outline series)]. Trad. de Roberto Chioccarello. São Paulo, McGraw-Hill, 1973. 270 p. (Coleção Schaum).
- Stern, D.P. A brief history of magnetospheric physics before the spaceflight era. *Reviews of Geophysics*, 27(1):103-114, Feb. 1989.
- Sugiura, M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. In: ——— *Annals of The International Geophysical Year*. New York, Pergamon Press, 1964. v. 35, part 1.
- *Results of magnetic surveys of the magnetosphere and adjacent regions*. Greenbelt, Goddard Space Flight Center, 1969. (NASAX-612-69-12).

- Sugiura, M.; Poros, D.J. **Hourly values of equatorial Dst for the year 1957 to 1970.** Maryland, Greenbelt, Goddard Space Flight Center, Laboratory For Space Physics, July 1971.
- Szuszczeuics, E.P. **Summary of ionospheric physics.** In: Butler, D.M.; Papadopoulos, K., ed. **Solar terrestrial physics: present and future.** Maryland, University of Maryland, 1984. App. c, p. 1-10. (NASA-1120).
- Tang, F.; Tsurutani, B.T.; Gonzalez, W.D.; Akasofu, S.-I.; Smith, E.J. **Solar sources of interplanetary southward Bz events responsible for major magnetic storms (1978-1979).** *Journal of Geophysical Research*, 94(A4):3535-3541, Apr. 1989.
- Toptygin, I.N. **Physical properties of the interplanetary medium.** In: ——— **Cosmic rays in interplanetary magnetic fields.** Dordrecht, D. Reidel, 1985. cap. 1, p. 1-12.
- Tsurutani, B.T.; Goldstein, B.E.; Gonzalez, W.D.; Tang, F. **Comment on "a new method of forecasting geomagnetic activity and protons showers" by A. Hewish and P. J. Duffet-Smith.** *Planetary Space Science*, 36(2):205-206, 1988a.
- Tsurutani, B.T.; Goldstein, B.E.; Smith, E.J.; Gonzalez, W.D.; Tang, F.; Akasofu, S.-I.; Anderson, R.R. **The interplanetary and solar causes of geomagnetic activity.** *Planetary Space Science*, 38(1):109-126, 1990.
- Tsurutani, B.T.; Gonzalez, W.D. **The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAS): Interplanetary Alfvén wave trains.** *Planetary Space Science*, 35(4):405-412, 1987.

- Tsurutani, B.T.; Gonzalez, W.D.; Tang, F.; Akasofu, S.-I.; Smith, E.J. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979). *Journal of Geophysical Research*, 93(A8):8519-8531, Aug. 1988b.
- Tsurutani, B.T.; Lin, R.P. Acceleration of > 47 keV ions and > 2 keV electrons by interplanetary shocks at 1 AU. *Journal of Geophysical Research*, 90(A1):1-11, Jan. 1985.
- Tsurutani, B.T.; Russell, C.T.; King, J.H.; Zwickl, R.D.; Lin, R.P. A kinky heliospheric current sheet: cause of CDAW-6 substorms. *Geophysical Research Letters*, 11(4):339-342, Apr. 1984.
- Tsurutani, B.T.; Slavin, J.A.; Kamide, Y.; Zwickl, R.D.; King, J.H.; Russell, C.T. Coupling between the solar wind and the magnetosphere: CDAW6. *Journal of Geophysical Research*, 90(A2):1191-1199, 1985.
- Vasyliunas, V.M. A method for evaluating the total magnetospheric energy output independently of the ϵ parameter. *Geophysical Research Letters*, 14(12):1183-1186, Dec. 1987.
- Villante, U.; Bruno, R.; Mariani, F.; Burlaga, L.F.; Ness, N.F. The shape and location of the sector boundary surface in the inner solar system. *Journal of Geophysical Research*, 84(A11):6641-6648, 1979.
- Williams, D.J. Ring current composition and sources: an update. *Planetary Space Science*, 29(11):1195-1203, 1981.
- _____ Ring current and radiation belts. *Reviews of Geophysics*, 25(3):570-578, Apr. 1987.
- Williams, D.J.; Sugiura, M. The AMPTE charge composition explorer and the 4-7 September 1984 geomagnetic storm. *Geophysical Research Letters*, 12(5):305-308, 1985.

- World Meteorological Organization (WMO). **Climatic change**. Geneva, 1966. 79 p. (WMO Thecnical Note, 79).
- Young, D.T. Near-equatorial magnetospheric particles from ≈ 1 eV to 1 MeV. **Reviews of Geophysics And Space Physics**, 21(2):402-418, Mar. 1983.
- Zwickl, R. **ISEE-3 Shock List**. Los Alamos, New Mexico, 1982.
Comunicação pessoal a Bruce Tsurutani, em 13 de abril de 1982.

APÊNDICE AREGISTRO MAGNÉTICO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A transcrição técnica dos dados para o sistema computacional do INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, um computador Burroughs-6800, obedeceu o detalhamento seguinte.

Os dados estavam em uma fita magnética escrita no formato ASCII com 1600 bytes por polegada. Havia um único arquivo na fita com 13272 registros. Cada registro tinha a extensão de 2529 bytes e continha 1 hora de dados (cuja resolução é de 5 minutos, exceto o índice Dst que é horário). Os dados consistiam de 21 componentes com 12 valores por hora. Os dados inexistentes foram representados pelo número 999.9. Os dados iniciaram-se no dia 228 (16/agosto) de 1978 e terminaram no dia 362 (28/dezembro) de 1979. Cada registro físico estava escrito em Fortran no formato 12(21E10.4). Há uma identificação ocupando 9 bytes antes de cada registro, contendo o número do dia, o ano e a hora, escrita em Fortran no formato I3,1X,I2,1X,I2.

A Tabela A.1 apresenta a lista das medidas experimentais, sendo que as medidas que não interessam a este trabalho estão indicadas como NSSDC e na mesma ordem em que se apresentam na fita.

TABELA A.1 - MEDIDAS EXPERIMENTAIS EM FITA MAGNÉTICA
DO PERÍODO DE 16/AGOSTO/1978 A 28/DEZEMBRO/1979

01	Dst	11	NSSDC #2	21	EPS
02	Bx(GSE)	12	NSSDC #3		
03	By(GSE)	13	Dens. H		
04	Bz(GSE)	14	Veloc. V		
05	B	15	NSSDC #6		
06	Theta(GSE)	16	Temp. H		
07	Phi(GSE)	17	NSSDC #8		
08	EPS Parcial	18	NSSDC #9		
09	AE	19	Dens. HE		
10	NSSDC #1	20	NSSDC #11		

OBS.: Sequência das medidas na fita.

APÊNDICE BTRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS DO SISTEMA SOL-ECLÍPTICA
PARA O SISTEMA SOL-MAGNETOSFERA

Neste apêndice apresenta-se um formalismo sucinto de transformações entre sistemas cartesianos ortogonais e a sua aplicação para a transformação do sistema referencial da Eclíptica para o sistema da magnetosfera.

B.1 - TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS CARTESIANOS ORTOGONAIS

Sejam 2 sistemas cartesianos ortogonais S e S', onde e_i e e'_i são, respectivamente, seus vetores-base. Um vetor qualquer pode ser descrito, nesses sistemas, na forma seguinte:

$$V = V_i e_i = V'_j e'_j \quad (B.1)$$

Supõe-se que os vetores-base de um sistema podem ser expressos através dos vetores-base do outro, isto é:

$$e'_j = G_{ij} e_i \quad (B.2)$$

o que permite definir, no formalismo de matrizes, uma matriz de transformação de sistemas referenciais G. Assim:

$$\begin{pmatrix} e' \end{pmatrix} = \tilde{G} \begin{pmatrix} e \end{pmatrix} \quad (B.3)$$

O desenvolvimento adiante permite determinar a relação de transformação de coordenadas de um sistema para as coordenadas do outro sistema. A partir das Equações B.1 e B.2, obtém-se:

$$V_i e_i = V'_j G_{ij} e_i \quad (B.4)$$

que implica:

$$V_i = V'_j G_{ij} = G_{ij} V'_j . \quad (\text{B.5})$$

Admitindo a existência de uma transformação inversa G^{-1} , escreve-se:

$$\left(G^{-1}\right)_{ki} V_i = \left(G^{-1}\right)_{ki} G_{ij} V'_j \quad (\text{B.6})$$

$$\left(G^{-1}\right)_{ki} V_i = \left(G^{-1}G\right)_{kj} V'_j \quad (\text{B.7})$$

$$\left(G^{-1}\right)_{ki} V_i = I_{kj} V'_j \quad (\text{B.8})$$

$$\left(G^{-1}\right)_{ki} V_i = \delta_{kj} V'_j \quad (\text{B.9})$$

$$V'_j = \left(G^{-1}\right)_{ji} V_i , \quad (\text{B.10})$$

que é escrita na forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} V' \end{pmatrix} = G^{-1} \begin{pmatrix} V \end{pmatrix} . \quad (\text{B.11})$$

Contudo, para transformações envolvendo vetores-base ortogonais e unitários, é válida a identidade entre as matrizes inversa e transposta:

$$G^{-1} = \tilde{G} , \quad (\text{B.12})$$

que implica a seguinte relação de transformação de coordenadas de um sistema para o outro:

$$\begin{pmatrix} V' \end{pmatrix} = \tilde{G} \begin{pmatrix} V \end{pmatrix} . \quad (\text{B.13})$$

B.2 - TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA SOL-ECLÍPTICA PARA O SISTEMA SOL-MAGNETOSFERA

A partir da análise da secção anterior, determina-se a seguir a transformação de coordenadas do sistema referencial da Eclíptica (GSE) para o sistema referencial da magnetosfera (GSM). A transformação é obtida através de 3 etapas:

1) Passagem do sistema GSE para um sistema inercial GI com o eixo Z_I paralelo ao eixo de rotação da Terra e, no apogeu da Terra relativo ao Sol, o eixo Y_I é paralelo ao eixo Y_{GSE} , isto é, aponta no sentido contrário do movimento orbital da Terra. A Figura B.1 apresenta os sistemas GSE e GI. Assim, considerando os vetores-base, têm-se:

$$X_I = \cos\alpha \cos\varphi X_{SE} - \cos\alpha \sin\varphi Y_{SE} - \sin\alpha Z_{SE}, \quad (B.14)$$

$$Y_I = \sin\varphi X_{SE} + \cos\varphi Y_{SE}, \quad (B.15)$$

e

$$Z_I = \sin\alpha \cos\varphi X_{SE} - \sin\alpha \sin\varphi Y_{SE} + \cos\alpha Z_{SE}, \quad (B.16)$$

onde α ($=23,47^\circ$) é o ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra relativo à normal à Eclíptica e φ é um ângulo associado à rotação em torno do Sol ($\varphi = \Omega T_1$, onde a magnitude de rotação na órbita Ω é $2\pi/365,25$ dias e T_1 é o dia do ano).

Pelo formalismo de matrizes:

$$\begin{pmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{pmatrix} = \tilde{G} \begin{pmatrix} X_{SE} \\ Y_{SE} \\ Z_{SE} \end{pmatrix}, \quad (B.17)$$

com:

$$G = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\varphi & \sin\varphi & \sin\alpha \cos\varphi \\ -\cos\alpha \sin\varphi & \cos\varphi & -\sin\alpha \cos\varphi \\ -\sin\alpha & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (B.18)$$

A transformação de coordenadas é dada por:

$$\begin{pmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{pmatrix} = \tilde{G} \begin{pmatrix} X_{GSE} \\ Y_{GSE} \\ Z_{GSE} \end{pmatrix} \quad (B.19)$$

$$\begin{pmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{pmatrix} = G^{-1} \begin{pmatrix} X_{GSE} \\ Y_{GSE} \\ Z_{GSE} \end{pmatrix} \quad (B.20)$$

$$\begin{pmatrix} X_{GSE} \\ Y_{GSE} \\ Z_{GSE} \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{pmatrix}. \quad (B.21)$$

2) O dipolo magnético da Terra D descrito no sistema inercial GI (Figura B.2) é:

$$D = \sin\beta \cos\theta X_I + \sin\beta \sin\theta Y_I + \cos\beta Z_I, \quad (B.22)$$

sendo que β ($=11,435^\circ$) é o ângulo de inclinação do dipolo geomagnético relativo ao eixo de rotação da Terra, que está localizado em Thule, Greenland, $69,761^\circ$ a oeste de Greenwich, e o ângulo θ está associado ao período sideral de rotação da Terra. Esse dipolo D descrito no sistema GSE é:

$$D = \begin{pmatrix} \cos\alpha \sin\beta \cos\varphi \cos\theta + \sin\beta \sin\varphi \sin\theta + \sin\alpha \cos\beta \cos\varphi \\ -\cos\alpha \sin\beta \sin\varphi \cos\theta + \sin\beta \cos\varphi \sin\theta - \sin\alpha \cos\beta \sin\varphi \\ -\sin\alpha \sin\beta \cos\theta + \cos\alpha \cos\beta \end{pmatrix}. \quad (B.23)$$

Para facilidade algébrica, renomear-se-á como:

$$D = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} . \quad (\text{B.24})$$

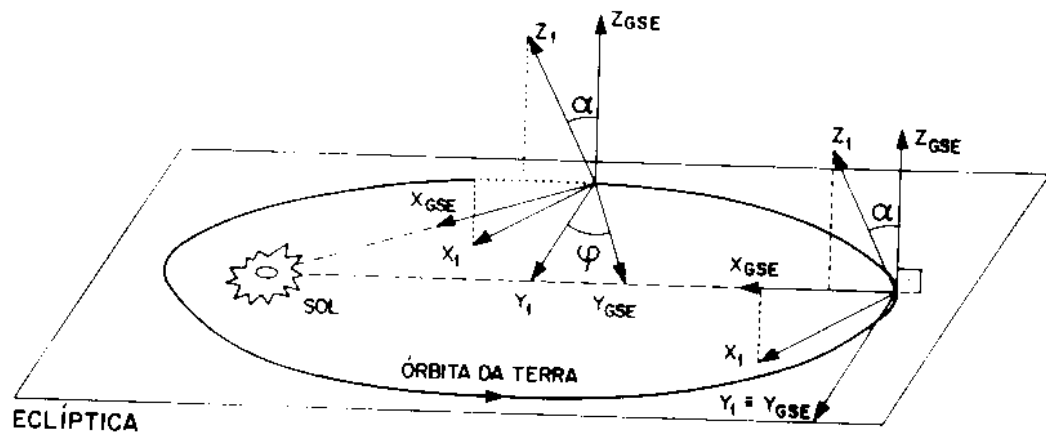


Fig. B.1 - Representação do sistema de coordenadas Sol-Eclíptica (GSE) e de um sistema inercial (GI) e a sua interrelação.

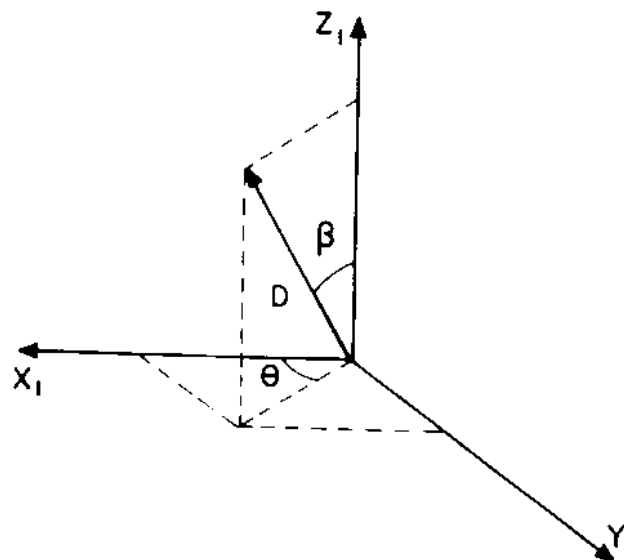


Fig. B.2 - Dipolo magnético da Terra, D, representado em um sistema inercial GI.

3) Para a determinação da transformação propriamente dita, encontram-se os vetores-base do sistema GSM relativos ao sistema GSE. A Figura B.3 mostra a relação geométrica entre os 2 sistemas. Por definição, os vetores-base na direção X são coincidentes, isto é:

$$X_{GSM} = X_{GSE} . \quad (B.25)$$

O vetor-base na direção Y, como definido, é dado por:

$$Y_{GSM} = \frac{D_{GSE} \times X_{GSE}}{|D_{GSE} \times X_{GSE}|} , \quad (B.26)$$

que resulta em:

$$Y_{GSM} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \\ \frac{-B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \end{pmatrix} . \quad (B.27)$$

Pela regra da mão direita, obtém-se:

$$Z_{GSM} = \frac{X_{GSE} \times Y_{GSE}}{|X_{GSE} \times Y_{GSE}|} , \quad (B.28)$$

que resulta em:

$$Z_{GSM} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \\ \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \end{pmatrix} \quad (B.29)$$

Esses resultados implicam a seguinte transformação:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} & \frac{B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \\ 0 & \frac{-B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} & \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \end{pmatrix} \quad (B.30)$$

Desta maneira, no formalismo de matrizes, as coordenadas do sistema GSE são dadas em coordenadas do sistema GSM através da relação:

$$\begin{pmatrix} X_{GSM} \\ Y_{GSM} \\ Z_{GSM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} & \frac{-B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \\ 0 & \frac{B}{(B^2 + C^2)^{1/2}} & \frac{C}{(B^2 + C^2)^{1/2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{GSE} \\ Y_{GSE} \\ Z_{GSE} \end{pmatrix} \quad (B.31)$$

onde:

$$B = -\cos\alpha \sin\beta \sin\varphi \sin\theta + \sin\beta \cos\varphi \sin\theta - \sin\alpha \cos\beta \sin\varphi \quad (\text{B.32})$$

e

$$C = -\sin\alpha \sin\beta \cos\theta + \cos\alpha \cos\beta, \quad (\text{B.33})$$

com: $\alpha = 23,47^\circ$ (inclinação do eixo de rotação da terra em relação à normal à Eclíptica) e $\beta = 11,435^\circ$ (inclinação do dipolo centrado com relação ao eixo da Terra), e os ângulos de fases corretos, obtidos de comunicação pessoal com Okida e Tsurutani (1980):
 $\varphi = 360^\circ/365,25\text{dias} \times T1 - 169,77^\circ$, onde $T1$ é o dia do ano, e
 $\theta = (360^\circ/24\text{horas} \times T2 - 249,76^\circ) + (360^\circ/365,25\text{dias} \times T1 - 169,77^\circ)$, onde $T2$ é o tempo universal.

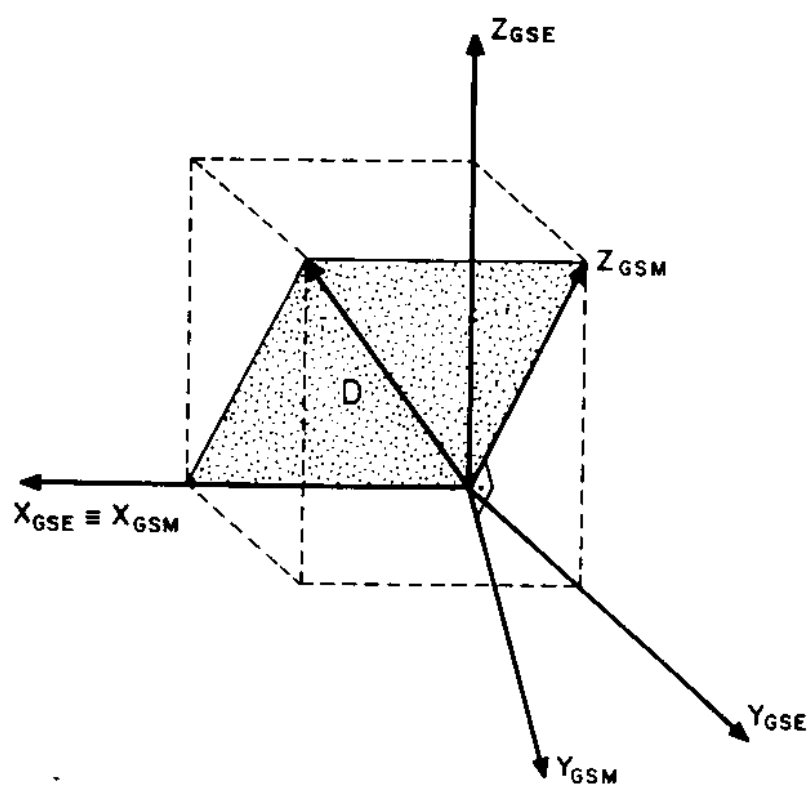


Fig. B.3 - Relação entre os sistemas referenciais da Eclíptica (GSE) e da magnetosfera (GSM), onde está representado o dipolo magnético da Terra, D .

APÊNDICE CROTEIRO DOS CÁLCULOS COMPUTACIONAIS

Neste apêndice são apresentados os cálculos a serem efetuados no Computador Burroughs-6800 do INPE, fornecendo tabelas e gráficos pertinentes ao estudo do desenvolvimento da fase principal de uma tempestade geomagnética.

Na Figura C.1 apresenta-se esquematicamente o roteiro do cálculo completo e que terão as suas partes e funcionamento descritas adiante.

Define-se um evento para estudo completo através do estabelecimento do intervalo de dois dias que contenham o evento de tempestade. A identificação é codificada como M.#(MM/D1TOD2/YYYY), onde M.# refere-se ao evento de tempestade moderada, MM é o mês, D1 é o primeiro dia e D2 o segundo dia (de 1 a 365) do intervalo e YYYY é o ano.

Os programas de computador são:

RUN/READ
READ/TAPE
PROCESS/INTERPLDATA
INTERPOL/SMOOTH/AVERAGE
COMPUTE/F
COMPUTE/AVERAGE/Q
RUN/C/F/C
COMPUTE/F/COMPLETE
RUN/C/C
CORRELATE/COMPLETE
CORRELATE

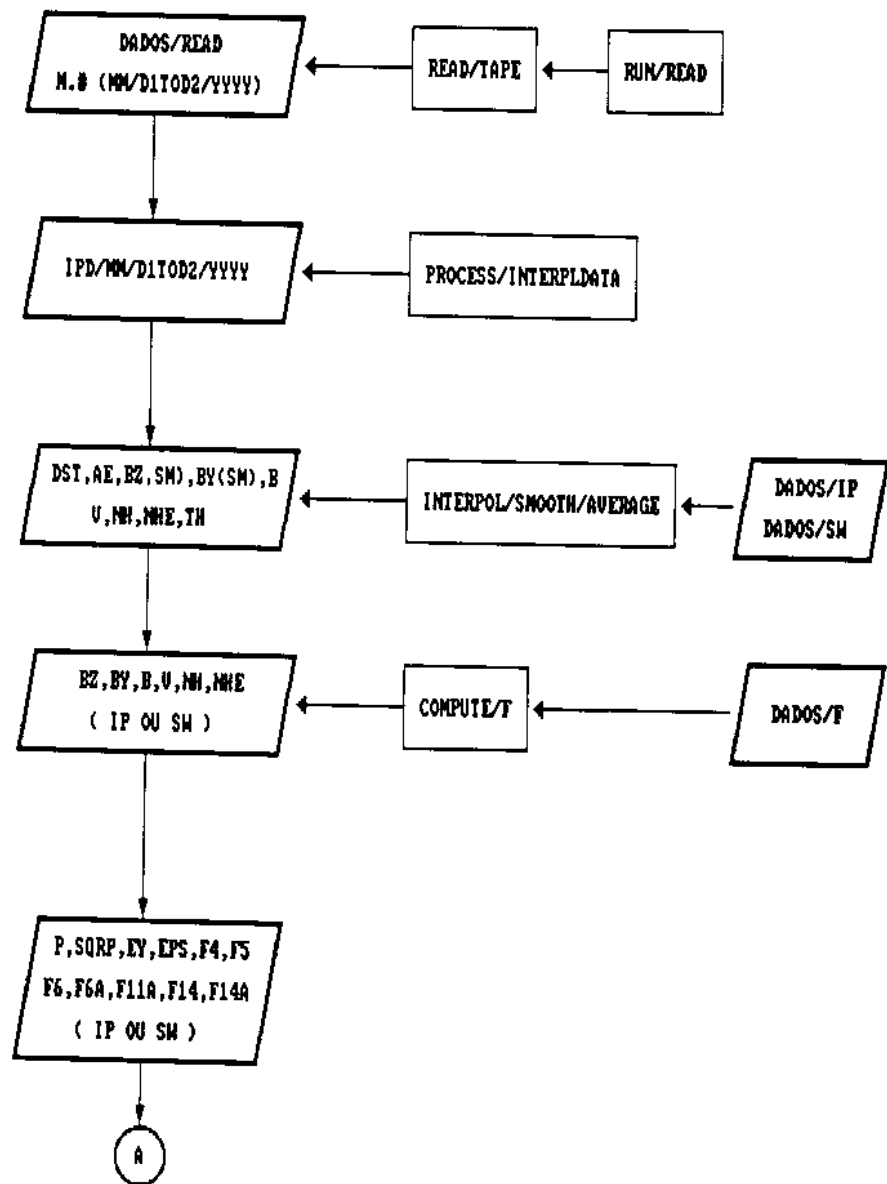


Fig. C.1 - Fluxograma em que se indicam os programas de computador, os arquivos de dados sobre o qual agem e os arquivos de dados resultantes. M.# identifica o evento de tempestade e MM/D1TOD2/YYYY é Mês/1ºDia e 2ºDia/Ano, estabelecendo o intervalo de dados utilizados.

(continua)

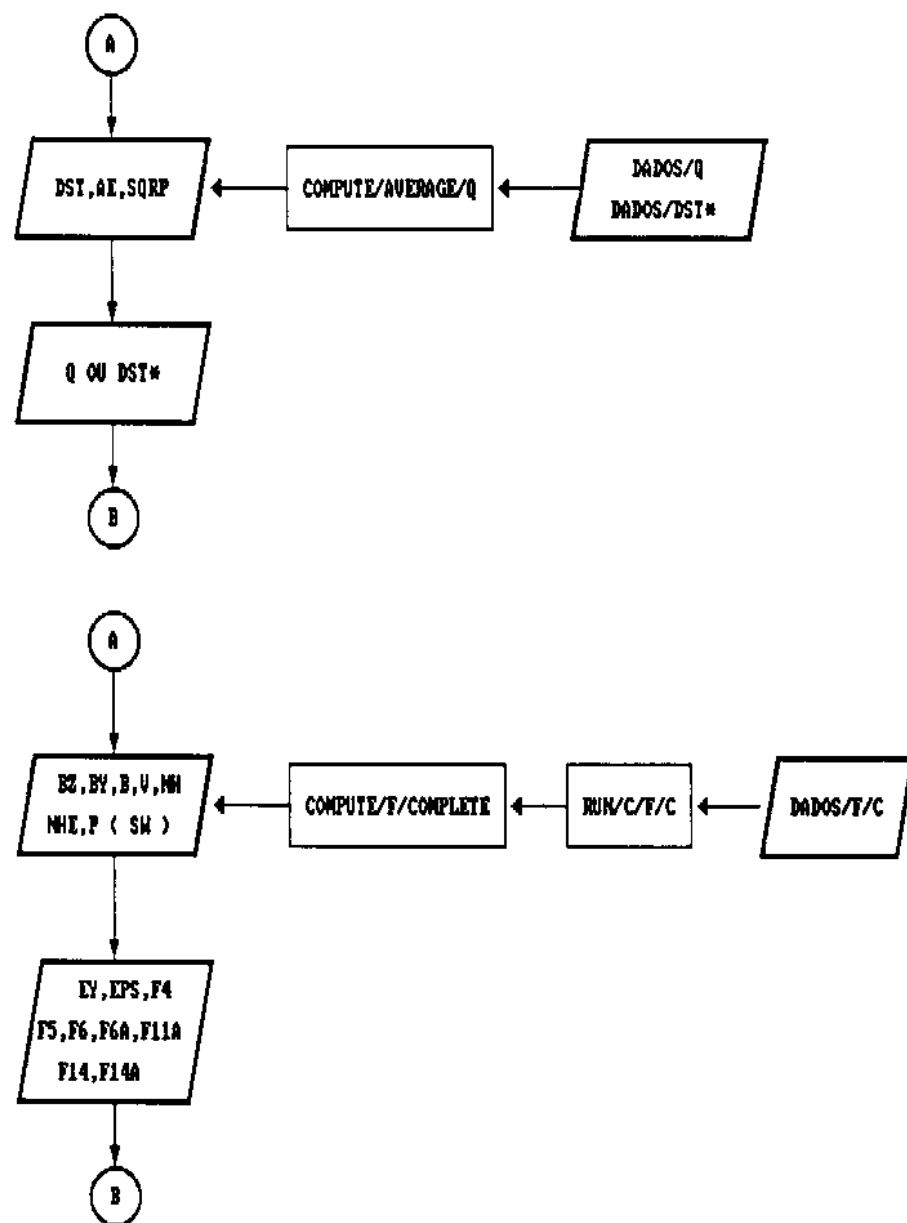


Fig. C.1 - Continuação.

(continua)

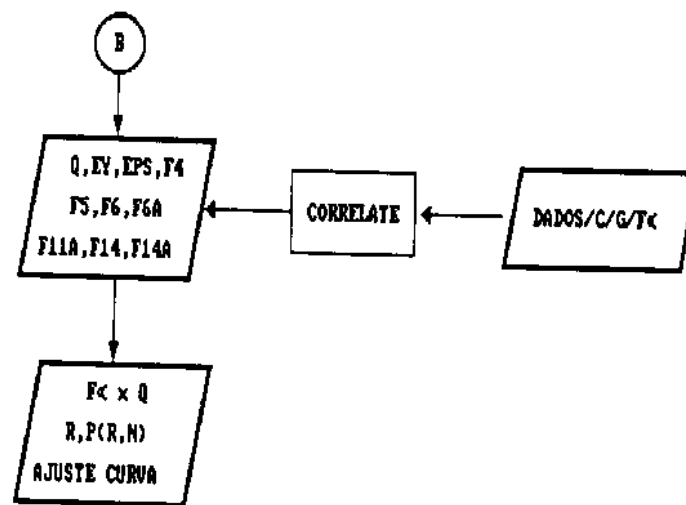


Fig. C.1 - Conclusão.

Os arquivos dos dados de entrada pelo operador são:

DADOS/READ
IPD/MM/D1TOD2/YYYY
DADOS/IP
DADOS/SW
DADOS/F
DADOS/Q
DADOS/DST*
DADOS/F/C
DADOS/C/C
DADOS/C/G/F α

As fitas magnéticas de armazenamento dos programas são: FE0330 e FU3309. As fitas com os dados originais do satélite ISEE-3 são: FE0245, FE0960, FE0813 e FU0795. As fitas com arquivos de dados já separados para cada evento são: FE0543 e FU3308.

Quanto ao fluxograma, informa-se a seguir o que fazem os programas e o que contém os arquivos de dados de entrada.

READ/TAPE - É ativado pelo job RUN/READ, utilizando arquivo DADOS/READ. A partir da fita contendo todos os dados do satélite ISEE-3, esse programa cria um arquivo de dados para um intervalo temporal definido (IPD/MM/D1TOD2/YY). O IPD contém todos os parâmetros básicos.

DADOS/READ	
100 T	← TRUE para listar IPD
200 D1 MM YYYY	← dia do início do intervalo
300 D2 MM YYYY	← dia do fim do intervalo
400 FFFFFFFF	← código da fita acessada
500 IPD/MM/D1TOM2/YY.	← Dados do período escolhido

PROCESS/INTERPLDATA/DATA - Lê os dados do arquivo IPD, converte o campo magnético interplanetário do sistema referencial da Eclíptica para o sistema da magnetosfera, separa os dados em arquivos distintos, traça gráfico e fornece tabela dos dados básicos (Dst ,AE , B, Bz, By, NH, NHE, V e TH).

INTERPOL/SMOOTH/AVERAGE - Interpola, utilizando os DADOS/IP, e/ou suaviza por média móvel (ponderada ou não), utilizando DADOS/SW, as grandezas físicas.

DADOS/IP (Exemplo com Bz:)

100 BZ/MM/D1TOD2/YY.	← arquivo de entrada
200 BZ/IS/MM/D1TOD2/YY.	← arquivo de saída
300 D1,D2	← dias absolutos do intervalo ($1 \leq D \leq 365$)
400 T	← TRUE para interpolar
500 F	← TRUE para suavizar
600 BZ	← Título (Formato A6)
700 NT	← Unidades (Formato A6)
800 T	← TRUE para traçar gráfico
900 Bz	← Título (Formato A6)
1000 (nT)	← Unidade (Formato A6)
1100 2,4	← N° caracteres título/unidade
1200 -20,20	← Limite mínimo e máximo
1300 4,0	← N° intervalos na ordenada (zero fixo)
1400 -20,20,10	← Mínimo, Máximo e numeração intervalo
1500 1	← N° da cor da pena
1600 #gaps	← N° lacunas nos dados
1700 I1,I2	← Indicadores das lacunas (aos pares)
1800 #W	← N° de pontos na promediação
1900 T	← TRUE para promediação ponderada
2000 W0,W1,...,W1	← Coeficientes de ponderação
2100 F	← FALSE para conservar N° pontos originais

COMPUTE/F - Utilizando DADOS/F, calcula, traça gráfico e fornece a tabela das funções: P, SQRP, BZ, EY, EPS, F4, F5, F6, F6A, F11A, F14 e F14A. Os indicadores de lacuna podem ser obtidos imediatamente dessas tabelas.

DADOS/F (Exemplo com P:)

100 BY/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada (Grandezas fixas)
200 BZ/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
300 B/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
400 NH/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
500 NHE/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
600 V/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
700 P/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de saída
800 D1,D2	← Dias que definem o intervalo
900 T	← TRUE para traçar gráfico
1000 P	← Nome da função calculada

COMPUTE/AVERAGE/Q - Utilizando os arquivos DADOS/Q ou DADOS/DST, calcula, traça gráfico e fornece a tabela da função Q e/ou do índice Dst*.

DADOS/Q

100 DST/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
200 SQRP/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
300 Q/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de saída
400 2	← N° de dias do intervalo
500 DST1,DST2,DST3	← Domínio do Dst (Ex.: -50, -120, -150 nT)
600 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$	← τ em ordem decrescente (Ex.: 0.25, 0.25, 0.5, 4.0h - Gonzalez et al., 1988)
700 $\delta t, \Delta T_1$	← Intervalo temporal entre as medidas (min), intervalo entre $P^{1/2}$ e Dst (min)
800 T	← TRUE para traçar gráfico
900 D1	← 1° dia (valor absoluto: $1 \leq D \leq 365$)
1000 1,0.0	← D1, tempo de início (h.min)
1100 2,23.55	← D2, tempo do fim (h.min)

1200	Q _{MÍN} ,Q _{MÁX}	← Valores mínimos e máximos da função Q
1300	#INT,0	← N ^o de intervalos na ordenada, zero fixo
1400	Q _{MÍN} ,Q _{MÁX} ,ΔQ	← Q _{MÍN} ,Q _{MÁX} , numeração de intervalos (≠0)

DADOS/DST

100 DST/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada
200 SQRP/IS/MM/D1TOD2/YY.	← arquivo de entrada
300 DSTC/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de saída
400 2	← N ^o de dias do intervalo
500 DST*	← Título
600 $\delta t, \Delta T_1$	← Intervalo temporal entre as medidas (min), intervalo entre $P^{1/2}$ e Dst (min)
700 T	← TRUE para traçar gráfico
800 D1	← 1 ^o dia (valor absoluto: $1 \leq D \leq 365$)
900 1,0.0	← D1, tempo de início (h.min)
1000 2,23.55	← D2, tempo de fim (h.min)
1100 -200,50	← Valores mínimos e máximos do Dst*
1200 5,0	← N ^o de intervalos na ordenada (zero fixo)
1300 -200,50,50	← Valor mínimo, valor máximo, numeração do intervalo

COMPUTE/F/COMPLETE - É ativado pelo job RUN/C/F/C, utilizando o arquivo DADOS/F/C. Calcula, cria arquivos e traça gráfico das funções de acoplamento energético na magnetopausa.

DADOS/F/C

```

100 BY/IS/MM/D1TOD2/YY.      ← Arquivos de entrada (dados primários:)
200 BZ/IS/MM/D1TOD2/YY.
300 B/IS/MM/D1TOD2/YY.
400 NH/IS/MM/D1TOD2/YY.
500 NHE/IS/MM/D1TOD2/YY.
600 V/IS/MM/D1TOD2/YY.
700 F/EY/IS/MM/D1TOD2/YY.    ← Arquivos de saída (Funções Fa:)
800 F/EPS/IS/MM/D1TOD2/YY.

```

900 F/F3/IS/MM/D1TOD2/YY.
1000 F/F4/IS/MM/D1TOD2/YY.
1100 F/F5/IS/MM/D1TOD2/YY.
1200 F/F6/IS/MM/D1TOD2/YY.
1300 F/F6A/IS/MM/D1TOD2/YY.
1400 F/F6B/IS/MM/D1TOD2/YY.
1500 F/F7/IS/MM/D1TOD2/YY.
1600 F/F8/IS/MM/D1TOD2/YY.
1700 F/F9/IS/MM/D1TOD2/YY.
1800 F/F10/IS/MM/D1TOD2/YY.
1900 F/F11/IS/MM/D1TOD2/YY.
2000 F/F11A/IS/MM/D1TOD2/YY.
2100 F/F12//IS/MM/D1TOD2/YY.
2200 F/F12A/IS/MM/D1TOD2/YY.
2300 F/F12B/IS/MM/D1TOD2/YY.
2400 F/F12C/IS/MM/D1TOD2/YY.
2500 F/F12D/IS/MM/D1TOD2/YY.
2600 F/F12E/IS/MM/D1TOD2/YY.
2700 F/F12F/IS/MM/D1TOD2/YY.
2800 F/F13/IS/MM/D1TOD2/YY.
2900 F/F14/IS/MM/D1TOD2/YY.
3000 F/F14A/IS/MM/D1TOD2/YY.
3100 F/F15/IS/MM/D1TOD2/YY.
3200 F/F16/IS/MM/D1TOD2/YY.
3300 F/F17/IS/MM/D1TOD2/YY.
3400 F/F18/IS/MM/D1TOD2/YY.
3500 D1,D2 ← dia do início, dia do fim
3600 F ← TRUE para traçar gráfico

CORRELATE - Utilizando o arquivo DADOS/C/G/F α , traça o gráfico Q (ou AE) versus F α , calcula a correlação cruzada da função Q ou AE com a função F α especificada, fornece tabela das medidas correlacionadas, fornece a tabela da correlação, significância da correlação e ajuste linear.

DADOS/C/G/F α (Exemplo com Q x F α :)

100 Q/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada (Q ou AE)
200 F/EY/IS/MM/D1TOD2/YY.	← Arquivo de entrada (F α :)
300 Q	← Função Q ou AE
400 EY	← Função F α de acoplamento
500 d1,T1	← dia 1 ou 2, início da tempestade (h.min)
600 d2,T2	← dia 1 ou 2, fim da tempestade (h.min)
700 #T	← N ^o de defasagens temporais de Q (ou AE) com F α
800 L1,L2,...	← Defasagens temporais (min)
900 ...,L#T	
1000 T	← TRUE para traçar gráfico
1100 0,30,6	← F α MÍN, F α MÁX, N ^o de marcas na abcissa
1200 0,-300,6	← QMÁX, QMÍN, N ^o de marcas na ordenada
1300 0,30,3	← F α MÍN, F α MÁX, numeração na abcissa
1400 0,-300,3	← QMÁX, QMÍN, numeração na ordenada
1500 EY	← Título de F α
1600 (mV/m)	← Unidade de F α
1700 2,6	← N ^o de caracteres do Título e da Unidade
1800 Q	← Título Q ou AE
1900 (nT/h)	← Unidade Q ou AE
2000 1,6	← N ^o de caracteres do Título e da Unidade
2100 Bz<0	← Rótulo da região de BZ negativo
2200 Bz>0	← Rótulo da região de BZ positivo
2300 4,4	← N ^o de caracteres dos rótulos
2400 T	← TRUE para listar dados em tabela
2500 EY	← Título de F α
2600 Q	← Título Q ou AE

APÊNDICE DOS ÍNDICES DST E AE E OS PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS

Este apêndice apresenta os eventos de tempestade geomagnética moderada ($-110 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -47 \text{ nT}$) ocorridos no período de agosto de 1978 a dezembro de 1979. As tempestades são indicadas pelo decréscimo no índice Dst. Os eventos são definidos como as tempestades moderadas com $\text{Dst}_{\text{inicial}} \geq -12 \text{ nT}$. Para facilitar a identificação, as tempestades são denominadas M.#, onde M significa moderada e # é um número seqüencial.

As Figuras D.1a até D.21a apresentam, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; o índice auroral AE; e os parâmetros interplanetários obtidos pelo satélite ISEE-3: as componentes no sistema Sol-Eclíptica B_z^* e B_y^* do campo magnético interplanetário e a sua magnitude B; a densidade numérica n; a velocidade V; e a temperatura T do plasma do vento solar, onde H designa o hidrogênio e He é o hélio.

As Figuras D.1b até D.21b apresentam, em tempo Universal, as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica). De 0 a 180 graus, afastando-se do Sol; de 0 a -180 graus, orientado para o Sol.

As Figuras D.22 e D.23 apresentam, em tempo universal, o índice de atividade geomagnética Dst, as componentes no sistema da magnetosfera B_z , B_y e B_x do campo magnético interplanetário; e também a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

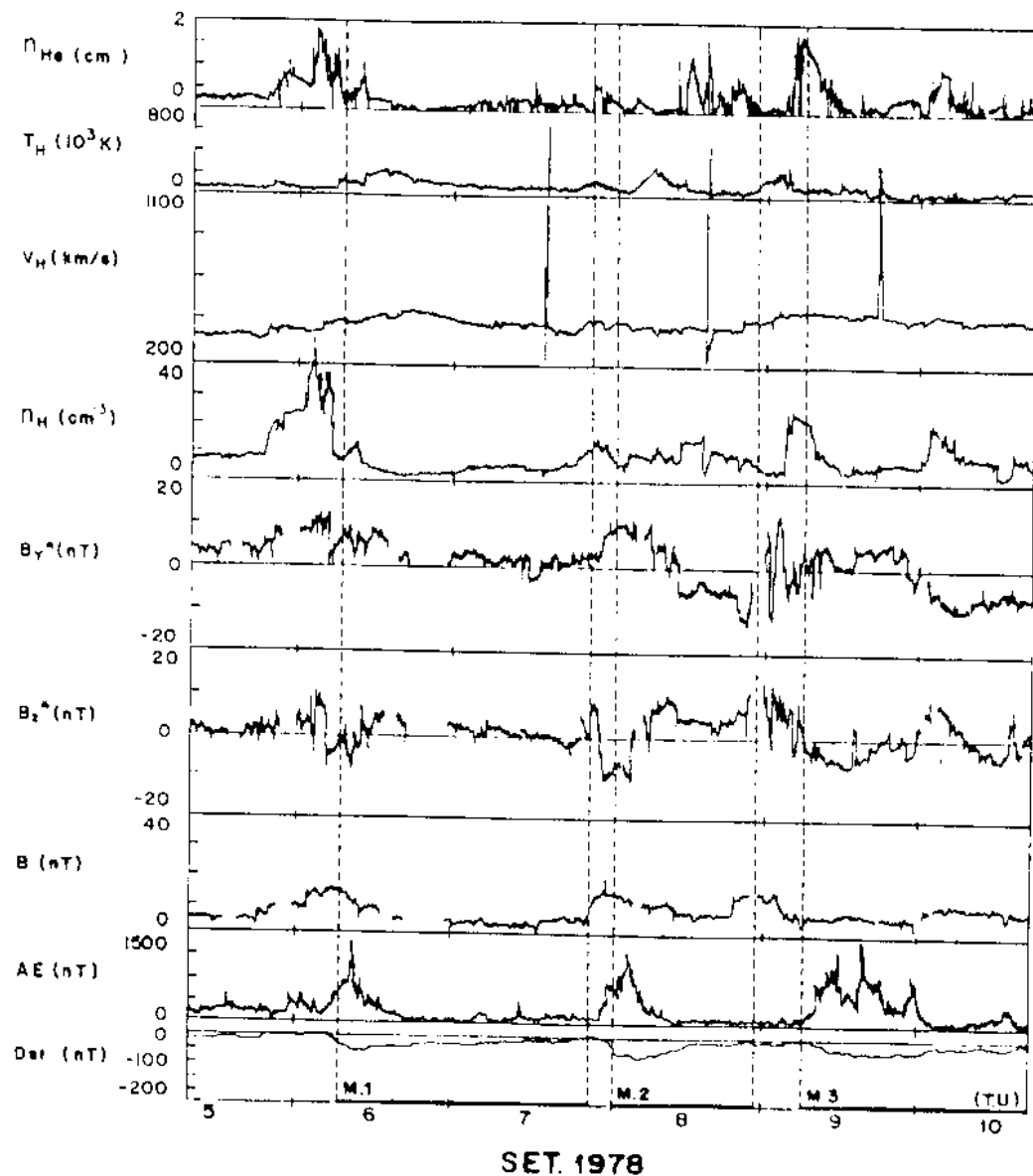


Fig. D.1a - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; o índice auroral AE; e os parâmetros interplanetários obtidos pelo satélite ISEE-3: as componentes no sistema Sol-Eclíptica B_z^* e B_y^* do campo magnético interplanetário e a sua magnitude B ; a densidade numérica n ; a velocidade V ; e a temperatura T do plasma do vento solar, onde H é o hidrogênio e He é o hélio. Os eventos de tempestade geomagnética moderada são denominados M.1, M.2 e M.3; indicados pelos tracejados verticais.

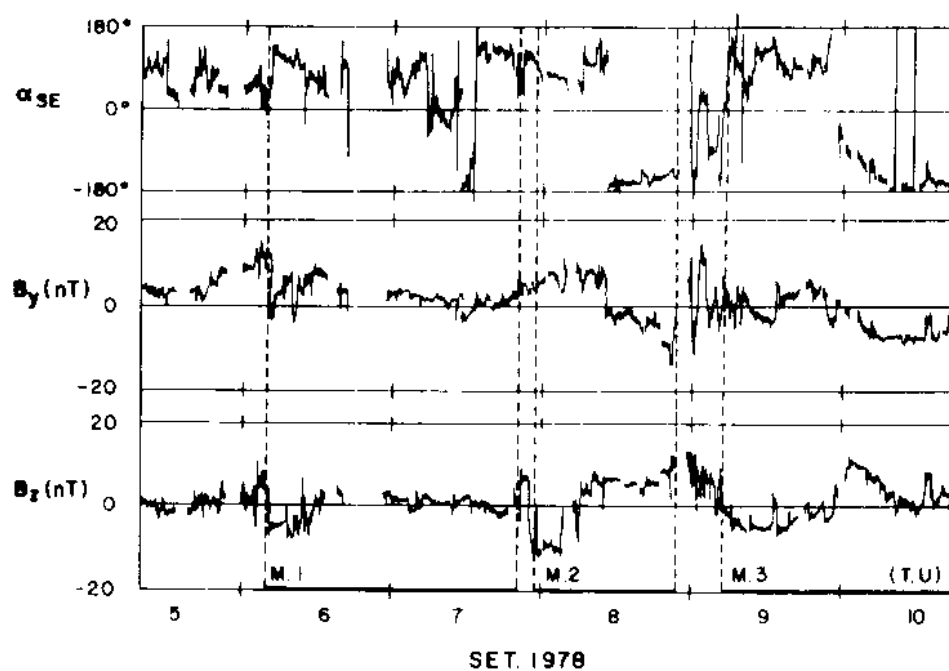


Fig. D.1b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica). De 0 a 180 graus, afastando-se do Sol; de 0 a -180 graus, orientado para o Sol. Os períodos dos eventos de tempestade geomagnética moderada estão indicados pelos tracejados verticais. Os eventos de tempestade geomagnética moderada são denominados M.1, M.2 e M.3; indicados pelos tracejados verticais.

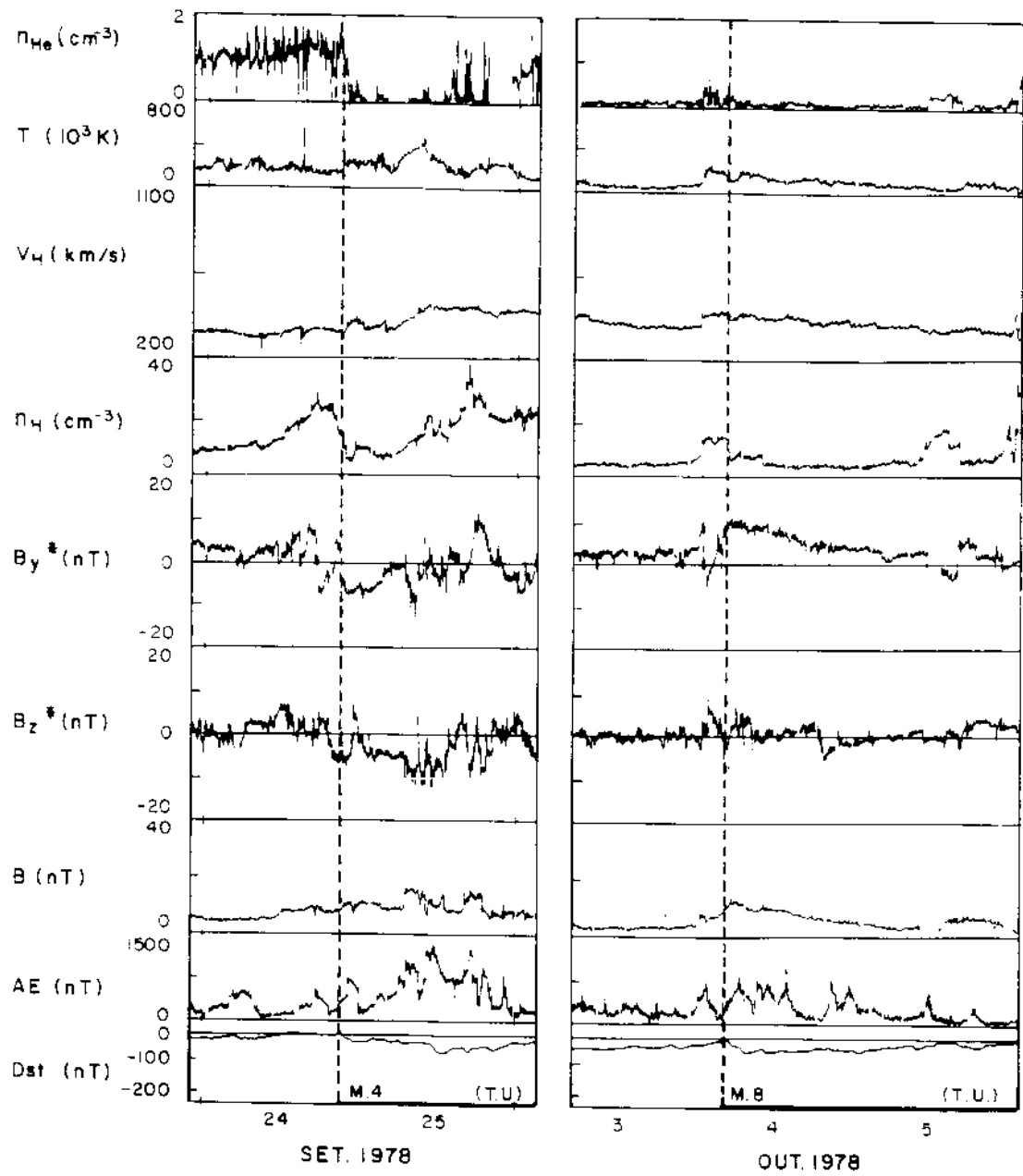


Fig. D.2a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.4 e M.8.

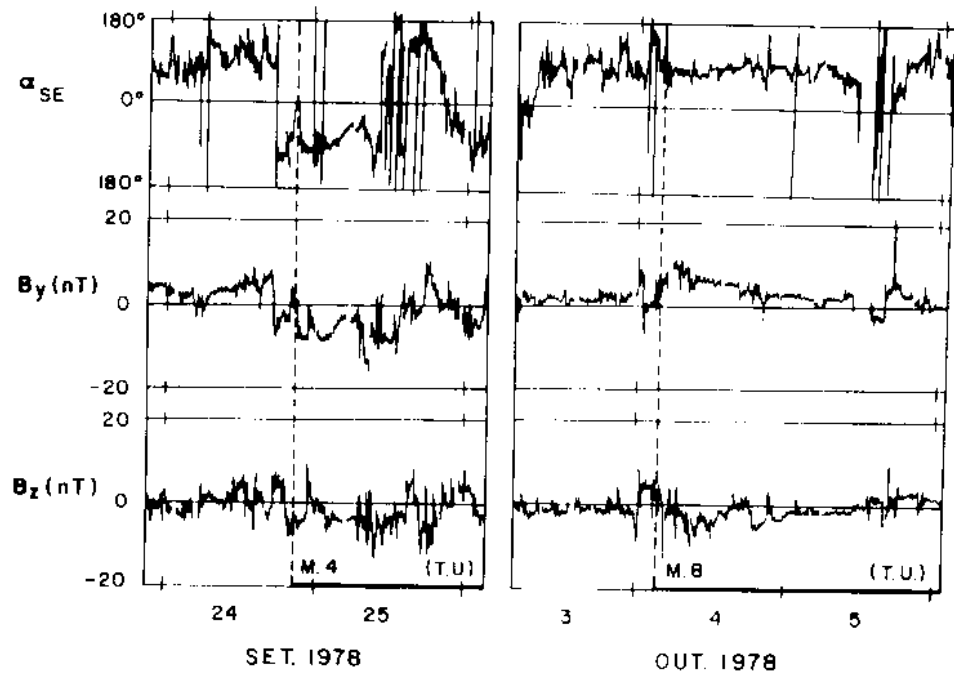


Fig. D.2b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

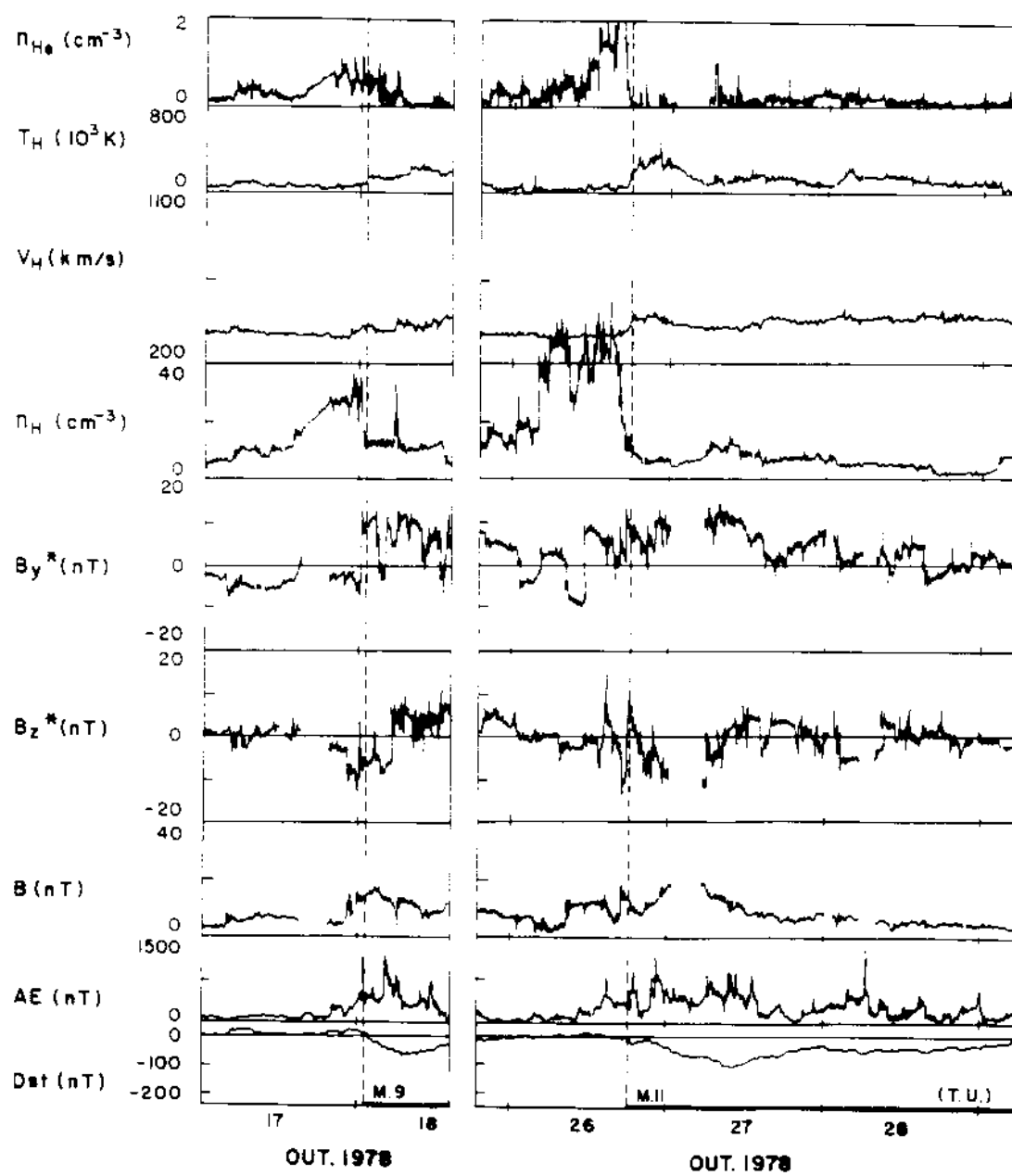


Fig. D.3a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.9 e M.11.

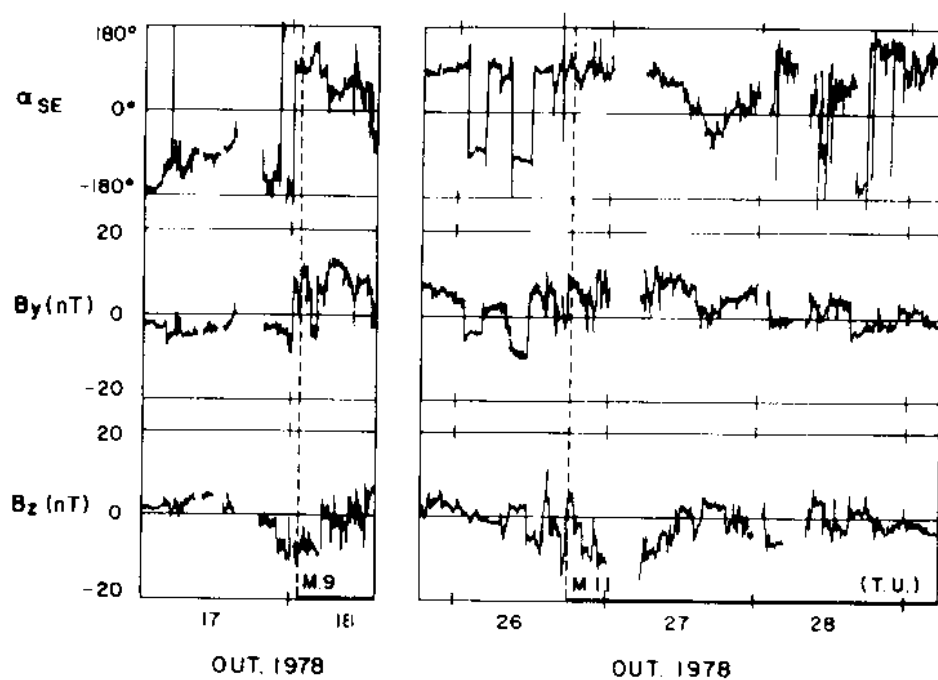


Fig. D.3b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

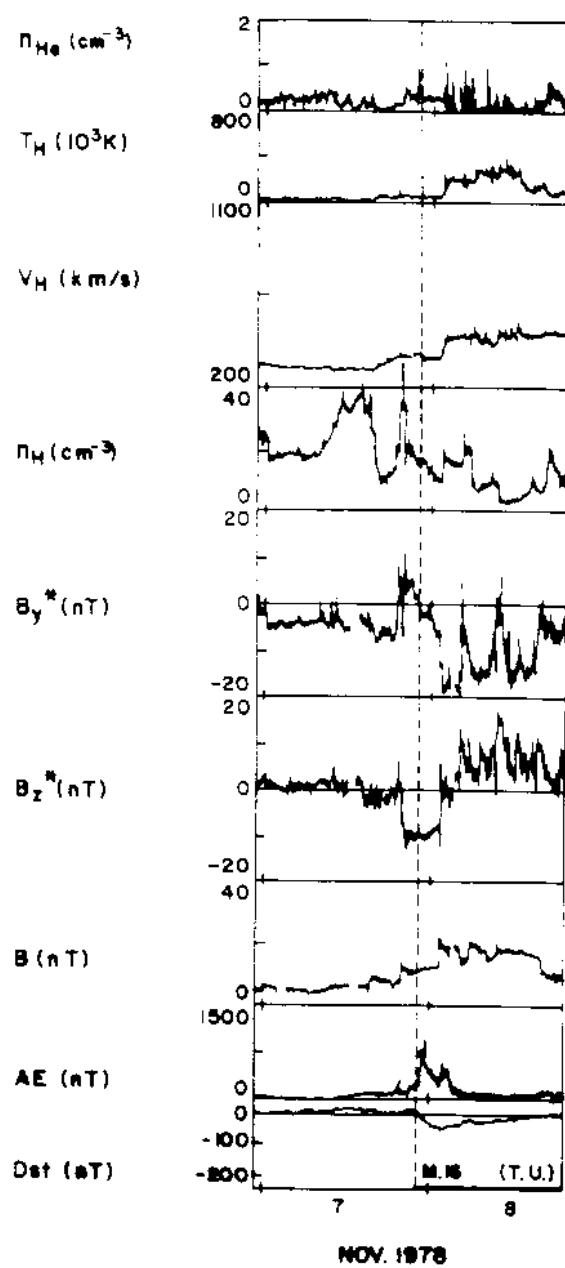


Fig. D.4a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.16.

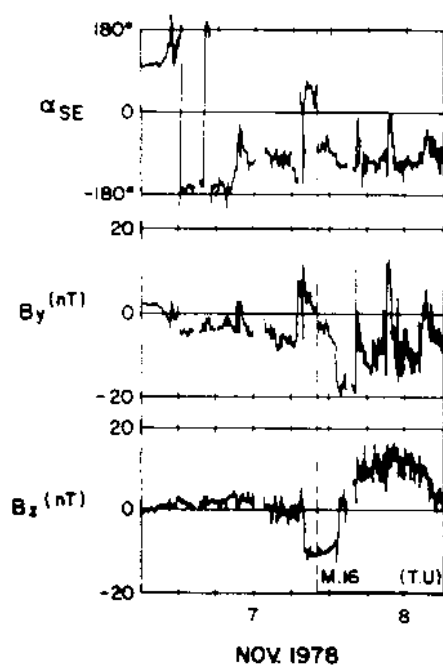


Fig. D.4b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

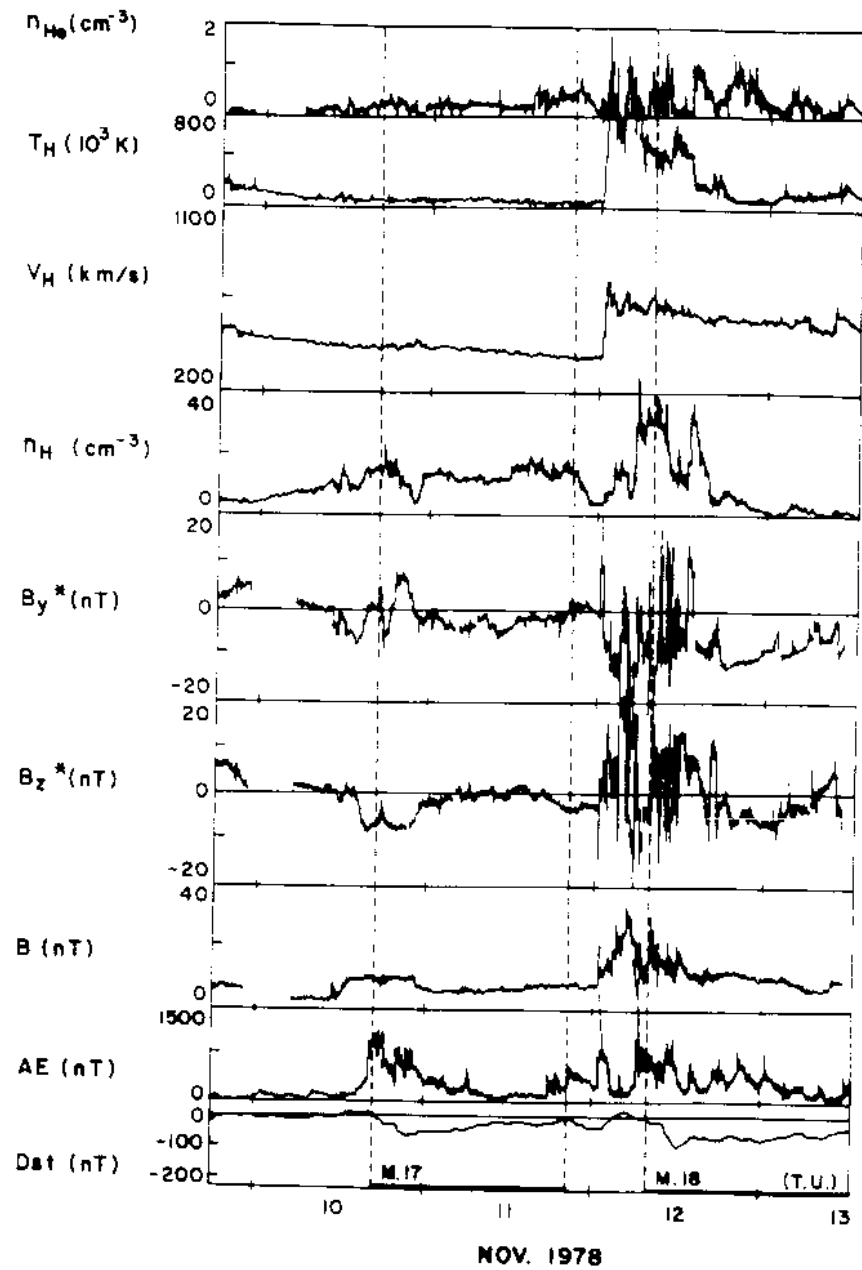


Fig. D.5a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.17 e M.18.

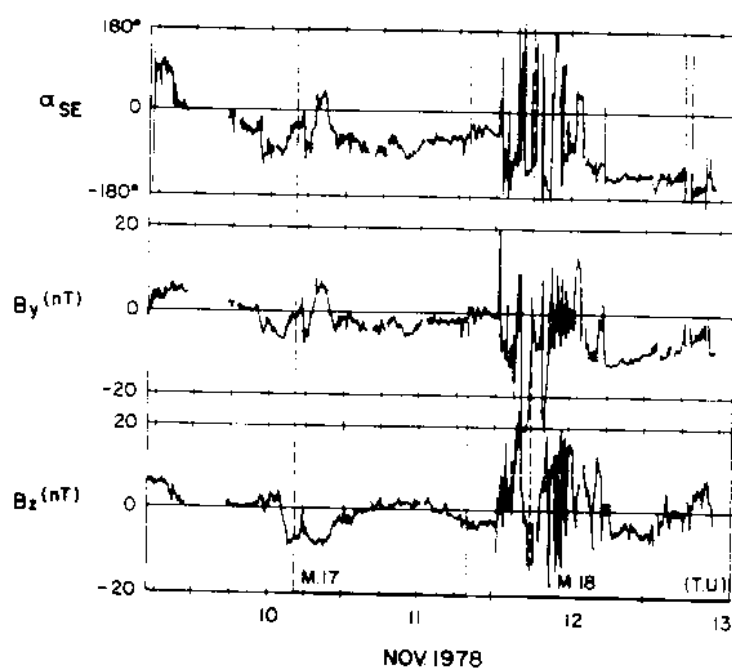


Fig. D.5b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

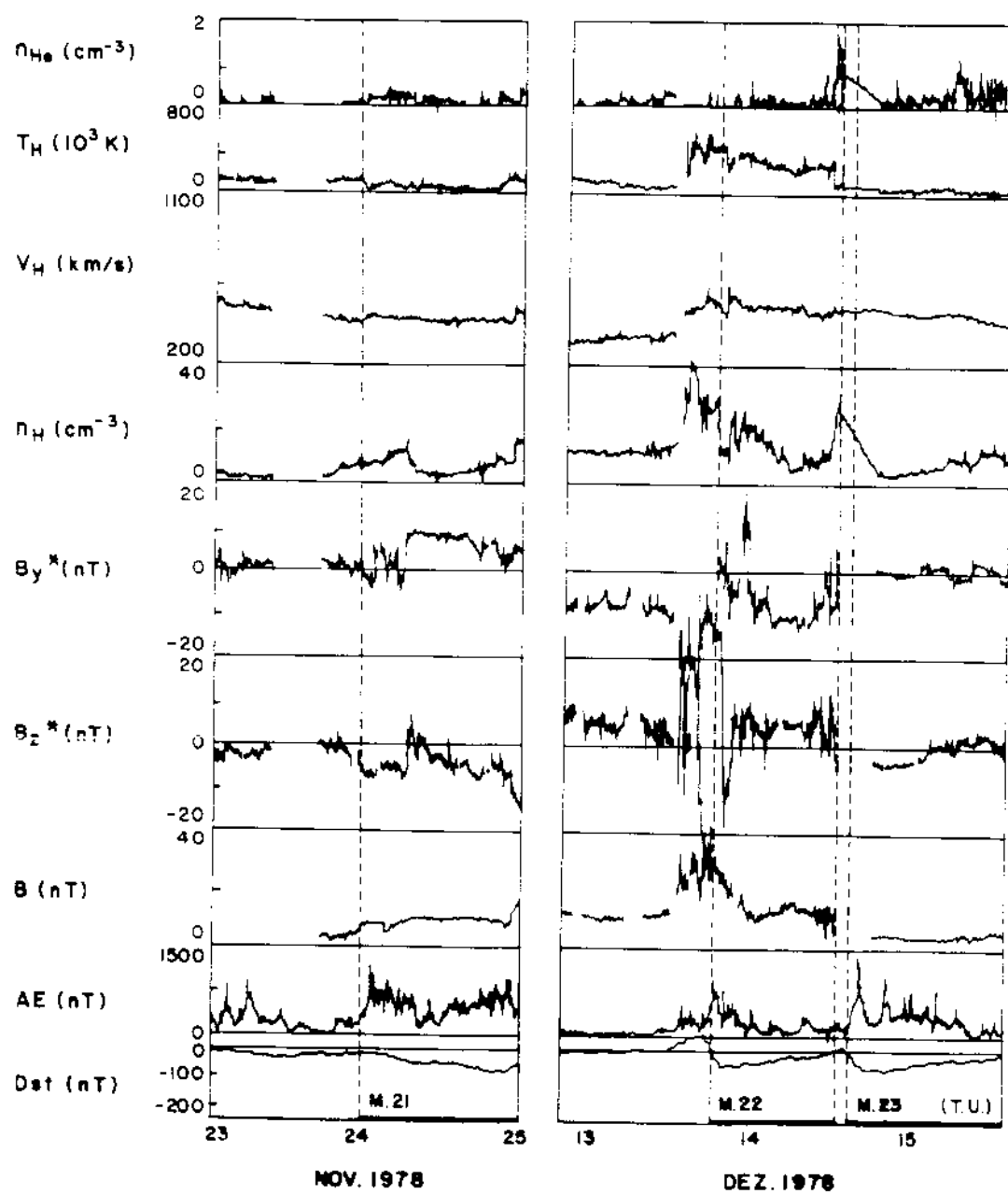


Fig. D.6a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.21, M.22 e M.23.

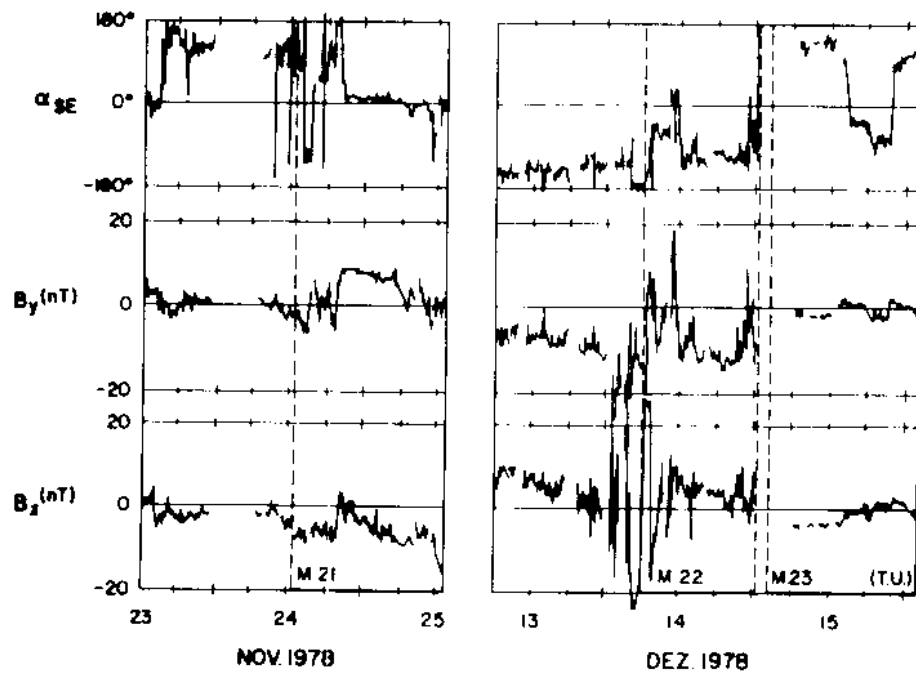


Fig. D.6b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

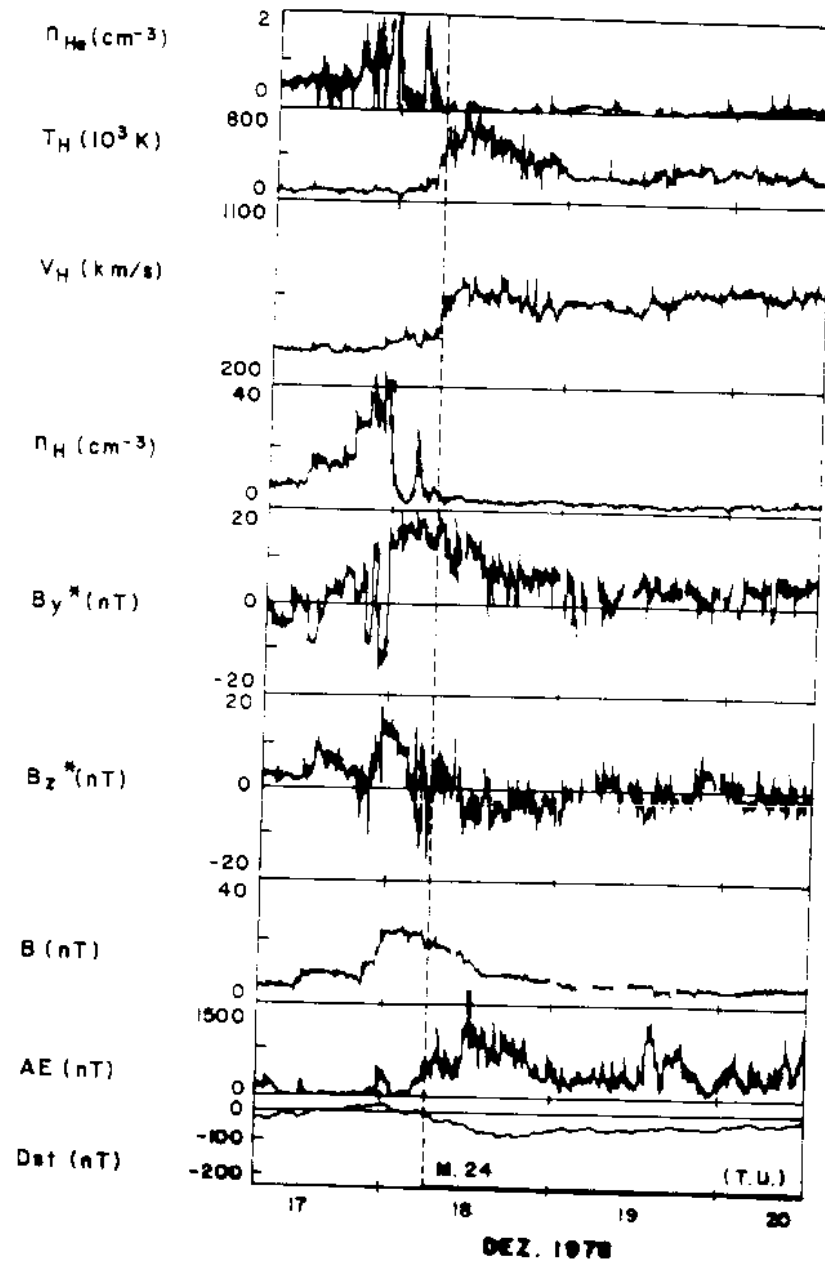


Fig. D.7a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.24.

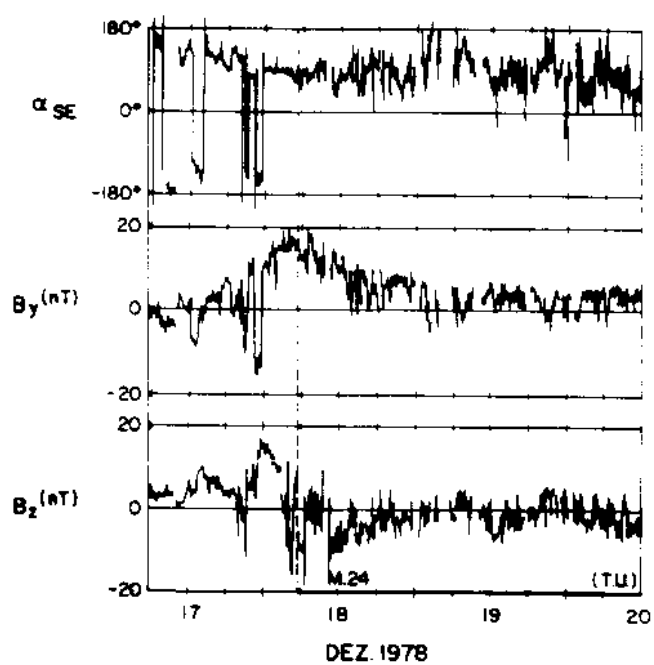


Fig. D.7b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

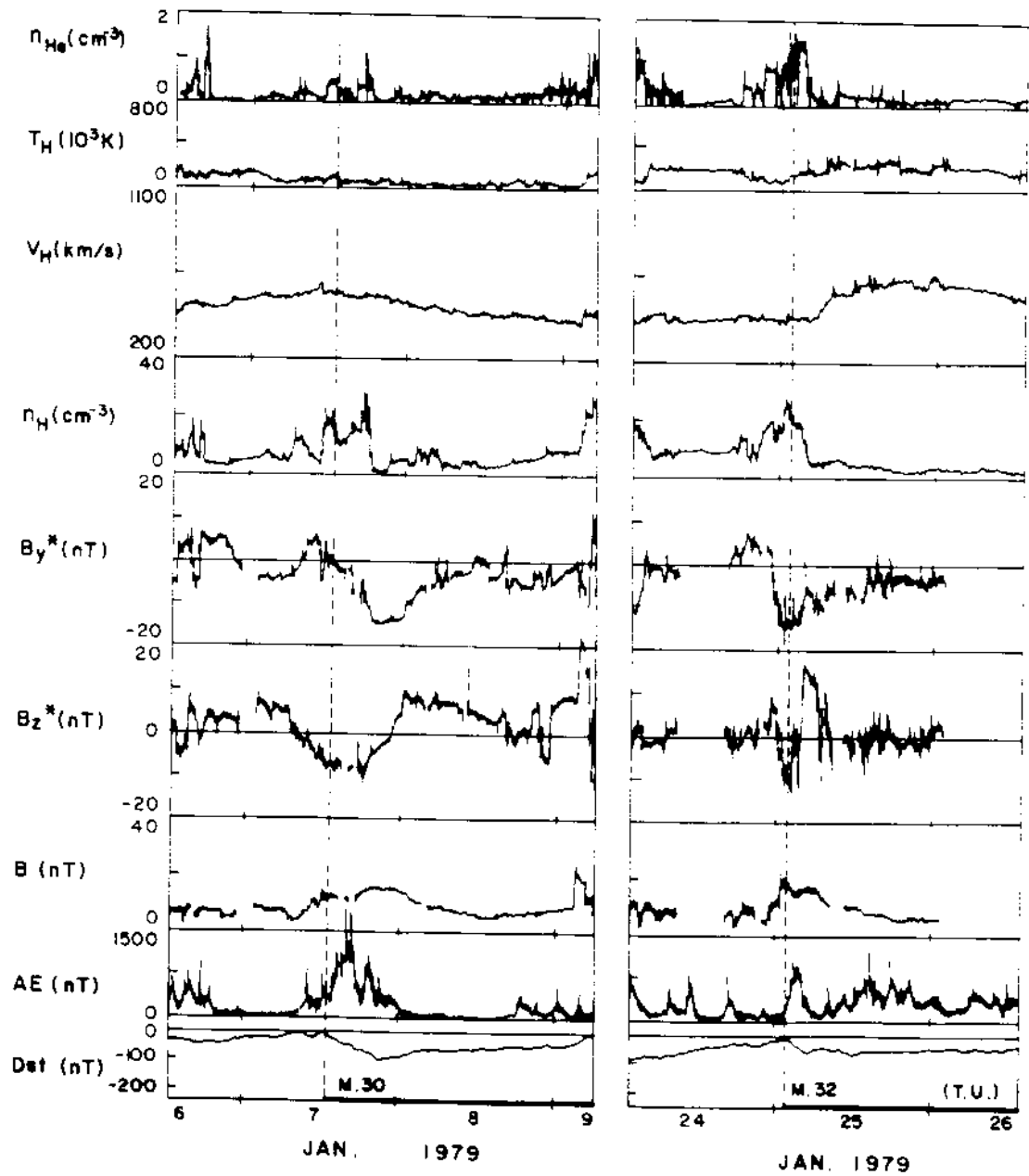


Fig. D.8a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.30 e M.32.

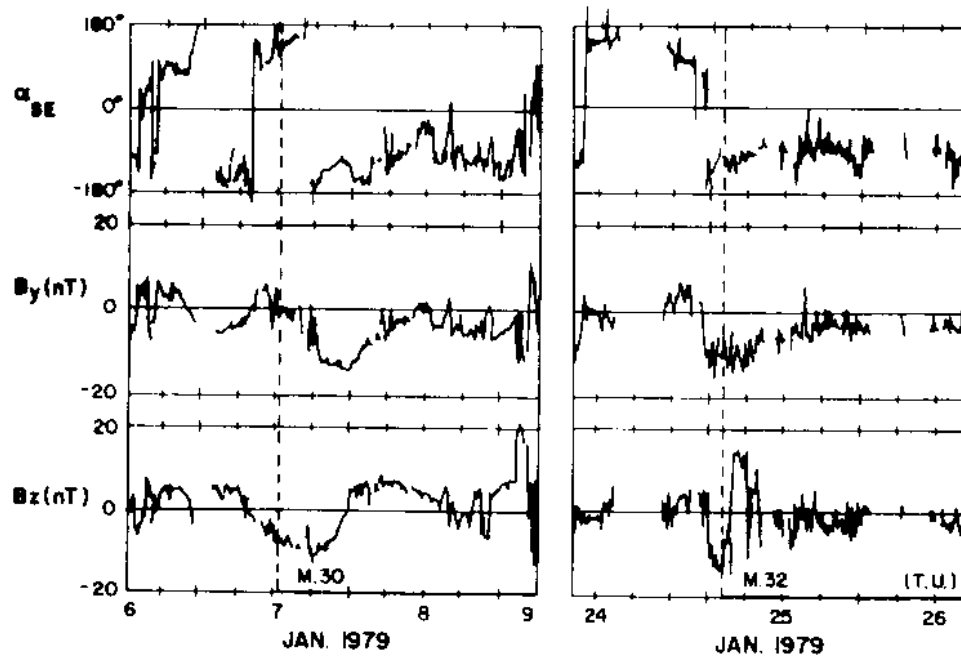


Fig. D.8b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

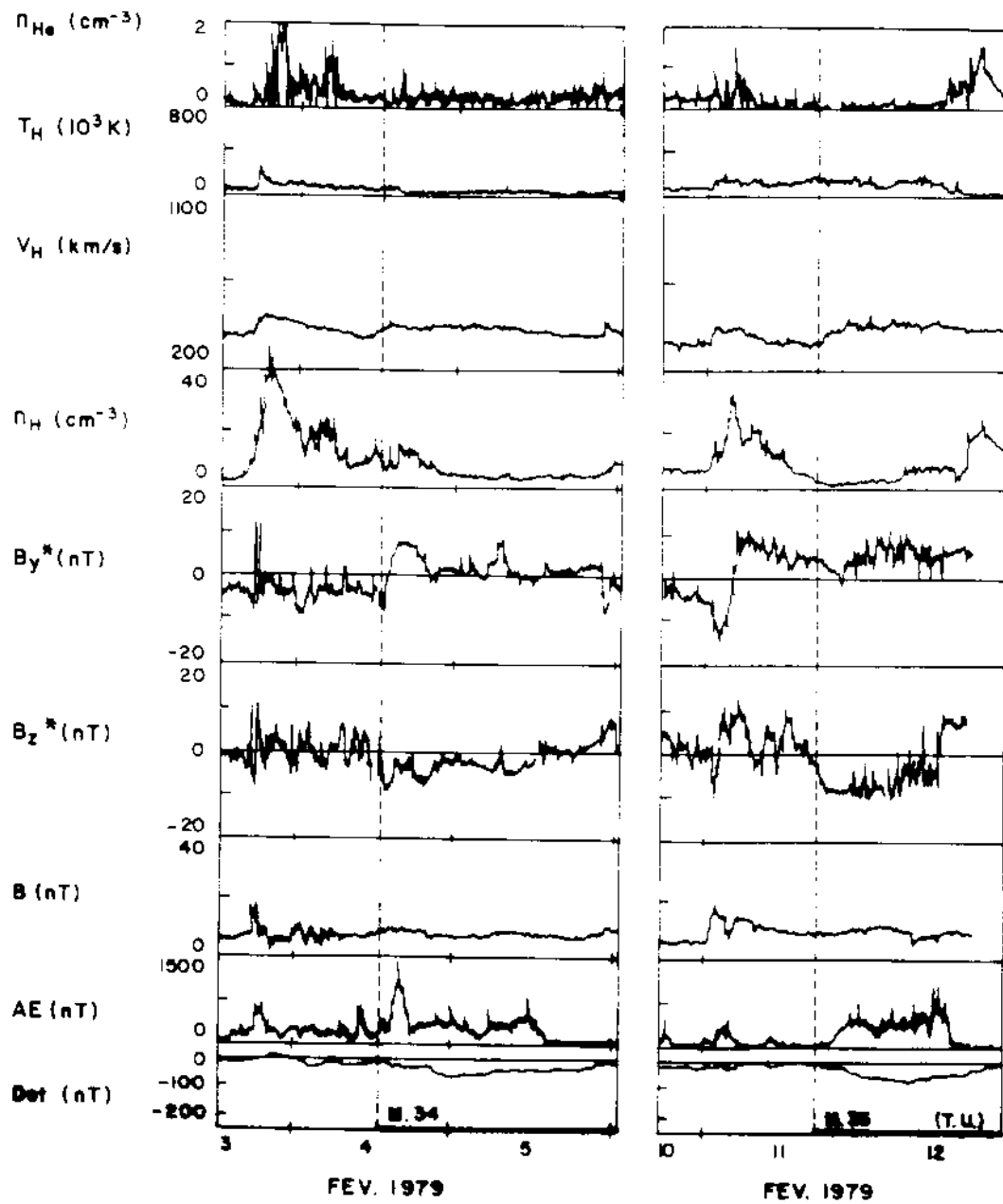


Fig. D.9a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.34 e M.35.

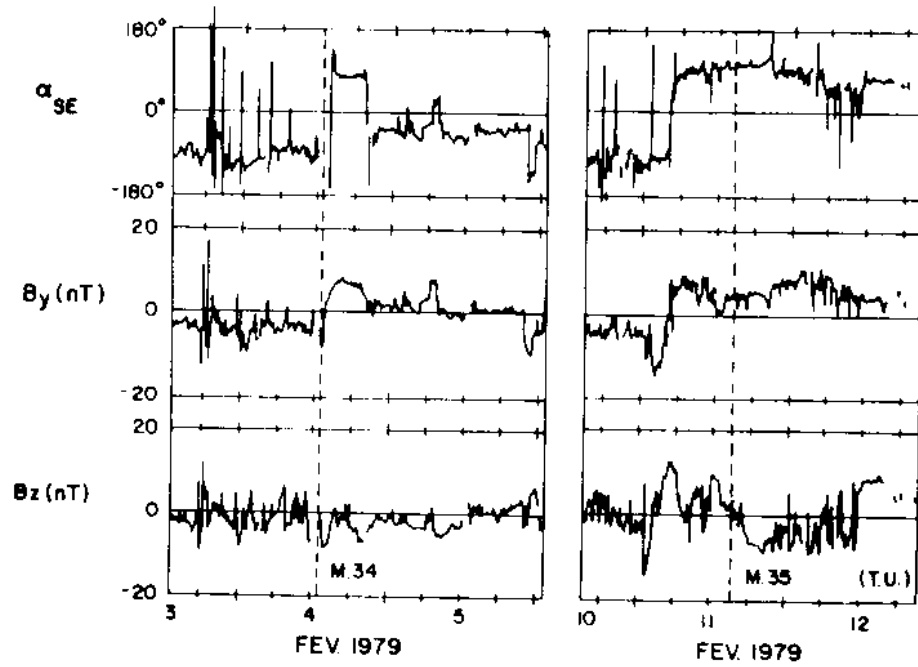


Fig. D.9b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

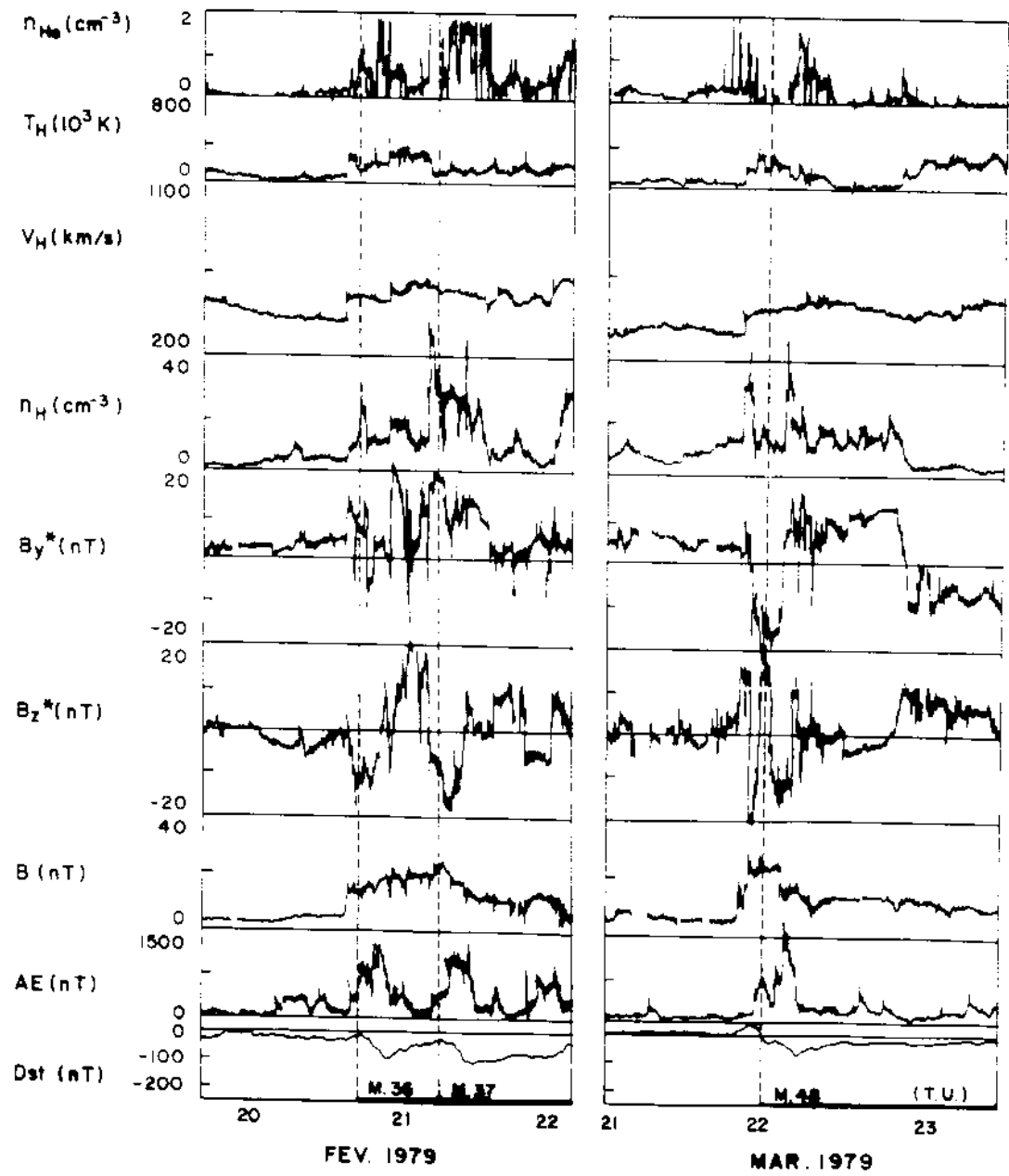


Fig. D.10a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.36, M.37 e M.48.

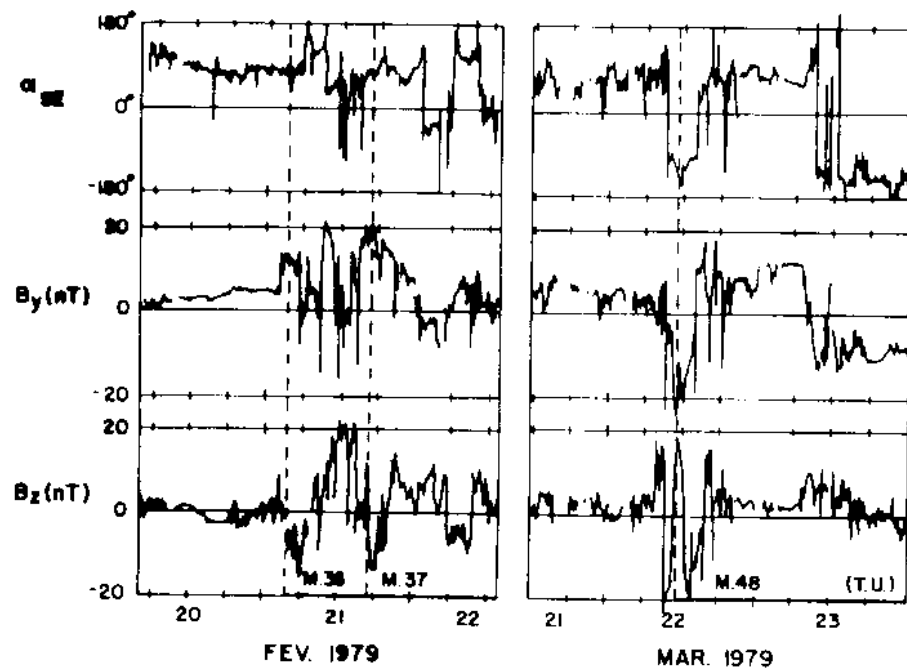


Fig. D.10b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

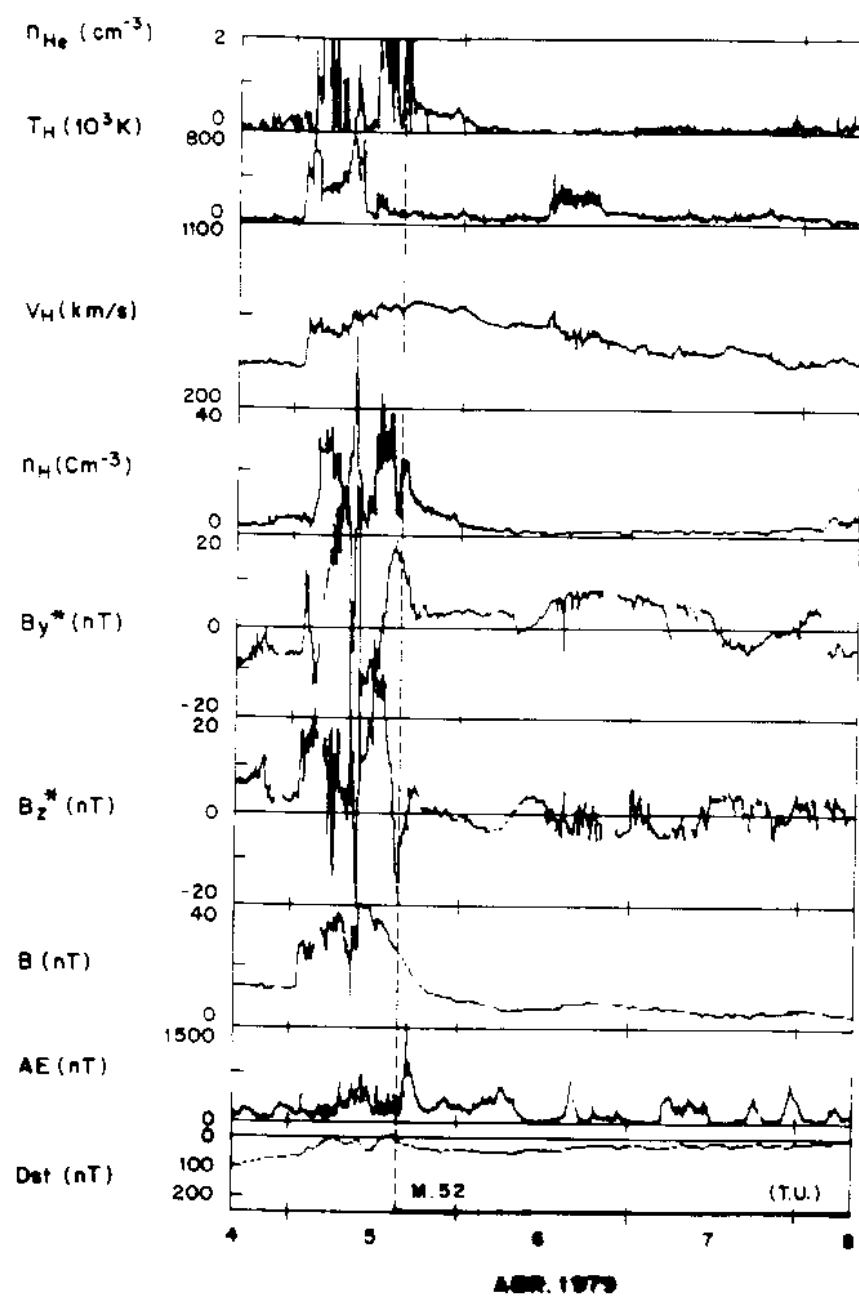


Fig. D.11a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.52.

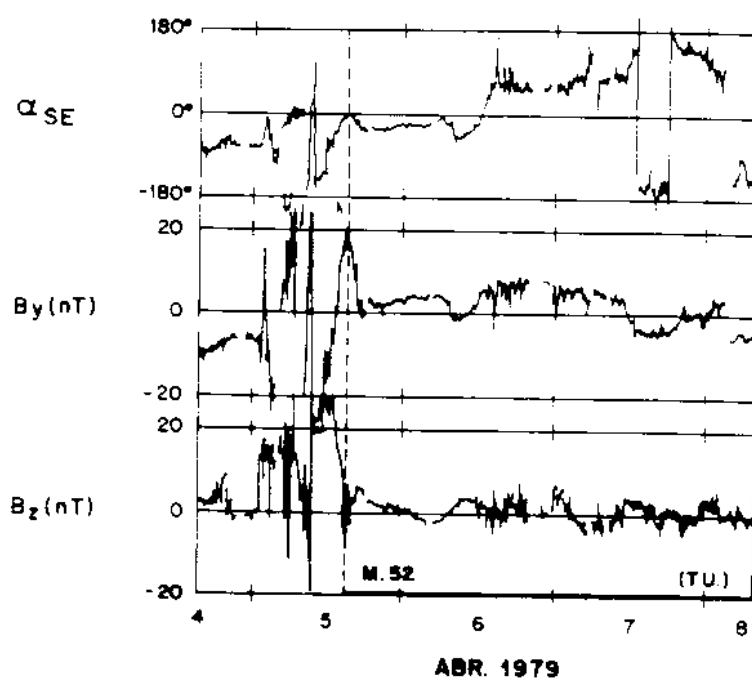


Fig. D.11b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

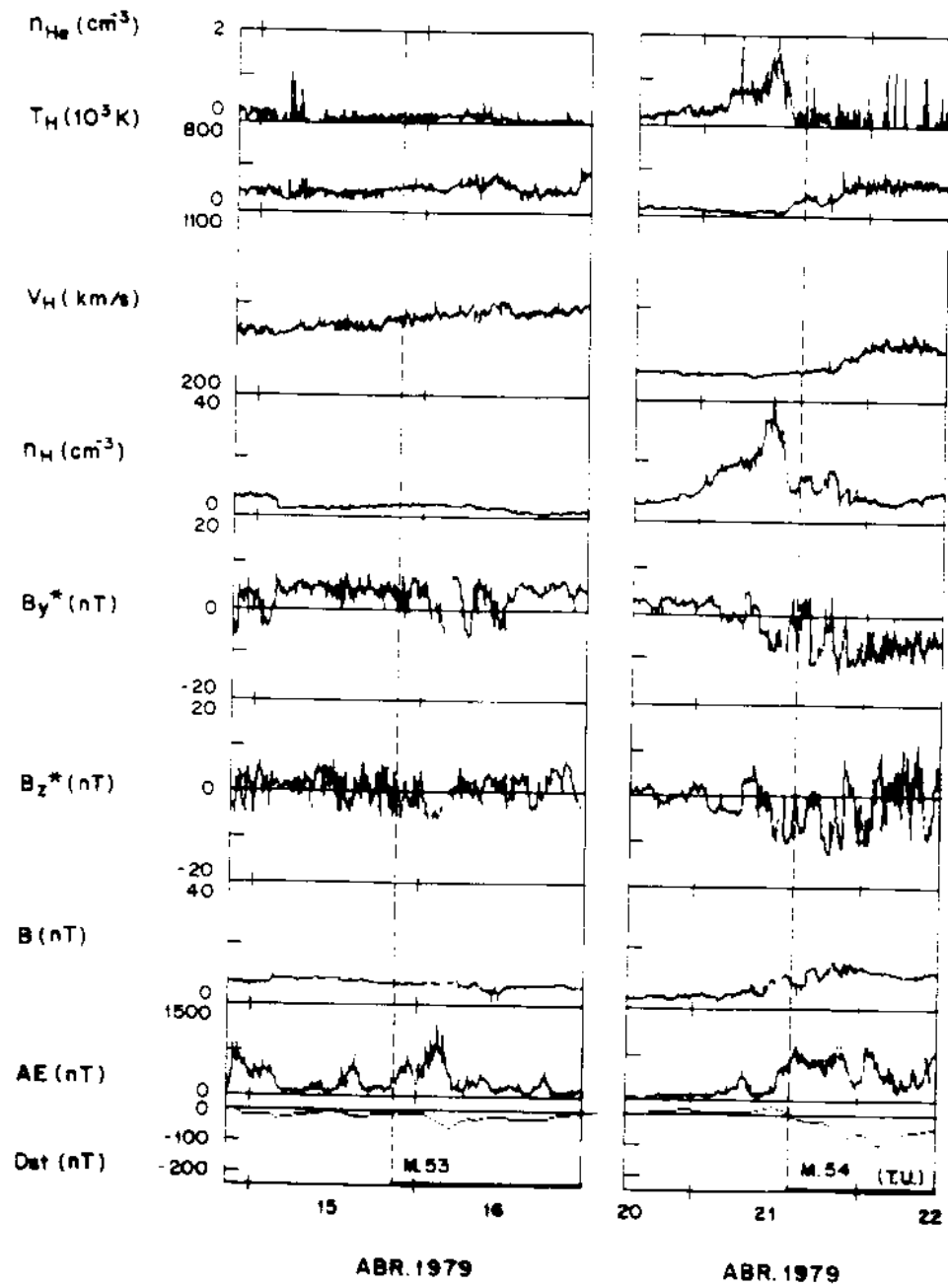


Fig. D.12a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.53 e M.54.

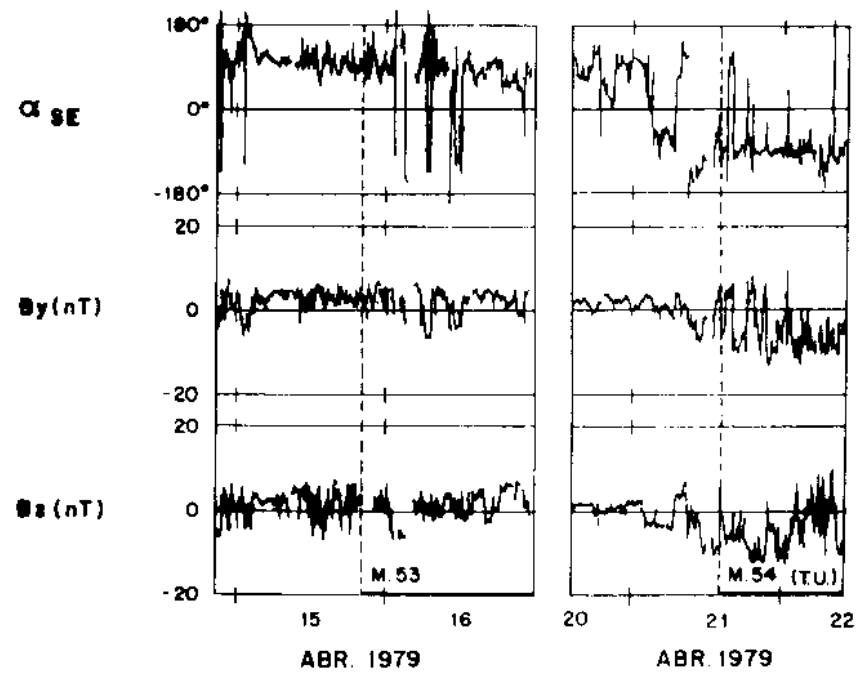


Fig. D.12b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

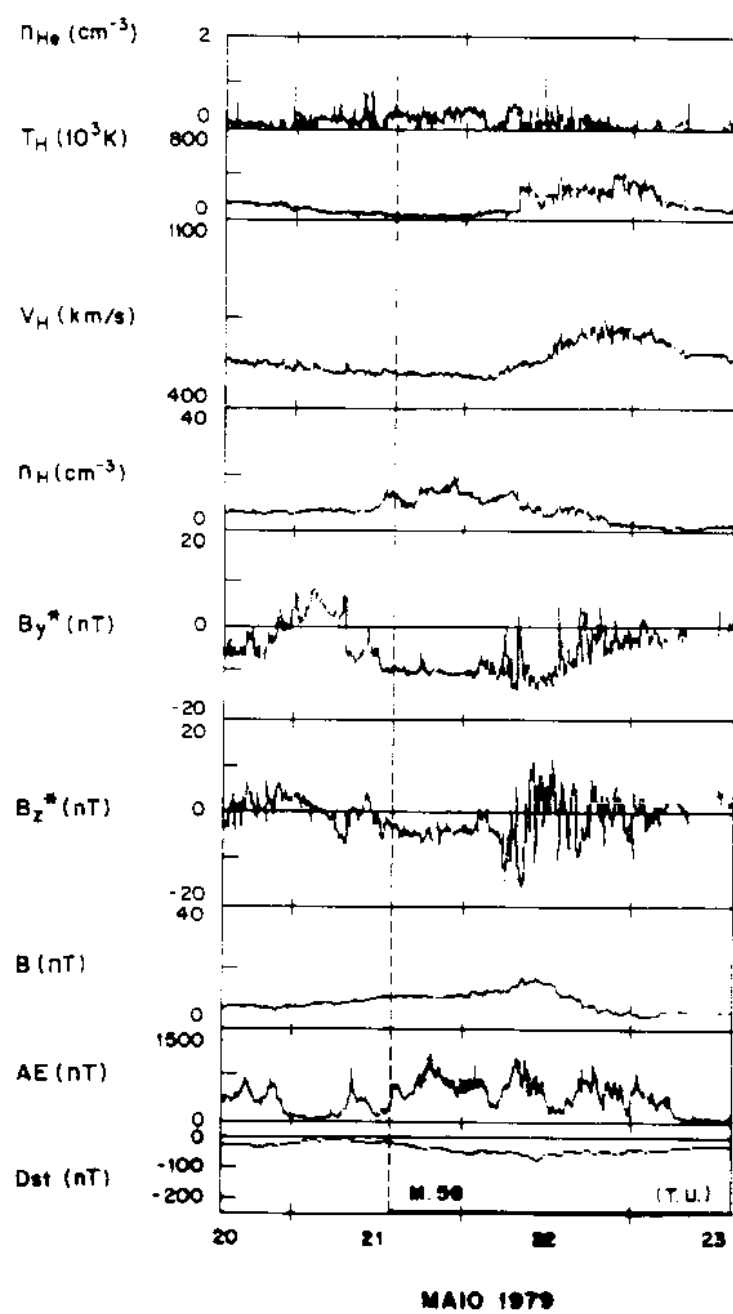


Fig. D.13a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.58.

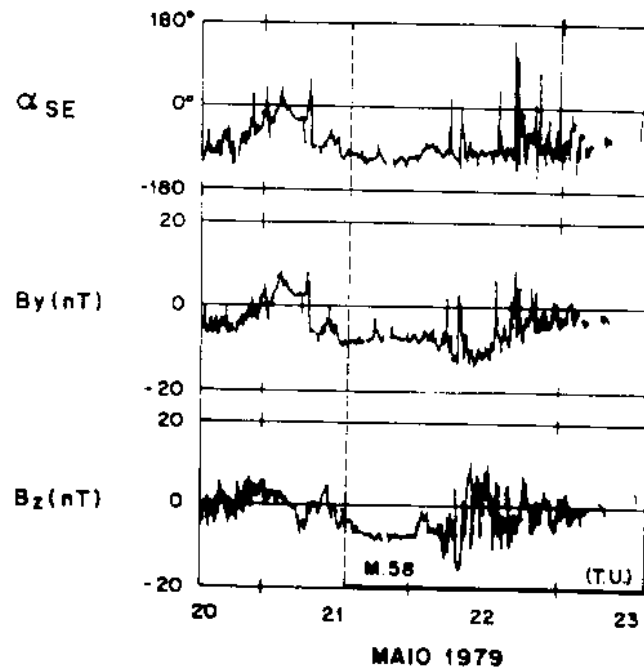


Fig. D.13b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

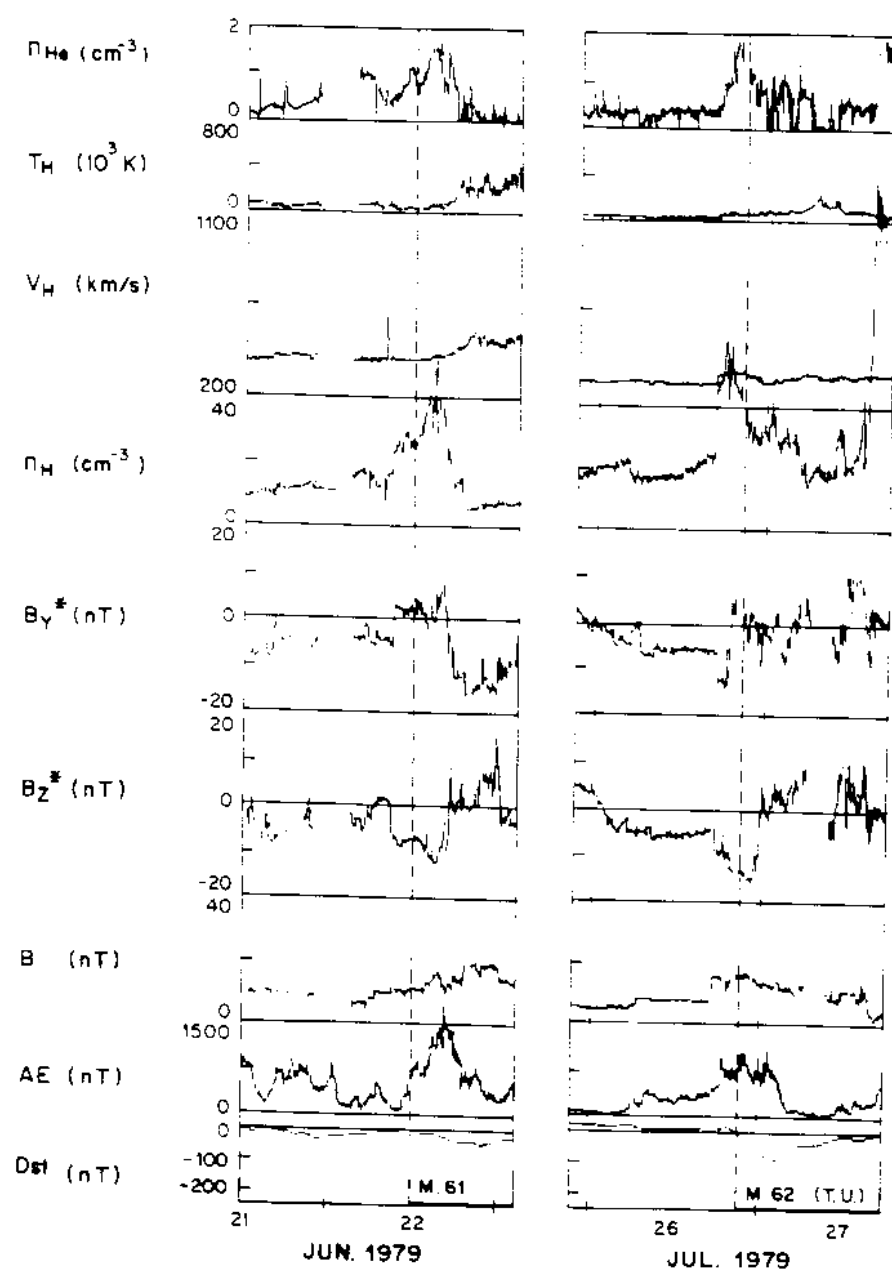


Fig. D.14a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.61 e M.62.

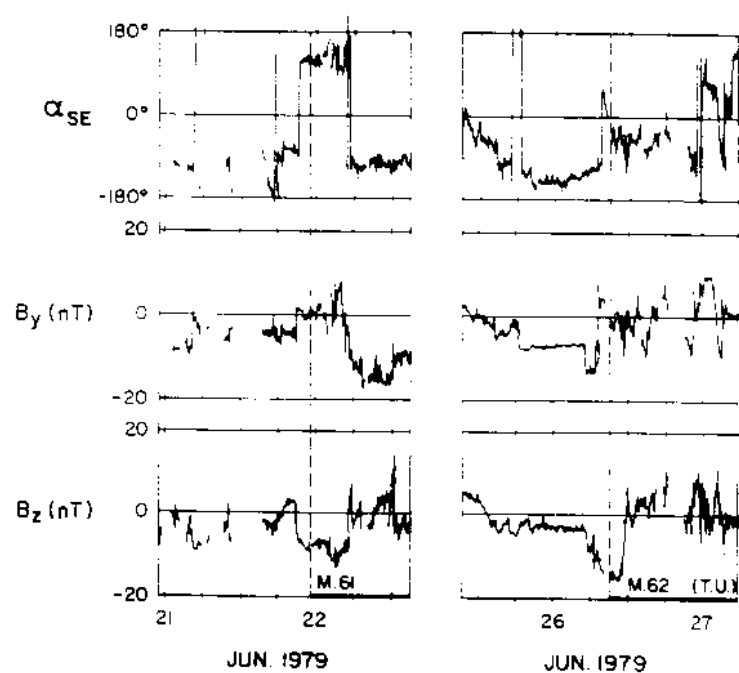


Fig. D.14b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

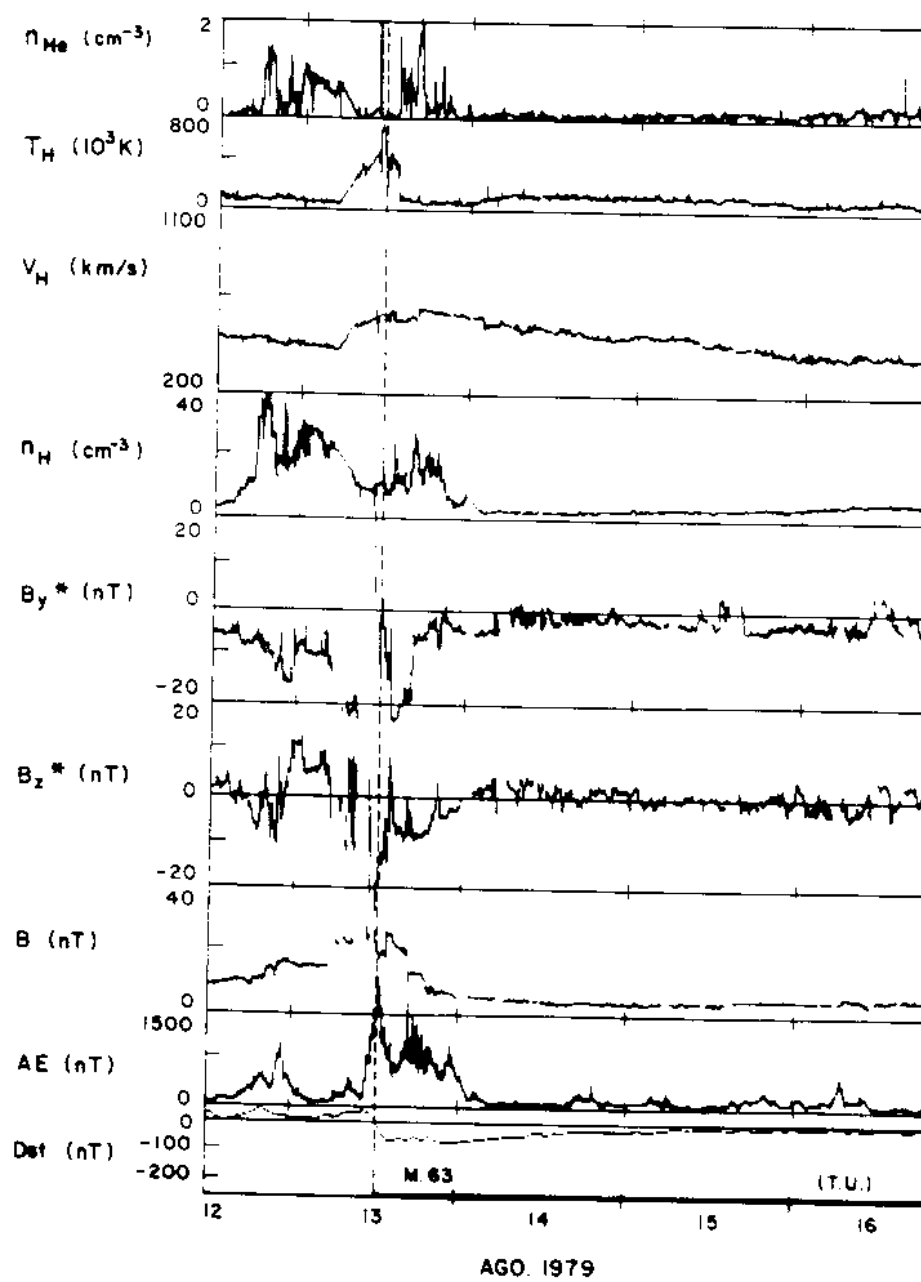


Fig. D.15a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.63.

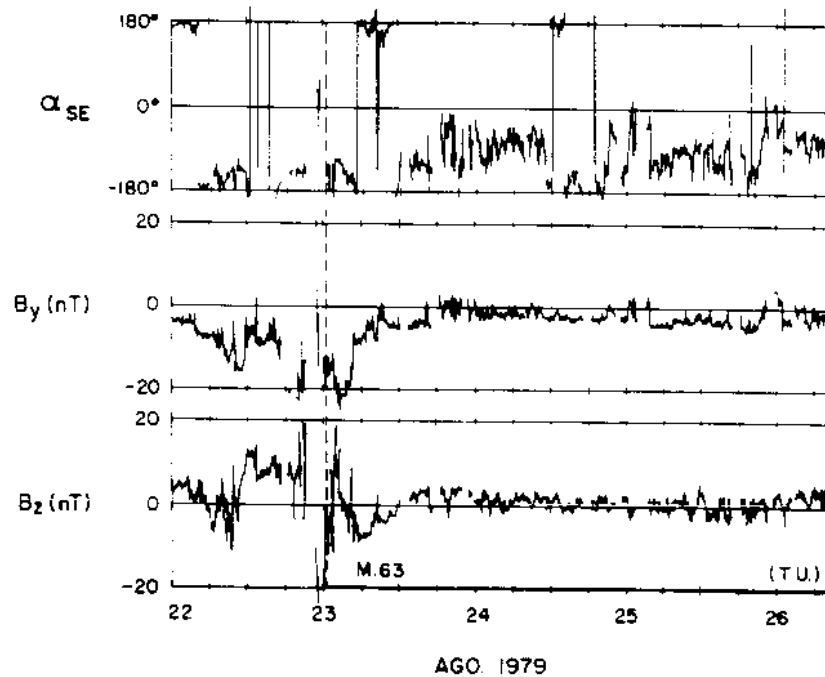


Fig. D.15b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

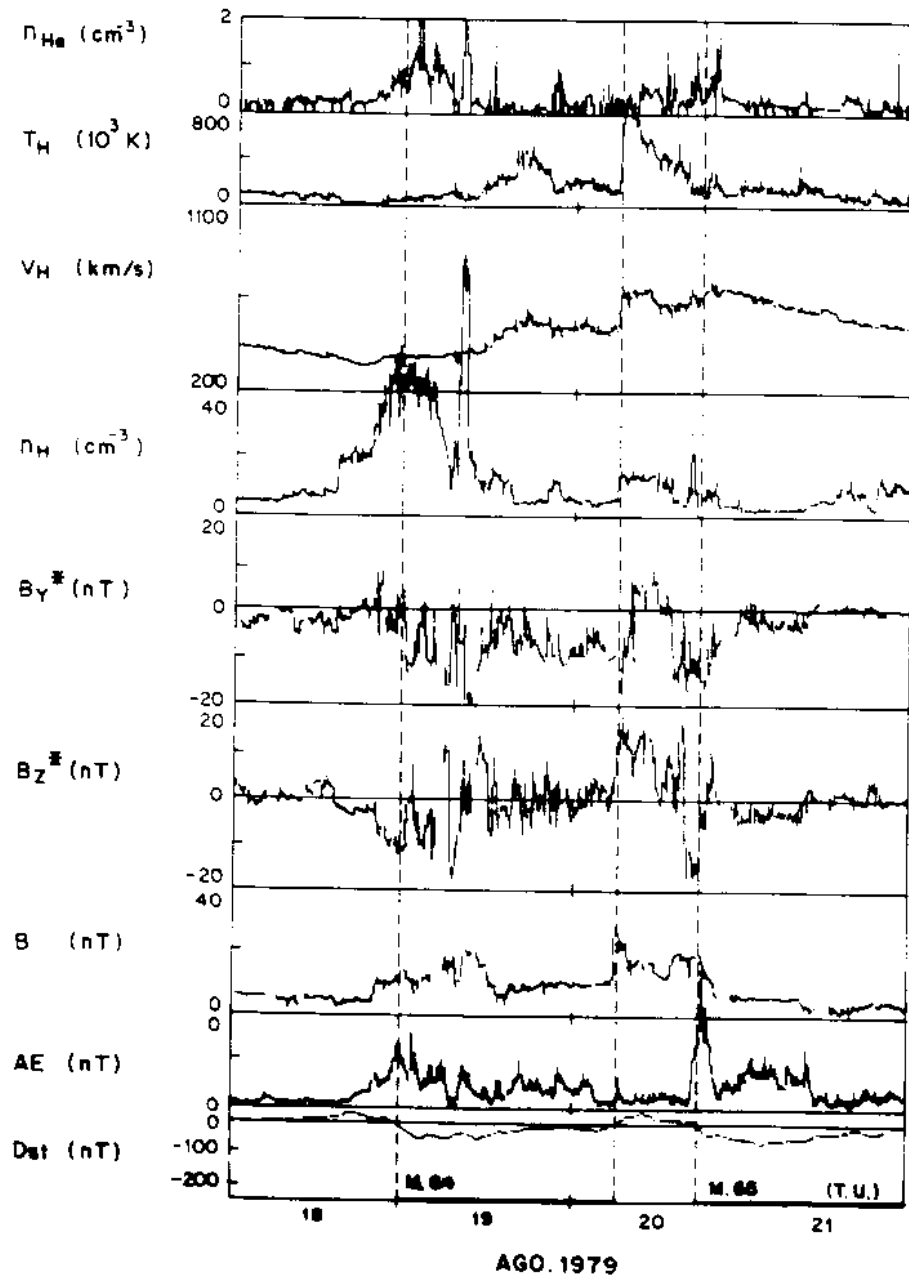


Fig. D.16a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.64 e M.65.

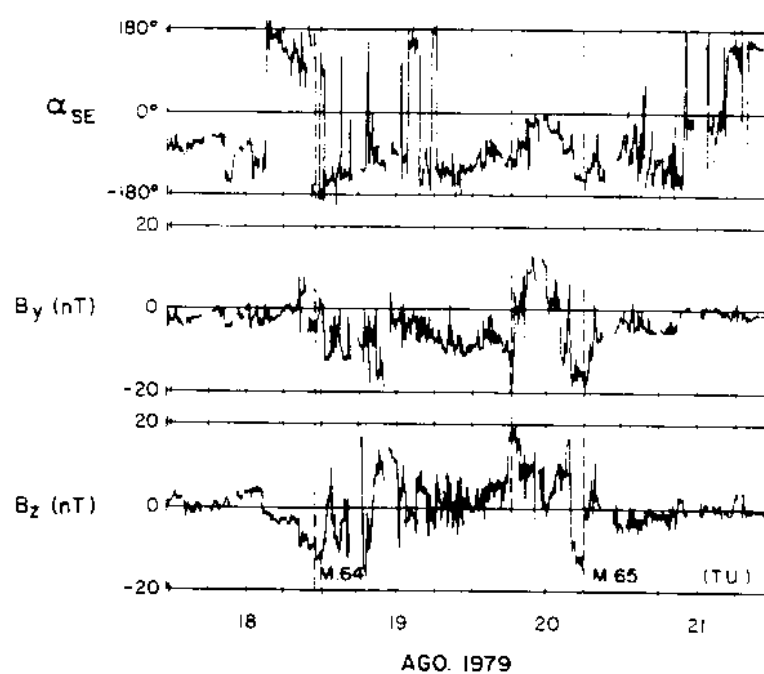


Fig. D.16b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

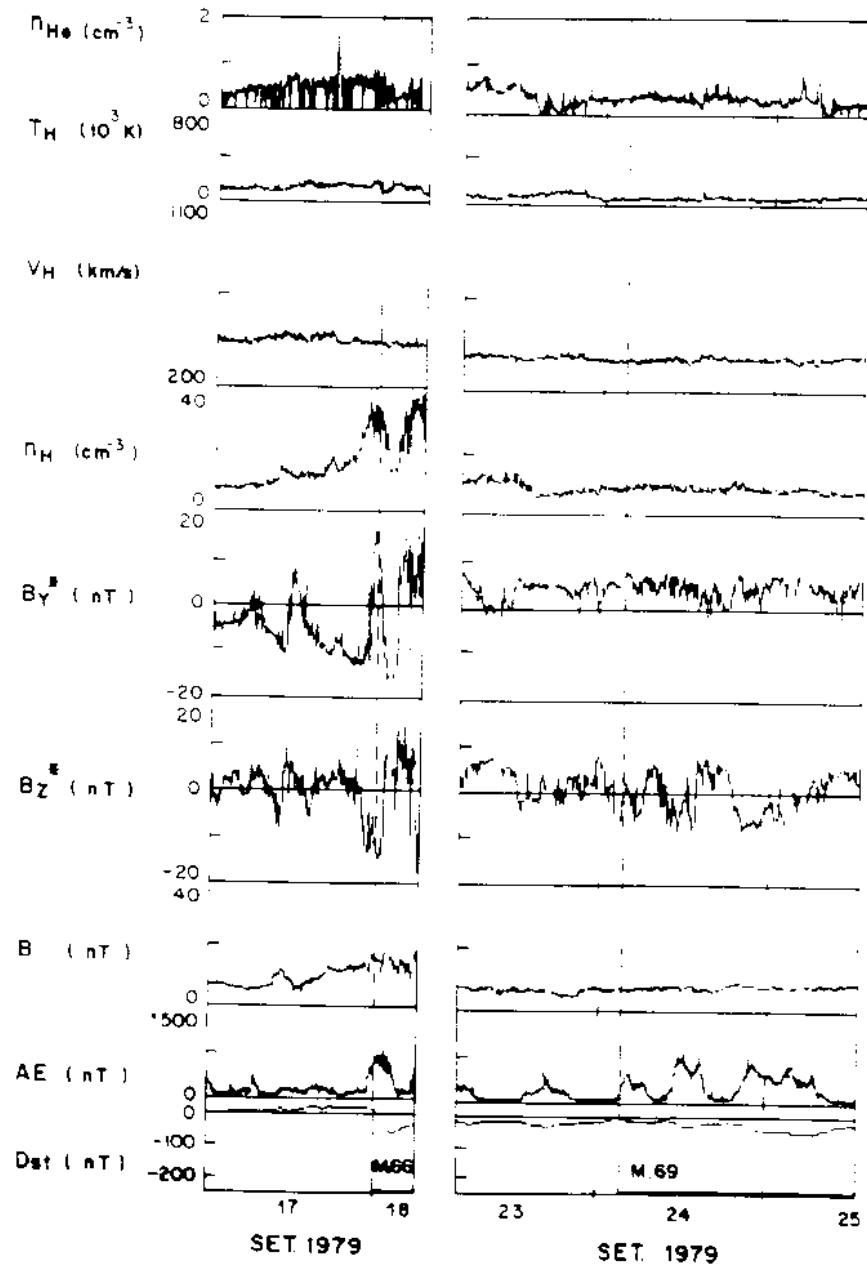


Fig. D.17a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.66 e M.69.

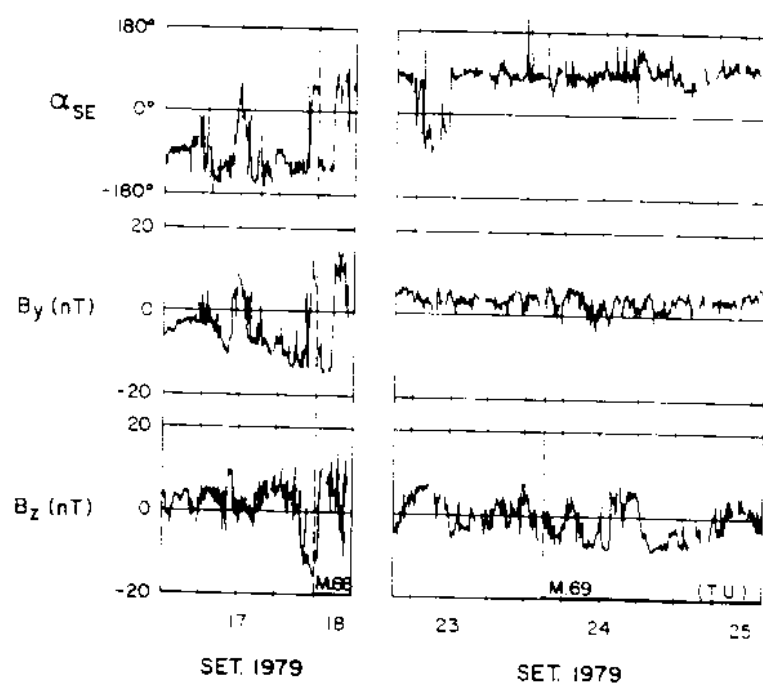


Fig. D.17b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

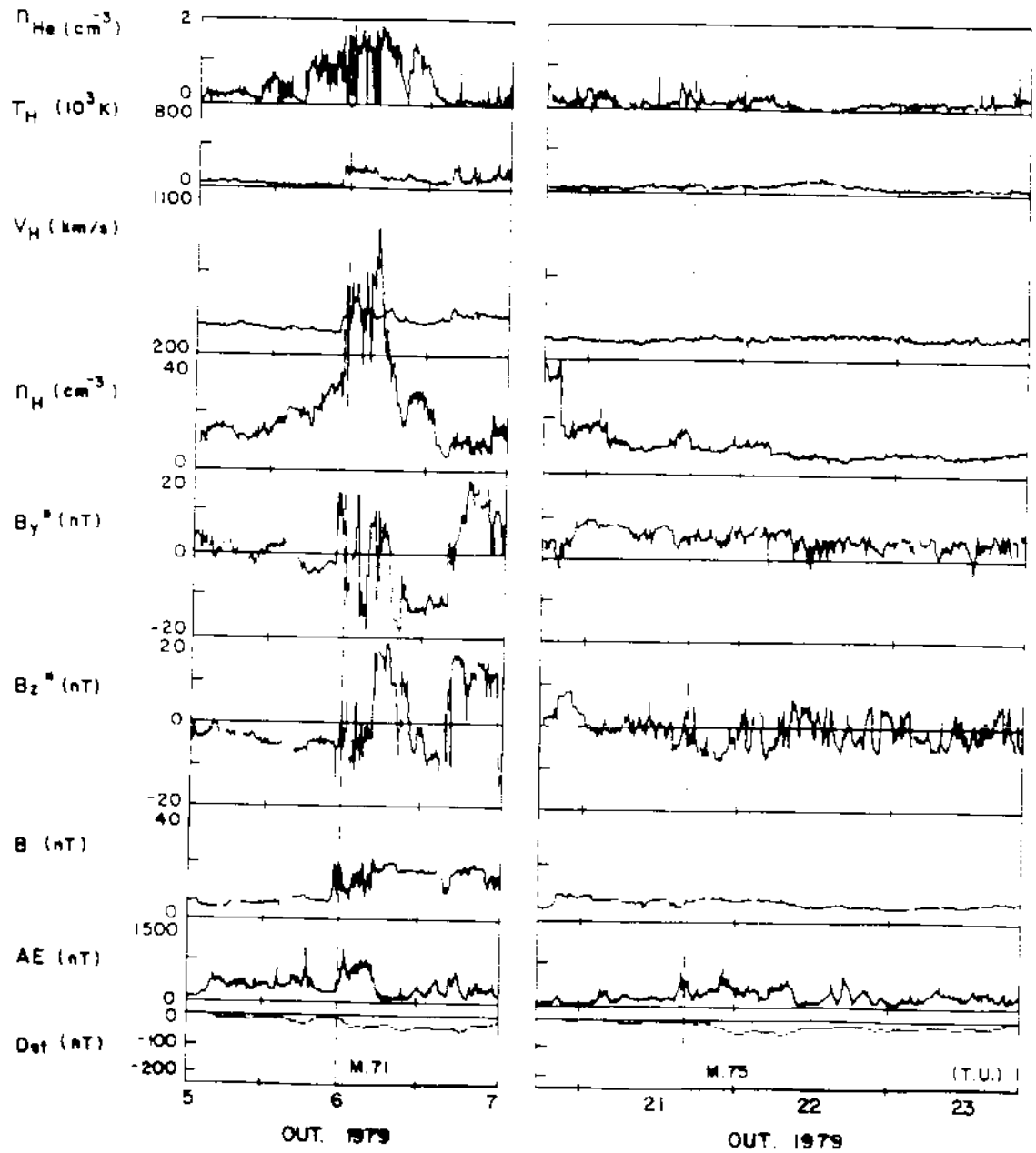


Fig. D.18a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.71 e M.75.

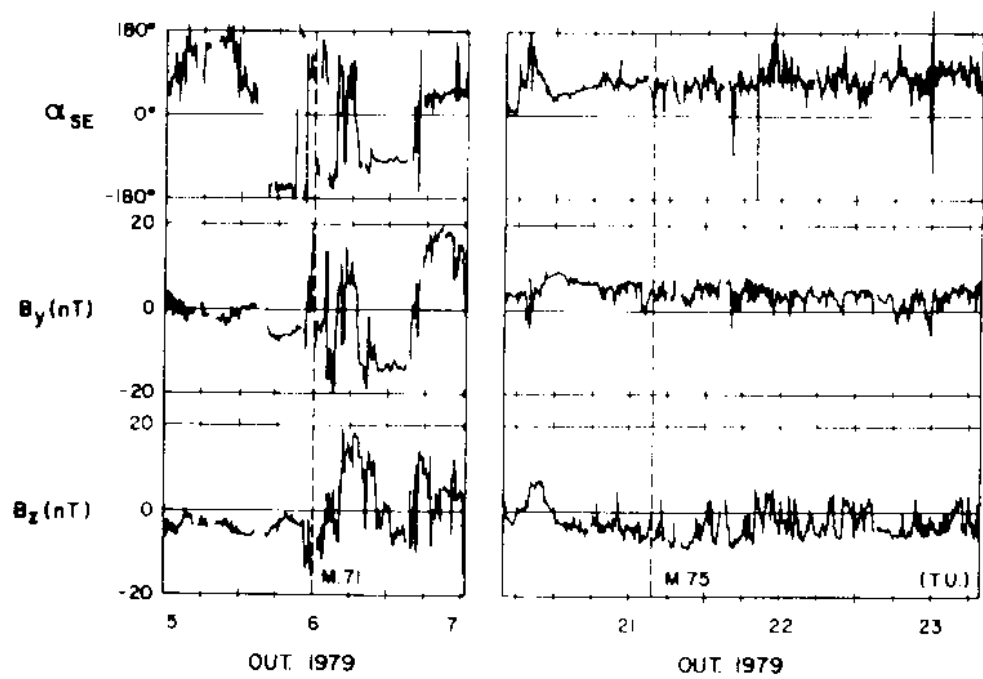


Fig. D.18b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

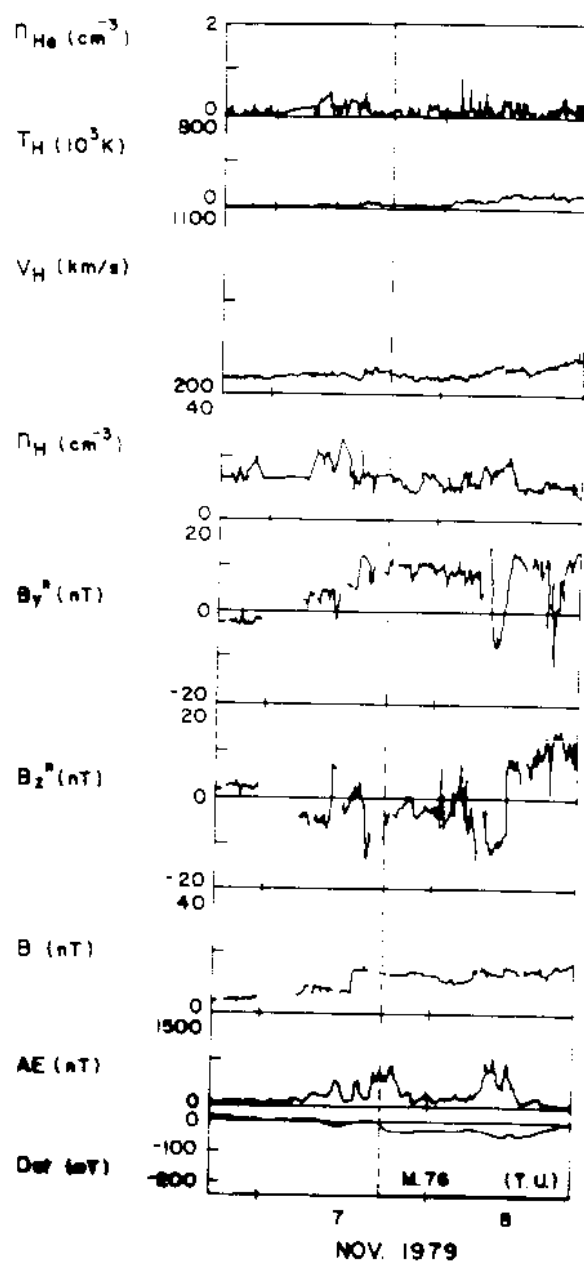


Fig. D.19a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.76.

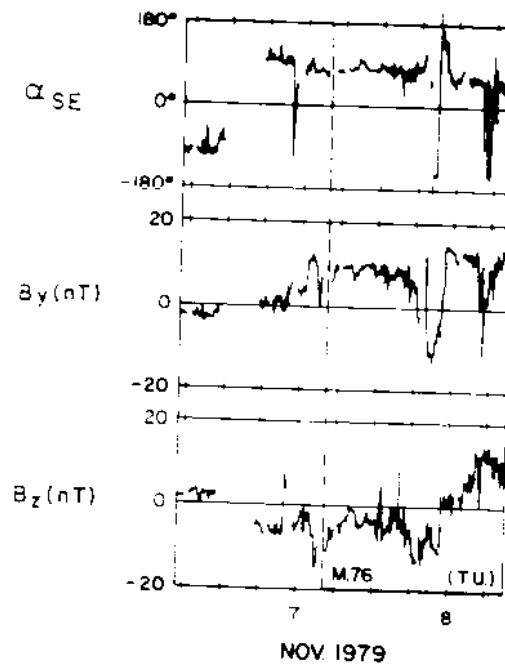


Fig. D.19b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

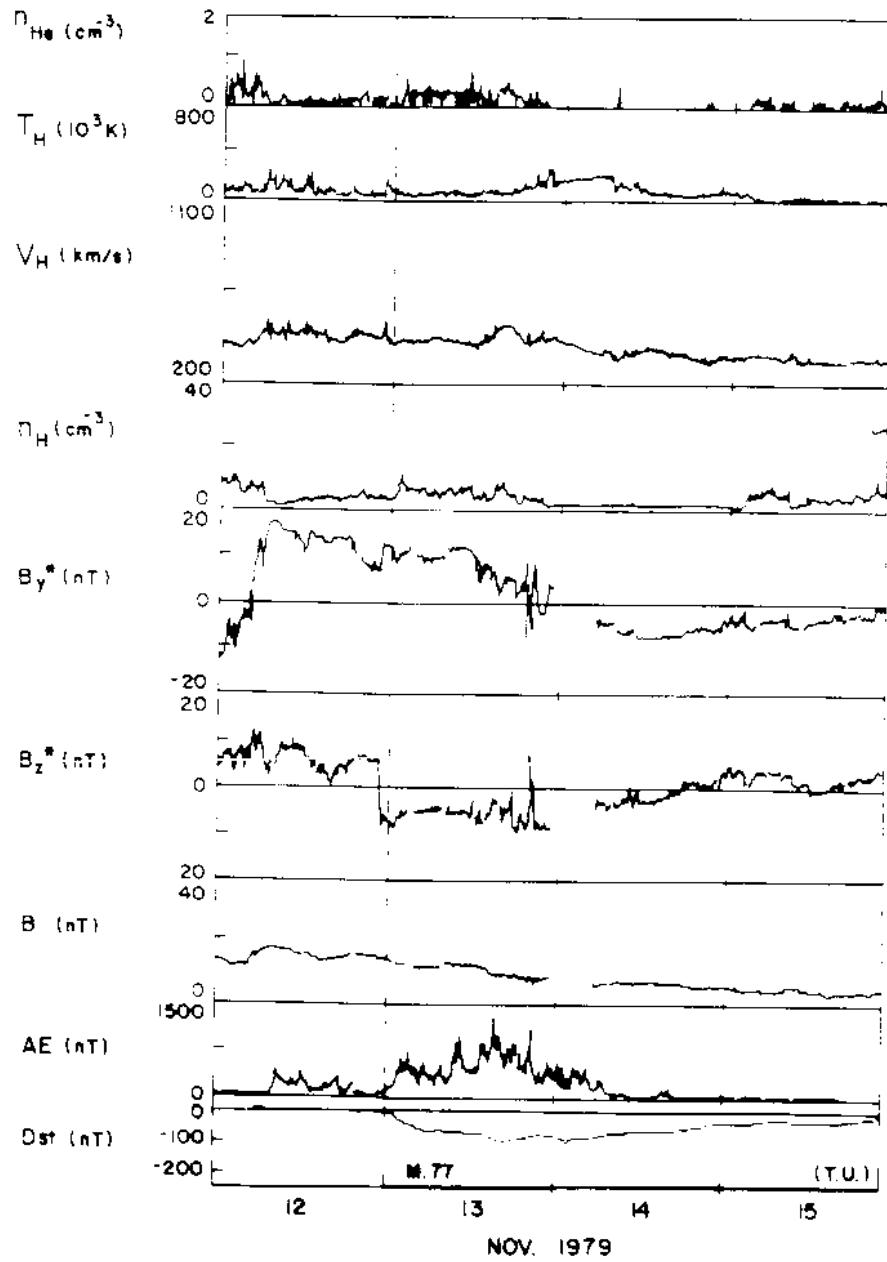


Fig. D.20a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.77.

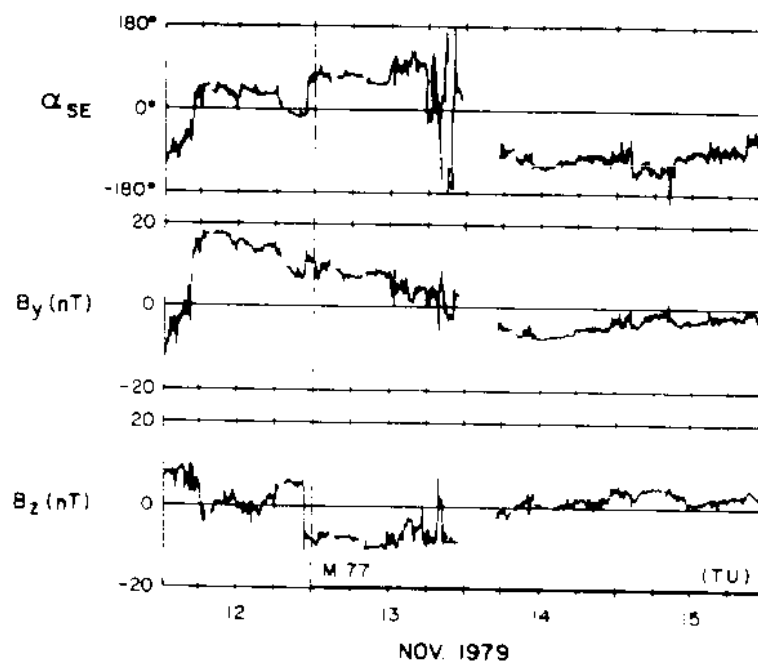


Fig. D.20b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

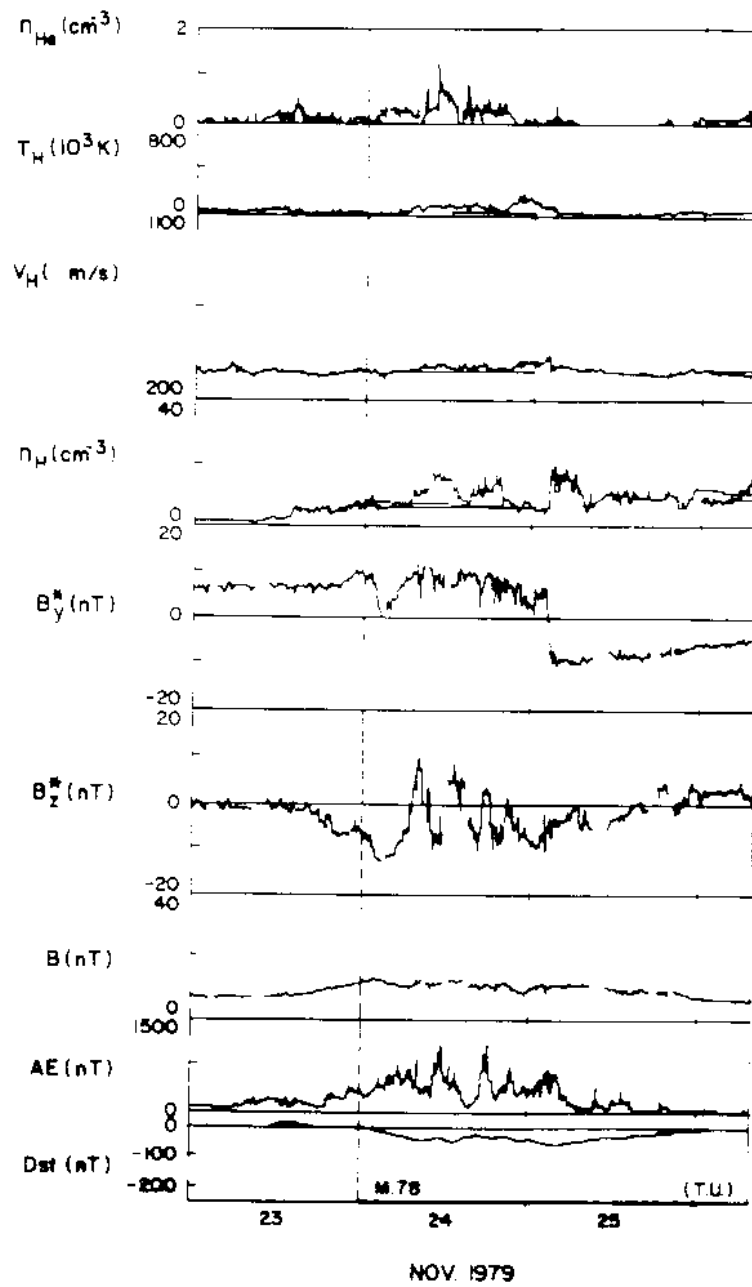


Fig. D.21a - Eventos de tempestade geomagnética moderada M.78.

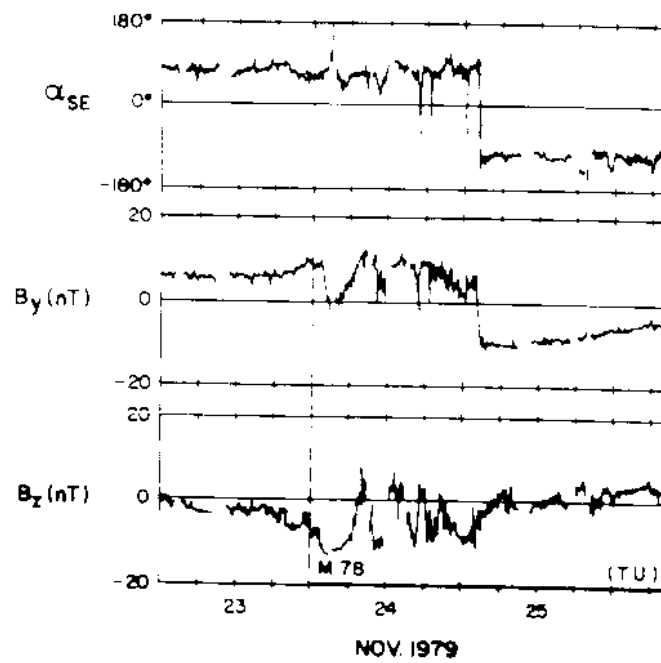


Fig. D.21b - Apresentam-se, em tempo universal (T.U.), as componentes no sistema da magnetosfera B_z e B_y do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

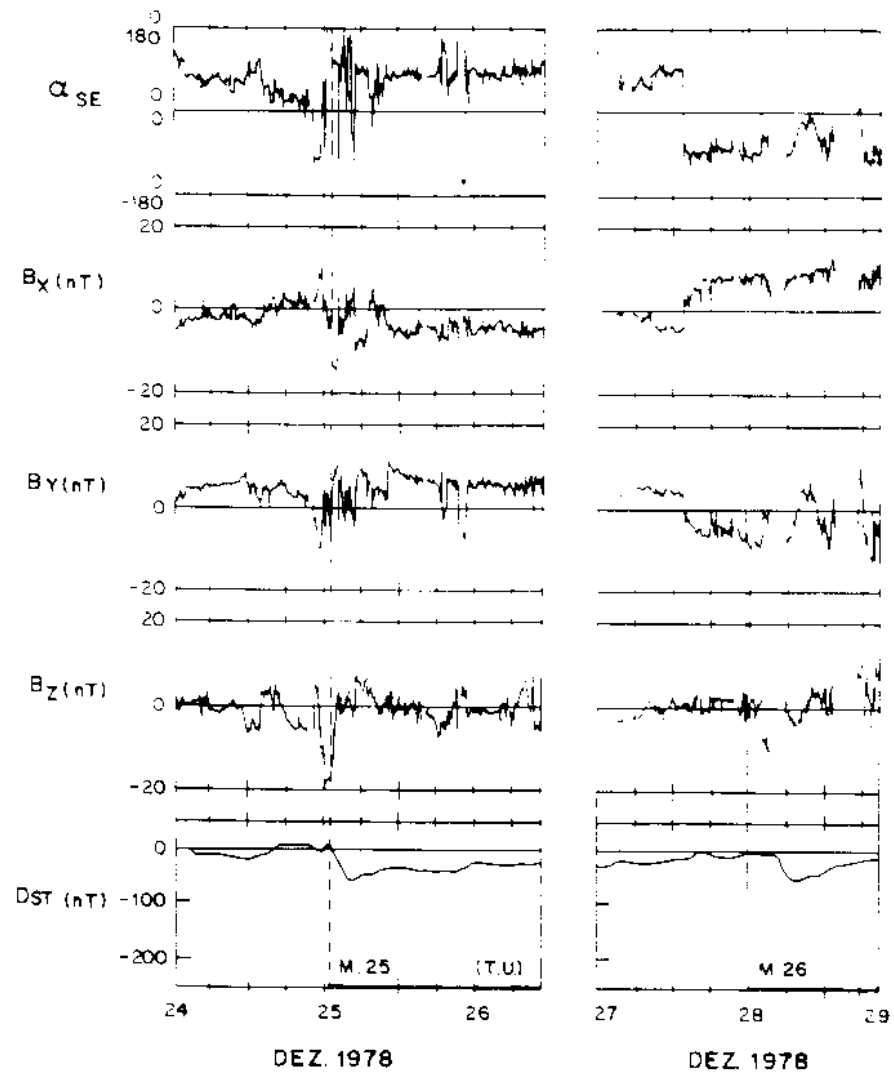


Fig. D.22 - Apresentam-se para os eventos de tempestades geomagnéticas moderadas M.25 e M.26, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; as componentes no sistema da magnetosfera Bz, By e Bx do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

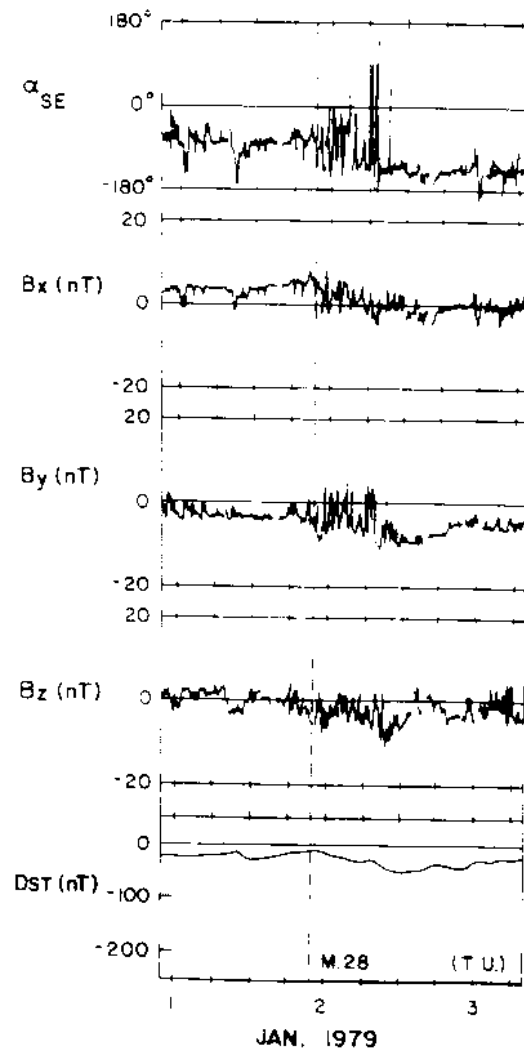


Fig. D.23 - Apresentam-se para o evento de tempestade geomagnética moderada M.28, em tempo universal (T.U.), o índice de atividade geomagnética Dst; as componentes no sistema da magnetosfera B_z , B_y e B_x do campo magnético interplanetário e, também, a sua polaridade, dada pelo ângulo α_{SE} (no sistema Sol-Eclíptica).

APÊNDICE ETEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS FRACAS

As tempestades geomagnéticas fracas, definidas pelo $Dst_{\text{mín}} > -50$ nT, muitas vezes apresentam uma caracterização ambígua. Para o período de agosto de 1978 a dezembro de 1979, a Tabela E.1 relaciona as tempestades fracas em que o Dst inicial é ≥ -12 nT e cujo Dst mínimo está no intervalo -47 nT a -20 nT, definindo eventos de tempestades fracas. Apresentam-se a data da tempestade, seu início, a duração da fase principal, o $Dst_{\text{mín}}$, quando ocorreu um choque interplanetário, uma troca ou incursão de setor e a indicação sucinta de características interessantes nos parâmetros interplanetários. F.# identifica esse evento de tempestade fraca, onde # significa um número seqüencial. Quanto ao choque e troca ou incursão de setor, os números indicam o intervalo temporal entre sua ocorrência no meio interplanetário ($t_{\text{ISEE-3}}$, em tempo universal) e o início da tempestade (t_1 , em tempo universal) na superfície da Terra. Relacionaram-se 62 eventos de tempestade.

TABELA E.1 - TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS FRACAS

F. #	CHOQUE TISEE-3 - T1 (h)	TS/IS	ASPECTOS INTERESSANTES	ANO/MÊS/DIA	T _r (h:min)	ΔT (h:min)	DSTmin (nT)
F.1	-6		DENSIDADE E Bz	1978 08 18	18:40	05:00	-37,7
F.2	-8	I(-8)	DENSIDADE	27	10:40	04:00	-22,6
F.3			Bz	09 11	14:00	03:20	-30,2
F.4		T(-12)		12	07:00	04:20	-34,0
F.5		T(-21)	FLUTUAÇÕES RÁPIDAS DE Bz E By, B ≈ CONSTANTE	22	14:00	04:40	-30,2
F.6			IDEM	23	15:20	03:20	-22,6
F.7	-21		Bz	10 09	23:00	04:40	-30,2
F.8			DENSIDADE	25	11:20	02:00	-22,6
F.9	-23		FLUTUAÇÕES RÁPIDAS DE Bz E By	11 09	00:00	01:20	-22,6
F.10	-13	I(-6)	DENSIDADE	19	11:40	01:20	-22,6
F.11		I(-6)	FLUTUAÇÕES	20	04:00	01:20	-22,6
F.12			DENSIDADE	12 01	7:20	02:00	-22,6
F.13			Bz, DENSIDADE	16	17:20	02:00	-34,7
F.14			Bz	17	02:00	05:20	-30,2
F.15			ONDAS DE ALFVEN?	22	12:00	04:00	-22,6
F.16	-3			1979 01 09	06:20	01:40	-22,6

(Continua)

Tabela E.1 - Continuação

F.17	-13			09	16:00	02:30	-22,6
F.18		DENSIDADE?, FALTAM DADOS		14	05:20	08:40	-30,2
F.19		DENSIDADE?, FALTAM DADOS		15	07:00	05:00	-30,2
F.20		FALTAM DADOS		17	16:30	05:50	-22,6
F.21		DENSIDADE, FLUTUAÇÕES		18	19:20	10:00	-40,8
F.22		Bz, FLUTUAÇÕES		22	19:20	02:40	-30,2
F.23	-5			02 03	22:30	03:40	-22,6
F.24		FLUTUAÇÕES DE Bz E By, $B \approx \text{CONSTANTE}$ IDEM		07	21:40	05:20	-30,2
F.25				08	23:40	04:20	-30,2
F.26				15	10:00	01:20	-30,2
F.27	-2			03 09	09:00	01:20	-30,2
F.28	-3			09	20:20	01:20	-22,6
F.29	-19			10	02:00	05:20	-30,2
F.30		VELOCIDADE? FLUTUAÇÕES?		17	09:20	08:00	-30,2
F.31		VELOCIDADE, DENSIDADE		19	07:20	03:00	-30,2
F.32	-6			04 05	07:00	01:00	-22,6
F.33	-10			05	10:00	00:40	-44,4
F.34		I(-2)		08	17:20	08:40	-30,2

(Continua)

Tabela E.1 - Continuação

F.35		ONDAS DE ALFVEN	14	22:40	05:40	-30,2
F.36		ONDAS DE ALFVEN	05 11	14:00	07:20	-22,6
F.37	T(-12)	DENSIDADE, VELOCIDADE, FLUTUAÇÕES	18	21:20	01:20	-30,2
F.38	-9	FLUTUAÇÕES	06 07	04:00	01:20	-30,2
F.39		FLUTUAÇÕES?	16	18:20	04:20	-30,2
F.40		FLUTUAÇÕES?	17	14:40	02:00	-22,6
F.41			21	16:40	06:00	-30,2
F.42	I(0)	DENSIDADE	26	17:20	06:00	-37,7
F.43	-20	Bz	07 07	14:20	01:20	-22,6
F.44		FLUTUAÇÕES DE Bz E By	08 04	12:40	07:00	-22,6
F.45	I(8)		07	11:20	08:00	-22,6
F.46	I(0)	DENSIDADE, FALTAM DADOS	25	20:00	06:40	-30,2
F.47		FLUTUAÇÕES EM Bz E By	09 03	01:20	06:00	-22,6
F.48		IDEM	05	18:00	02:20	-22,6
F.49		IDEM	06	00:40	05:40	-30,2
F.50		DENSIDADE	10	15:40	08:20	-30,2
F.51			10 02	15:20	03:20	-22,6
F.52	I(-3)	Bz	05	16:00	13:20	-30,2

(Continua)

Tabela E.1 - Conclusão

F.53		FLUTUAÇÕES EM Bz E By	23	20:40	05:00	-30,2
F.54			28	08:00	04:00	-45,3
F.55		DENSIDADE?, Bz	29	17:20	08:40	-30,2
F.56			31	21:20	06:40	-30,2
F.57		DENSIDADE, VELOCIDADE	11 01	17:20	08:40	-30,2
F.58	I(0)	FLUTUAÇÕES	03	16:00	02:00	-22,6
F.59	T(-5)	FLUTUAÇÕES	09	13:20	04:20	-37,7
F.60		DENSIDADE, FLUTUAÇÕES EM Bz E By	16	04:40	02:40	-30,2
F.61			12 03	02:40	03:20	-30,2
F.62		Bz	04	03:00	04:40	-30,2

OBS.: I indica incursão de setor e T troca de setor. Quanto ao choque interplanetário, troca e incursão de setor, o número indica o tempo da sua ocorrência em relação ao início da tempestade.