



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.08.16.40-TDI

**VARIAÇÕES NO PICO PRÉ-REVERSÃO DA DERIVA
VERTICAL DO PLASMA SOBRE A REGIÃO
EQUATORIAL BRASILEIRA EM FUNÇÃO DO FLUXO
SOLAR E DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS**

Ângela Machado dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Mangalathayil
Ali Abdu, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 27 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38HU4J8>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLISHED BY:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.08.16.40-TDI

**VARIAÇÕES NO PICO PRÉ-REVERSÃO DA DERIVA
VERTICAL DO PLASMA SOBRE A REGIÃO
EQUATORIAL BRASILEIRA EM FUNÇÃO DO FLUXO
SOLAR E DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS**

Ângela Machado dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Mangalathayil
Ali Abdu, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 27 de agosto de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38HU4J8>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Ângela Machado.
Sa59v Variações no pico pré-reversão da deriva vertical do plasma sobre a região equatorial brasileira em função do fluxo solar e das tempestades magnéticas / Ângela Machado dos Santos. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xxiv+ 147 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.08.16.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Mangalathayil Ali Abdu, e José Humberto Andrade Sobral.

1. Ionosfera. 2. Pico pré-reversão. 3. Deriva vertical. 4. Fluxo solar. 5. Tempestade magnética. I.Título.

CDU 550.338.2

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre**

Dr. Alisson Dal Lago



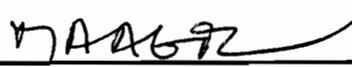
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. José Humberto Andrade Sobral



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Mangalathayi All Abdu



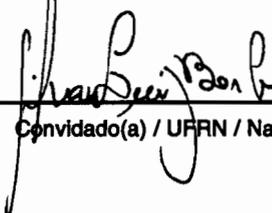
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ezequiel Echer



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gilvan Luiz Borba



Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Aluno (a): Ângela Machado dos Santos

São José dos Campos, 27 de agosto de 2010

"Educar a inteligência é dilatar o horizonte dos seus desejos e das suas necessidades."

(James Russell Lowell)

Ao meu esposo Camilo pelo amor, paciência e compreensão.
À minha família pelo carinho e orações e em especial ao meu Pai que mesmo estando longe
sempre esteve presente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e da inteligência, e pela Sua presença constante na minha vida.

À minha mãezinha querida, a meus irmãos e sobrinhos que mesmo sem entender o que eu estudava sempre se orgulharam e torceram por mim. A meu Pai amado que já faz alguns anos que não o vejo, mas sei que sempre esteve ao meu lado, e a meu esposo Camilo por todo apoio, compreensão, amor e por sempre estar comigo nos momentos mais difíceis.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, CNPq, pelo suporte financeiro e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, pela oportunidade de iniciar meus estudos na área de Geofísica Espacial.

Aos meus orientadores Dr. Mangalathayil Ali Abdu e Dr. José Humberto Andrade Sobral pela orientação e incentivo.

Aos meus professores pelas aulas e discussões que contribuíram para o meu aprendizado.

Aos membros da Banca examinadora, pelas contribuições para a melhoria do trabalho.

À amiga Vivian pela amizade e ajuda nos momentos mais difíceis durante a conclusão deste trabalho, à Maria Goreti dos Santos Aquino pela paciência em me ensinar a trabalhar com os dados de Digissonda e um agradecimento especial à amiga Laysa pela sincera amizade ao longo de todo o tempo em que convivemos. Obrigada pelo constante apoio e por sempre me ajudar nos momentos em que o desânimo me alcançava.

Aos amigos de turma: Laysa, Juliano, Marcos, Caitano, Arian, Rafael e Carlos. Sabemos o quanto foi difícil mais valeu a pena o nosso esforço e dedicação.

Enfim, a todos os meus amigos, pessoas especiais com quem eu tive o privilégio de estar ao lado e que sempre me ajudaram.

RESUMO

Com a análise de dados obtidos pelas digissondas instaladas em São Luís (44.2°W, 2.33°S) e Fortaleza (38.45°W, 3.9°S), foi possível estudar a dependência do pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (Vzp) com o fluxo solar (F10.7) bem como os diversos tipos de influências causadas por uma atividade magnética no Vzp dependendo de sua hora de ocorrência. O período estudado corresponde aos meses de outubro, novembro e dezembro dos anos de 2001 a 2009 para dias calmos e perturbados. Os resultados mostram que a taxa de crescimento do Vzp com o fluxo solar, tanto para São Luís quanto para Fortaleza, é maior para o mês de novembro. A comparação entre os resultados obtidos durante dias calmos e dias perturbados mostrou que a dependência do Vzp com o fluxo solar diminui durante períodos magneticamente perturbados. Em relação à velocidade calculada para os dias em que ocorreram tempestades magnéticas intensas ($Dst < -100nT$), os resultados indicaram que dependendo do atraso entre a ocorrência da tempestade e o pôr-do-sol, o Vzp poderá sofrer algumas modificações que podem ser dirigidas pela ação de campos elétricos de penetração ou do dínamo perturbado. Outro parâmetro analisado durante a ocorrência de uma tempestade magnética foi o desenvolvimento do *spread - F* que por sua vez apresenta grande variabilidade, podendo ter longa ou breve duração e até mesmo apresentar total inibição.

VARIATIONS IN THE EVENING PREREVERSAL VERTICAL PLASMA DRIFTS OVER EQUATORIAL REGION IN BRAZILIAN DUE TO SOLAR FLUX AND MAGNETIC STORMS

ABSTRACT

By analyzing the data obtained from digisondes operated in São Luís (44.2° W, 2.33° S, dip angle: -2.7°) and Fortaleza (38.45° W, 3.9° S, dip angle: -11.5°), a study has been done on the dependence of the evening pre-reversal plasma vertical drift velocity peak (V_{zp}) on the solar flux (F10.7) and on the various types of influences caused by magnetic storm disturbances. The period studied corresponds to the months October, November and December of the years 2001 to 2009 for quiet and disturbed days. The results show that the V_{zp} is strongly dependent on the solar flux and its rate of increase with solar flux is higher in November than in the other months both at São Luís and Fortaleza. The comparison of the results obtained between quiet and disturbed days showed evidence that the V_{zp} dependence on solar flux decreases during magnetically disturbed periods. The results of this study on the vertical plasma drifts during intense magnetic storms ($Dst < -100\text{NT}$), show that depending on the delay between the occurrence of the storm development phase and the local sunset, the V_{zp} may experience significant modifications that can be caused by the action of prompt penetration electric field or by disturbance dynamo effects. Another parameter analyzed during the occurrence of the magnetic storm is the development of *spread - F* which in turn presents great variability in the intensity and duration and even total inhibition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfis verticais de densidade eletrônica na ionosfera de médias e baixas latitudes.....	5
Figura 2.2 - Ilustração das camadas da atmosfera neutra em função da temperatura e as camadas ionosféricas em função do perfil de densidade eletrônica.	7
Figura 3.1 - Eletrodinâmica da região E.....	11
Figura 3.2 - Eletrodinâmica da região F.....	12
Figura 3.3 - Velocidade vertical do íon considerando somente o dínamo da região E (linha sólida), incluindo o dínamo da região F (linha tracejada) e medida típica da velocidade de deriva vertical do plasma para Jicamarca (linha pontilhada).	14
Figura 3.4 - Modelo Simplificado da geração do campo elétrico zonal.....	15
Figura 3.5 – (a) Variações do Vz _p sobre Cachimbo e Campo Grande para o período de outubro a dezembro de 2002; (b) Distribuição do espectro de potência wavelet Morlet do Vz _p para as duas estações; (c) Distribuição espectral wavelet da média diária dos ventos mesosféricos e meridionais para Cachoeira Paulista a 100 km e 95 km.....	17
Figura 3.6 - Velocidade de deriva vertical da camada F sobre Jicamarca, calculada a partir da altura real para as frequências específicas do plasma (4 e 5MHz). A média da velocidade para as duas frequências são plotadas nesta figura. O painel inferior mostra variação do índice Dst para o mês de março de 2000.	18
Figura 3.7 - Pico pré-reverção da velocidade de deriva vertical do plasma (Vz _p) para março de 2000 sobre Jicamarca e as oscilações do Vz _p obtidas através da análise espectral wavelet Morlet.....	19
Figura 3.8 - Velocidade de deriva vertical média sobre Jicamarca durante os equinócios (março-abril; setembro-outubro), inverno (maio-agosto) e verão (novembro-fevereiro) para três diferentes níveis de fluxo solar.	21
Figura 3.9 - Variação do Vz _p com o fluxo solar.	22
Figura 3.10 - Variação do Vz _p em função do fluxo solar para dois níveis de atividade magnética.....	23
Figura 3.11 - Variação da velocidade de deriva vertical média para condições calmas e perturbadas (maio e junho) durante atividade solar mínima.	23
Figura 3.12 - Dependência do Vz _p com o fluxo solar sobre São Luís e Fortaleza para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2001 e 2004.....	24
Figura 3.13 - Ilustração das fases de uma tempestade magnética.	26

Figura 3.14 - Variação sazonal da velocidade de deriva equatorial durante atividade solar máxima (1968-1971) e atividade solar mínima (1975-1976).	27
Figura 3.15 - Campo magnético interplanetário (Bz), índice auroral AU/AL e a velocidade de deriva vertical calculada para as frequências de plasma iguais a 6, 7, 10 e 11 MHz sobre São Luís juntamente com a velocidade para os dias calmos.	29
Figura 3.16 - Campo magnético interplanetário (Bz, índice auroral AE e a velocidade de deriva vertical para Fortaleza calculada para as frequências de plasma iguais a 6, 7 MHz juntamente com a velocidade para os dias calmos.	30
Figura 3.17 - Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.....	31
Figura 3.18 - Índices do eletrojato auroral AU/AL e a velocidade de deriva vertical da camada F para os dias 8-10 de agosto de 1972 para Jicamarca. A curva sólida representa a variação da deriva vertical média durante períodos calmos.	32
Figura 3.19 - Dependência sazonal da velocidade de deriva vertical média do plasma devido a penetração de campos elétricos obtidas pelo satélite ROCSAT-1, seguido de um aumento de 300 nT do índice AE.	33
Figura 3.20 - Dependência sazonal da velocidade deriva vertical média do plasma devido a campos elétricos do dínamo perturbado obtidas pelo satélite ROCSAT-1.....	34
Figura 3.21 - (a) Representação esquemática das condições favoráveis à geração da instabilidade Rayleigh-Taylor. (b) Ilustração da evolução da instabilidade segundo a teoria Rayleigh-Taylor.....	36
Figura 3.22 - Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma sobre a região de Jicamarca, em função do fluxo solar para os casos de forte <i>spread-F</i> (quadrado), fraco <i>spread-F</i> (triângulo) e sem <i>spread-F</i> (círculo).	37
Figura 3.23 – Exemplo de ionograma para Fortaleza mostrando a) <i>spread-F</i> em frequência, b) <i>spread-F</i> em altura e c) <i>spread-F</i> misto.	38
Figura 4.1 - Exemplo de ionograma sobre Fortaleza mostrando o perfil de densidade da ionosfera representado pela curva preta.	43
Figura 4.2 - Fotografias a) antena receptora dos sinais refletidos da ionosfera b) antena transmissora, ambas situadas em São Luís, MA.	46
Figura 4.3 - Configuração do arranjo de quatro antenas.	47
Figura 5.1 - Exemplo da altura real e velocidade de deriva vertical do plasma da camada F obtida através das frequências específicas do plasma (5 e 6 MHz) para o dia 05/10/2001 sobre São Luís.	50

Figura 5.2 - Altura real média da camada F para os meses de outubro, novembro e dezembro obtida através das frequências específicas do plasma (5 e 6 MHz) entre 21 e 22 UT para a) Fortaleza e b) São Luís.....	51
Figura 5.3 - Diferenças observadas entre o Vz _p real e aparente para o mês de dezembro de 2009.	53
Figura 6.1 - Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (Vz _p) sobre Fortaleza (2001-2009, exceto para 2002 por falta de dados) para dias calmos, juntamente com os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro.	58
Figura 6.2 - Comparação entre os ajustes lineares da Figura 6.1 para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre para Fortaleza para dias calmos.....	59
Figura 6.3 – Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (Vz _p) sobre São Luís (2001-2009 exceto 2007 e 2008 por falta de dados), juntamente com os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro.....	60
Figura 6.4 - Comparação entre os ajustes lineares da Figura 6.3 para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís somente para dias calmos.	61
Figura 6.5 - Comparações entre os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro feitos para São Luís e Fortaleza.	62
Figura 6.6 - Comparações dos ajustes lineares entre dias calmos e perturbados para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre Fortaleza.	63
Figura 6.7 - Comparações dos ajustes lineares entre dias calmos e perturbados para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís.....	64
Figura 6.8 - Comportamento da dependência do Vz _p com o fluxo solar para três casos: Vz _p aparente (dias calmos e perturbados), Vz _p real (dias calmos) e Vz _p real (dias calmos e perturbados) sobre a) Fortaleza e b) São Luís.....	67
Figura 6.9 - Comportamento do Vz _p para os meses de outubro à dezembro de 2001-2009 (exceto 2002), sobre a região de Fortaleza.	69
Figura 6.10 - Comportamento do Vz _p para os meses de outubro à dezembro de 2001-2009 (exceto 2007 e 2008), sobre a região de São Luís.....	70
Figura 6.11 - Variabilidade observada no Vz _p durante os meses de outubro a dezembro para os anos de 2001 ($F_{10.7_m} = 216,5$; $Vz_{p_m} = 56\text{m/s}$) e 2008 ($F_{10.7_m} = 67,9$; $Vz_{p_m} = 12\text{ m/s}$) sobre Fortaleza.....	71
Figura 6.12 - Comportamento médio do Vz _p e do fluxo solar para a região de Fortaleza em função do ano.....	72

Figura 6.13 - Comportamento médio do V_{zp} e do fluxo solar para a região de São Luís em função do ano.....	72
Figura 6.14 - Diagrama esquemático ilustrando a deriva causada somente pelos campos elétricos em São Luís e Fortaleza e também os efeitos devido ao vento meridional termosférico em Fortaleza. São mostradas também as possíveis orientações do vento meridional em baixas latitudes.	74
Figura 6.15 - Relação geométrica que representa a) perfeito alinhamento entre a linha do terminadouro solar e as linhas do campo magnético terrestre e b) desalinhamento.....	75
Figura 7.1 - Comportamento do campo magnético interplanetário (curva roxa), índice Dst (curva verde), índice auroral (curva preta), média da velocidade para dias calmos (curva azul), velocidade sobre São Luís (curva vermelha), velocidade sobre Fortaleza (curva magenta) e duração do <i>spread-F</i> (barra horizontal cinza) para o período de 18 a 24 de outubro de 2001.	78
Figura 7.2 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para o dia 19 de outubro 2001.....	79
Figura 7.3 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para os dias 21 e 22 de outubro 2001.....	81
Figura 7.4 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 18 a 24 de outubro de 2001.	83
Figura 7.5 - Similar a Figura 7.1, mas somente para São Luís durante o período de 01 a 07 de outubro de 2002.	84
Figura 7.6 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para o dia 01 de outubro 2002.	85
Figura 7.7 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para os dias 04 e 05 de outubro 2002.....	86
Figura 7.8 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para o dia 07 de outubro 2002.	87
Figura 7.9 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para a tempestade de 01 a 07 de outubro de 2002.....	89
Figura 7.10 – Similar a Figura 7.1, mas para o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003.	90
Figura 7.11 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para o dia 29 de maio de 2003.	91

Figura 7.12 - Isolinhas da altura real da camada para diferentes frequências para os dias 29 e 30 de 2003 sobre Fortaleza.	92
Figura 7.13 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003.....	94
Figura 7.14 - Similar a Figura 7.1, mas somente para Fortaleza durante o período de 18 a 24 de janeiro de 2005.....	95
Figura 7.15 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre Fortaleza para os dias 21 e 22 de janeiro de 2005.....	96
Figura 7.16 - Velocidade do vento solar para os dias 18 a 24 de janeiro de 2001.	96
Figura 7.17 - Isolinhas da altura real da camada F para diferentes frequências para os dias 21 e 22 de janeiro de 2005 sobre Fortaleza e Jicamarca.....	98
Figura 7.18 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 18 a 24 de janeiro de 2005.	100
Figura A1 - Tempestade magnética de 28 a 31 de outubro de 2001	120
Figura A2 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 25 a 31 de outubro de 2001.....	121
Figura A3 - Tempestade magnética de 06 a 09 de novembro de 2001.	123
Figura A4 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 03 a 09 de novembro de 2001.	125
Figura A5 - Tempestade magnética de 24 a 27 de novembro de 2001	127
Figura A6 - Duração do <i>spread-F</i> , pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 21 a 27 de novembro de 2001.	128
Figura A7 - Tempestade magnética de 08 a 14 de outubro de 2002	130
Figura A8 - Duração do <i>spread-F</i> , pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 08 à 14 de outubro de 2002.....	131
Figura A9 - Tempestade magnética de 17 a 22 de abril de 2002	133
Figura A10 - Duração do <i>spread-F</i> , pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 16 à 22 de abril de 2002.	134
Figura A11 - Tempestade magnética de 07 a 11 de setembro de 2002.....	136
Figura A12 - Duração do <i>spread-F</i> , pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 05 a 11 de novembro de 2002.	137
Figura A13 - Tempestade magnética de 20 a 23 de novembro de 2003.	139
Figura A14 - Duração do <i>spread-F</i> , pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 17 a 24 de novembro de 2003.	140

FiguraA15 - Tempestade magnética de 21 a 24 de outubro de 2001.	141
Figura A16 - Tempestade magnética de 01 a 07 de outubro de 2002	142
Figura A17 - Tempestade magnética de 29 de maio a 01 de junho de 2003.....	143
Figura A18 - Tempestade magnética de 21 a 24 de janeiro de 2005.....	144

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	3
ATMOSFERA TERRESTRE	3
2.1 Atmosfera neutra	3
2.2 Ionosfera	4
2.2.1 Regiões ionosféricas	5
CAPÍTULO 3	9
DERIVA VERTICAL IONOSFÉRICA	9
3.1 Dínamo da Região E	9
3.2 Dínamo da Região F	12
3.3 A intensificação do campo elétrico zonal	13
3.4 Variabilidades observadas na intensificação do campo elétrico zonal	15
3.4.1 Propagação de ondas planetárias	16
3.4.2 Fluxo solar (F10.7)	19
3.4.3 Tempestades magnéticas	25
3.4.3.1 Penetração de campos elétricos magnetosféricos	28
3.4.3.2 Campo elétrico do dínamo perturbado	31
3.5 Intensificação da deriva vertical noturna e o desenvolvimento do <i>spread-F</i>	35
CAPÍTULO 4	39
INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	39
4.1 Princípios de funcionamento das digissondas	39
4.2 Pré-processamento dos dados e o Ionograma	41
CAPÍTULO 5	49
METODOLOGIA	49
CAPÍTULO 6	57
RESULTADOS I: COMPORTAMENTO DO V_{zp} EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR	57
6.1 Dependência do V_{zp} real com Fluxo Solar (F10.7) para dias calmos - Fortaleza	57
6.2 Dependência do V_{zp} com Fluxo Solar (F10.7) para dias calmos– São Luís	59
6.3 Comparações entre os ajustes lineares do V_{zp} para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís e Fortaleza para dias calmos	62

6.4	Comparações entre os ajustes lineares do Vz _p para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís e Fortaleza entre dias calmos e perturbados..	63
6.5	Variabilidade diária observada no Vz _p	69
6.6	Comportamento anual do Vz _{p_m} (Vz _p médio) e do F10.7 _m (F10.7 médio)	71
6.7	Discussão	73
6.7.1	Efeitos do vento meridional termosférico no Vz _p	73
6.7.2	Efeitos da declinação magnética no Vz _p	74
CAPÍTULO 7		77
RESULTADOS II: EFEITO DA TEMPESTADE MAGNÉTICA EM Vz_p		77
7.1	Tempestade Magnética de 21 a 24 outubro de 2001	77
7.1.1	Duração do <i>spread-F</i> durante o período de 18 a 24 de outubro de 2001	82
7.2	Tempestade Magnética de 01 a 07 outubro de 2002	83
7.2.1	Duração do <i>spread-F</i> durante a tempestade magnética de 01 a 07 de outubro de 2002	88
7.3	Tempestade Magnética de 29 de maio a 01 de junho de 2003	89
7.3.1	Duração do <i>spread-F</i> durante o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003	92
7.4	Tempestade Magnética de 18 a 24 de janeiro de 2005.....	94
7.4.1	Duração do <i>spread-F</i> durante a tempestade magnética de 18 a 24 de janeiro de 2005	99
7.5	Comportamento geral do Vz _p para todas as tempestades magnéticas estudadas	100
CAPÍTULO 8		107
CONCLUSÕES.....		107
8.1	Conclusões sobre a dependência do Vz _p com o fluxo solar	107
8.2	Conclusões sobre a os efeitos causados em Vz _p devido à atividade magnética	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113
APÊNDICE A		119
A1.	Tempestade magnética de 28 a 31 de outubro de 2001	119
A1.1	Duração do <i>spread-F</i> durante período de 25 a 31 de outubro de 2001	121
A2	Tempestade Magnética de 05 a 09 de novembro de 2001.....	121
A2.1	Duração do <i>spread-F</i> durante período de 03 a 09 de novembro de 2001....	124
A3	Tempestade Magnética de 24 a 27 de novembro de 2001.....	125
A3.1	Duração do <i>spread-F</i> durante período de 21 a 27 de novembro de 2001....	128
A4.	Tempestade Magnética de 08-14 de outubro de 2002.....	129

A4.1 Duração do <i>spread-F</i> durante período de 08 a 14 de outubro de 2002	131
A5. Tempestade Magnética de 17- 22 de abril de 2002	132
A5.1 Duração do <i>spread-F</i> durante período de 16-22 de abril de 2002.....	134
A6. Tempestade Magnética de 07 a 11 de setembro de 2002	135
A6.1 Duração do <i>spread-F</i> durante período de 05-11 de setembro de 2002.....	137
A7. Tempestade Magnética de 20 a 23 de novembro de 2003.....	138
A7.1 Duração do <i>spread-F</i> durante período de 17 a 23 de novembro de 2003....	140

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os campos elétricos e a deriva do plasma são parâmetros essenciais para se entender a dinâmica da ionosfera terrestre. A deriva vertical da camada F é controlada por uma complexa interação entre as regiões E e F. Durante o dia, a fonte do campo elétrico que causa a subida da camada F é o campo elétrico do dínamo da região E que é mapeado para a região F através da alta condutividade das linhas de campo geomagnético. Durante a noite, o acoplamento entre as regiões E e F diminui devido ao decréscimo da condutividade na região E e então campos elétricos de polarização são estabelecidos na região F. O campo elétrico zonal que é dirigido para leste durante o dia, juntamente com o campo geomagnético, causa uma deriva vertical do plasma para cima e antes de inverter sua direção para oeste (durante a noite), se intensifica nos horários próximos ao pôr-do-sol. Essa intensificação também pode ser vista na velocidade de deriva vertical do plasma (V_z) uma vez que essa é representativa do campo elétrico zonal.

Acredita-se que essa importante característica observada na região F equatorial, ou seja, a intensificação da velocidade de deriva vertical do plasma nas horas do pôr-do-sol, seja causada principalmente pelos efeitos do dínamo da região F e é mais pronunciada durante o equinócio e verão, tendo grandes variabilidades dia-a-dia e com o ciclo solar (Rishbeth, 1971; Heelis et al., 1974 e Farley et al., 1986) e também pode ser vista como sendo o resultado do decréscimo na condutividade ionosférica na região E após o pôr-do-sol (Farley et al., 1986).

Estudos anteriores mostram que a velocidade de deriva vertical da camada F ao entardecer aumenta linearmente com o fluxo solar, mas decresce rapidamente com a atividade magnética. Já a velocidade vertical durante o dia mostra-se independente da estação do ano, ciclo solar e atividade magnética. O aumento do pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma com a atividade solar é consequência do aumento correspondente dos ventos zonais equatoriais com o fluxo solar e a razão entre a condutividade Pedersen das regiões E e F (Fejer et al., 1991), bem como o aumento no gradiente da condutividade na região E próximo ao setor noturno entre a atividade solar mínima e a máxima (Goel et al., 1990).

Nesse trabalho, o capítulo 2 apresentará alguns conceitos básicos sobre o ambiente focalizado em nosso estudo, ou seja, a atmosfera terrestre e em específico a ionosfera.

No capítulo 3 apresenta-se a teoria que explica a deriva vertical ionosférica e a intensificação do campo elétrico zonal, também conhecido como PRE (*evening prereversal electric field enhancement*). Apresentam-se também razões pelas quais o PRE sofre grandes variabilidades, sendo elas em pequena ou grande escala.

A instrumentação utilizada na coleta de dados para o cálculo da velocidade de deriva é apresentada no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta a metodologia utilizada na obtenção da velocidade de deriva vertical do plasma.

O capítulo 6 apresenta a análise dos resultados obtidos em relação à dependência do V_{zp} com o fluxo solar.

O capítulo 7 apresenta os resultados referentes aos efeitos que o V_{zp} pode sofrer durante uma atividade magnética.

Finalmente no capítulo 8 apresentam-se as conclusões finais dessa dissertação.

CAPÍTULO 2

ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é composta por uma mistura de gases mantida pela gravidade que circundam o planeta Terra e pode ser dividida em quatro regiões distintas de acordo com suas características de temperatura. É na região delimitada pela termosfera que está localizada a ionosfera, ambiente na qual o estudo proposto se refere.

2.1 Atmosfera neutra

As regiões da atmosfera neutra podem ser classificadas de acordo com seu gradiente de temperatura, sendo elas: troposfera (da superfície até ~ 15 km de altura), estratosfera (~ 15km a ~ 50 km de altura), mesosfera (~ 50 km a ~ 90 km de altura) e termosfera (acima de ~ 100 km de altura).

- **Troposfera:** Região mais baixa da atmosfera que apresenta uma composição uniforme e temperatura decrescente com a altura a uma taxa da ordem de 10 K/km. A absorção e emissão da radiação infravermelha pelas moléculas de vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio fornecem uma eficiente transferência de energia para diferentes níveis desta região (Rishbeth e Garriot, 1969).
- **Estratosfera:** Região caracterizada pelo aumento da temperatura com a altura, e isto se deve primeiramente a absorção da radiação ultravioleta pelo ozônio e pelo vapor d'água. A temperatura atinge um valor máximo por volta dos 50 km de altura.
- **Mesosfera:** A temperatura volta a decrescer com a altura atingindo um mínimo por volta de 85 km. Esta região é considerada a mais fria da atmosfera terrestre atingindo uma temperatura mínima de ~ 180 K.
- **Termosfera:** A temperatura nessa região aumenta assintoticamente até alcançar um valor relativamente constante nos níveis mais altos. A alta temperatura pode ser explicada através da absorção pela termosfera da radiação ultravioleta solar e dos raios-X em altas altitudes, pela absorção de partículas energéticas que

entram na atmosfera, pelo aquecimento por efeito Joule, pelas correntes elétricas ionosféricas e também, pela ausência de um meio efetivo de dissipação de energia.

As fronteiras entre as camadas, ou seja, onde as temperaturas alcançam seus máximos ou mínimos, são chamadas “pausas”. Assim, temos a tropopausa, estratopausa e mesopausa.

2.2 Ionosfera

A ionosfera é uma região ionizada da atmosfera superior terrestre onde a presença de elétrons e íons são suficientes para afetar a propagação de ondas de rádio. Esta região ionizada se estende de ~ 60 km a 1000 km de altura e é formada pela ação de agentes ionizantes solares e cósmicos sobre os componentes atômicos e moleculares da atmosfera neutra.

A principal fonte do plasma ionosférico decorre da fotoionização dos componentes neutros atmosféricos promovidos pela radiação solar (raios X e EUV) (Rishbeth e Garriot, 1969). Neste caso, os fótons com energias superiores a 12 eV podem arrancar os elétrons das orbitas dos átomos neutros ao mesmo tempo em que são responsáveis por manter a alta temperatura da termosfera. O fóton ao alcançar um átomo neutro transfere sua energia para um elétron do átomo. Esse elétron, por sua vez, torna-se energizado e com energia suficiente para se separar do átomo, tornando-o um íon positivo e gerando assim o par fotoelétron/íon. Devido às colisões com íons, moléculas neutras e outros elétrons, os fotoelétrons vão perdendo sua energia e então entram em equilíbrio térmico, contribuindo assim para o aquecimento do plasma ionosférico. Esse processo de fotoionização atinge um máximo próximo ao meio-dia local. A ionização também pode acontecer através de um processo dito secundário, no qual as partículas ionizadas, com energia cinética elevada, causam a ionização através das colisões com partículas neutras.

Os processos de perda da ionização sempre acontecem na ionosfera. Na ionosfera superior, ocorre o processo de recombinação iônica, na qual os elétrons recombina-se com os íons formando átomos neutros. A taxa de recombinação decai rapidamente com o aumento de altura. Já na ionosfera inferior ocorre o processo de junção eletrônica,

átomos neutros se juntam aos elétrons formando os íons negativos. Embora ainda existam, os processos de perda não são suficientes para eliminar completamente os elétrons do plasma ionosférico devido à ionização constante de fontes ionizantes cósmicas e dos processos corpusculares. O resultado entre os processos de ionização e perda iônica, juntamente com a dinâmica da região ionosférica, determinam o perfil de densidade eletrônica com comportamentos distintos em sua estrutura vertical dependendo da radiação ionizante, sazonalidade, latitude, bem como diferenças entre o dia e a noite, como ilustrado na Figura 2.1.

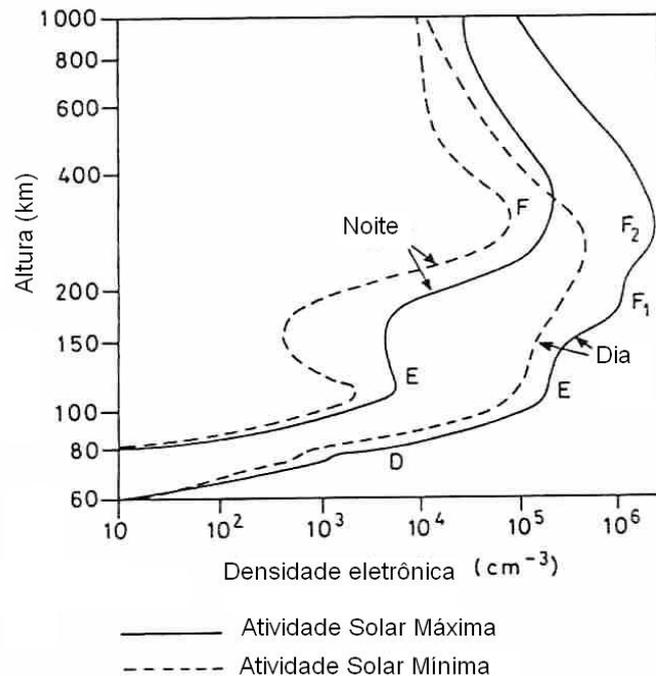


Figura 2.1 - Perfis verticais de densidade eletrônica na ionosfera de médias e baixas latitudes.
 FONTE: Adaptada de Hargreaves (1992).

2.2.1 Regiões ionosféricas

Como resultado dos processos de ionização dominantes em cada faixa de altura e as dinâmicas envolvidas nos processos de perda, a ionosfera pode se dividir em três regiões distintas, que são governadas por processos químicos e físicos diferentes. Essas regiões podem ser determinadas a partir de três máximos na densidade eletrônica localizadas em ~ 80, 105 e 300 km e são classificadas como região D, região E e região F.

- **Região D:** Situada na parte inferior da ionosfera até ~ 90 km de altura. Essa região apresenta uma complexidade química nos seus processos fotoquímicos e pode ser caracterizada pela pequena densidade de ionização e pela alta

frequência de colisões de elétrons com íons e partículas neutras. Há três fontes de ionização nessa região, sendo elas os raios-X, os raios cósmicos e a radiação Lyman- α , que ioniza somente o óxido nítrico (NO). Os processos químicos presentes nessa região são bastante complexos e envolvem o O, O₂, O₃, NO, NO₂, CO₂, H₂O e metais alcalinos. A presença de íons negativos na região D é expressiva e são gerados através de reações do tipo junção eletrônica. A perda de íons nessa região é quadrática: $L(n^+) = \alpha n_e^2$, em que α é o coeficiente de recombinação efetiva.

- **Região E:** Situada entre 90-150 km de altura, é caracterizada pelo aumento da densidade eletrônica entre 90 a 110 km. Essa região de alta condutividade elétrica é muito importante devido à presença de correntes elétricas ionosféricas e a interação dessas correntes com o campo magnético da Terra. A região E se divide em camada E2, mais densa, e camada Es, esporádica, pouco densa e instável. As principais fontes ionizantes são: raios-X fracos ($\lambda > 10 \text{ \AA}$), radiação solar Lyman- β (1025,7 \AA) e EUV (<1000 \AA) ionizando o O₂, EUV (< 900 \AA) ionizando o N₂, e processos corpusculares: elétrons de 1 keV e 30 keV. No período noturno, esses elétrons com energias entre 1 keV e 30 keV dão origem a camada E noturna e E esporádica. Durante o dia, a região E apresenta uma concentração da ordem de 10^{11} elétrons/m³ e diminui sensivelmente à noite. Nessa região os principais processos de perda da ionização são: a recombinação eletrônica dissociativa, troca de cargas e processos de perda quadrática: $L(n^+) = \alpha n_e^2$, onde α é o coeficiente de recombinação efetiva.
- **Região F:** Situada entre 150-1000 km de altura. Tem como principais fontes ionizantes a radiação solar (EUV), Lyman contínuo e as linhas do hidrogênio. O íon dominante é o O⁺. A região F pode ser caracterizada mediante duas outras camadas, F1 e F2. Na região equatorial pode surgir uma terceira camada, denominada F3. A camada F1 é definida a partir de uma inflexão na curva de densidade eletrônica em torno de 180 km. É nessa região que ocorre a transição entre os processos de perda quadrática e a linear. A camada F2 localiza-se nas vizinhanças do pico de densidade eletrônica (~ 300 – 400 km), e é a região de maior densidade/produção eletrônica da ionosfera. Sua formação é predominantemente dependente da difusão e sua concentração eletrônica varia

com a atividade solar. A maior concentração de elétrons livres pode ser observada durante o dia, principalmente ao meio-dia local e nas primeiras horas da tarde. Durante a noite, essa concentração diminui, mas a camada não desaparece devido aos efeitos de difusão. A camada F3, que surge acima da F2, aparece durante as primeiras horas da manhã (1030LT) em latitudes equatoriais. Sua formação se deve à deriva causada por $E \times B$ que eleva o pico de ionização para maiores altitudes, excedendo assim o pico da camada F2 e também pode estar relacionada com o efeito dos ventos neutros.

A Figura 2.2 mostra a ionosfera junto à termosfera, bem como a densidade eletrônica das camadas D, E, F1 e F2.

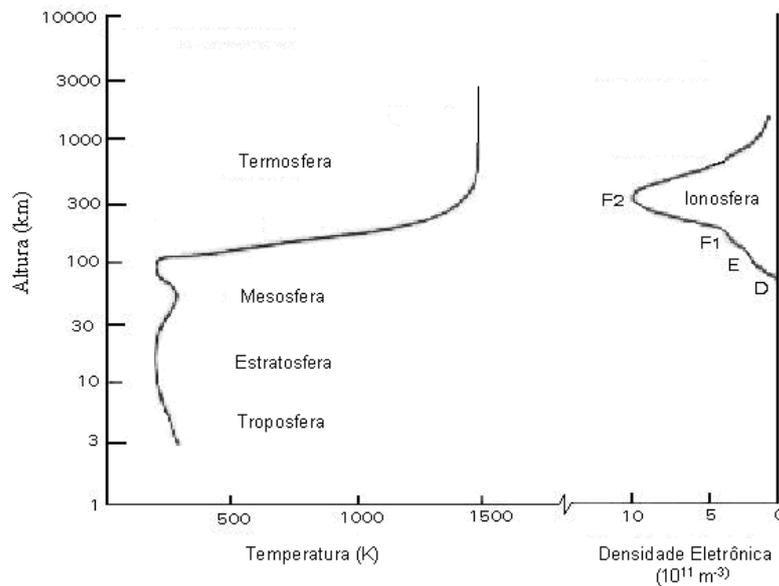


Figura 2.2 - Ilustração das camadas da atmosfera neutra em função da temperatura e as camadas ionosféricas em função do perfil de densidade eletrônica.

FONTE: Adaptada de Rishbeth e Garriott (1969).

CAPÍTULO 3

DERIVA VERTICAL IONOSFÉRICA

A deriva vertical ionosférica da camada F é produzida pela interação do plasma com o campo elétrico zonal e o campo magnético da Terra, e pode variar sua intensidade, por exemplo, de acordo com o fluxo solar, fato observado principalmente ao entardecer e à noite. O campo elétrico zonal, que durante as horas do dia é para leste, sofre uma intensificação no horário do pôr-do-sol antes da sua reversão para oeste. Essa intensificação apresenta grandes variabilidades e estas podem ser atribuídas a vários fatores, tais como propagação de ondas planetárias (Abdu et al., 2006a), penetração de campos elétricos, campo elétrico do dínamo perturbado (Sastri et al., 1997, Abdu et al., 1997, Sobral et al., 1997, Fejer and Scherliess, 1997, Richmond et al., 2003), ventos perturbados durante tempestades magnéticas (Abdu et al., 1995) e também pela variabilidade no fluxo solar. (Fejer et al., 1979 e 1991; Batista et al., 1996).

Estudos anteriores mostram que alguns fatores podem influenciar diretamente ou indiretamente a geração da intensificação do campo elétrico zonal, sendo eles: o vento zonal termosférico para leste que ativa o dínamo da camada F na presença de um gradiente de hora local/longitudinal na condutividade da camada E (Rishbeth, 1971; Heelis et al., 1974, Farley et al., 1986; Batista et al., 1986b) e a divergência na corrente do eletrojato equatorial que existe nas horas do pôr-do-sol. Os campos elétricos que controlam a deriva vertical do plasma são originados devido a uma complexa interação entre as regiões E e F que apresentam comportamentos diferentes do dia para noite e que serão detalhados a seguir.

3.1 Dínamo da Região E

Conforme citado por Heelis et al., (1974), os campos elétricos da região E são gerados pelo dínamo ionosférico dirigidos pelos ventos de maré atmosférica. Esses ventos, que são estabelecidos pela absorção da radiação solar na estratosfera e troposfera, afetam o movimento das partículas carregadas. Íons e elétrons assumem um movimento ciclotrônico na presença do campo magnético (\vec{B}). A interação entre os ventos de maré ($\vec{U}_{maré}$) e \vec{B} dá origem a um movimento relativo entre os íons e elétrons. Surge então

um campo elétrico induzido devido à $\vec{U}_{maré} \times \vec{B}$. A corrente induzida associada a esse campo não é estacionária, ou seja, $\nabla \cdot \vec{J} \neq 0$. Isso faz com que campos elétricos de polarização (\vec{E}_p) sejam estabelecidos na região E, fazendo com que a corrente não apresente nenhuma divergência. O campo elétrico total dessa região ionosférica fica sendo:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_p + (\vec{U}_{maré} \times \vec{B}). \quad (3.1)$$

A corrente elétrica que flui na mesma direção do campo elétrico pode ser escrita como:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3.2)$$

onde σ é o tensor condutividade elétrica.

Substituindo a equação (3.1) em (3.2) temos:

$$\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{E}_p + \vec{U}_{maré} \times \vec{B}), \quad (3.3)$$

tomando o divergente da equação (3.3) chegamos à conclusão de que a corrente que flui num condutor, que neste caso é a região E, não é divergente, ou seja:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \cdot (\vec{E}_p + \vec{U}_{maré} \times \vec{B})) = 0. \quad (3.4)$$

De acordo com Kelley (2008), a física do dínamo da região E pode ser entendida considerando essa região como sendo uma placa fina e condutora, onde um fluxo de corrente está confinado entre 90 e 140 km de altura. Essa região está sujeita a um campo elétrico zonal constante \vec{E}_x , perpendicular a \vec{B} , como mostrado na Figura 3.1.

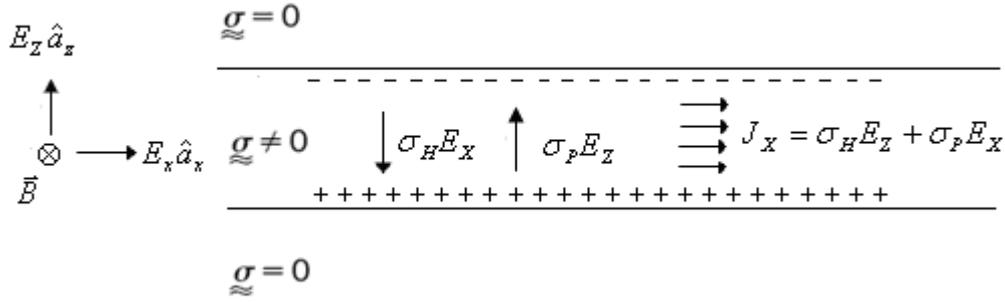


Figura 3.1 - Eletrodinâmica da região E.
 FONTE: Modificada de Kelley (2008).

Como o campo magnético e o campo elétrico são perpendiculares entre si, surgem dois tipos de correntes na região E equatorial, denominadas como Hall e Pedersen. A corrente Hall ($\sigma_H E_x$) flui na direção perpendicular tanto a \vec{B} quanto a \vec{E}_x . Já a corrente Pedersen ($\sigma_P E_x$) flui paralelamente ao campo elétrico zonal \vec{E}_x e perpendicular a \vec{B} . A corrente Hall não pode fluir através da fronteira e então há um acúmulo de cargas nos limites da camada E. Em resposta a esse acúmulo de cargas surge um campo elétrico de polarização ($E_z \hat{a}_z$). Associado a este campo de polarização surgem às correntes Hall ($\sigma_H E_z$) e Pedersen ($\sigma_P E_z$). Num estado estacionário, considera-se que as correntes verticais não conseguem fluir, ou seja, $\sigma_H E_x$ cancela $\sigma_P E_z$ implicando em:

$$\sigma_H E_x = \sigma_P E_z, \tag{3.5}$$

isolando \vec{E}_z da equação (3.5) temos:

$$E_z = \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_P} \right) \vec{E}_x. \tag{3.6}$$

Na direção horizontal as correntes se somam e formam então uma corrente intensificada denominada por eletrojato equatorial:

$$J_x = \sigma_H E_z + \sigma_P E_x. \tag{3.7}$$

Substituindo a equação (3.6) em (3.7) temos:

$$J_x = \left[\left(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_P^2} \right) + 1 \right] \sigma_P E_x = \sigma_C E_x, \quad (3.8)$$

onde σ_C é chamado de condutividade Cowling. O eletrojato equatorial é determinado pelos ventos de maré global que criam a componente do campo elétrico zonal diurno medido no equador.

3.2 Dínamo da Região F

Enquanto os campos elétricos do dínamo da região E são gerados pelos ventos associados com as ondas de maré e o campo gravitacional lunar, o vento termosférico é o responsável pelos campos elétricos do dínamo na camada F e resulta das marés térmicas solares vindas da absorção solar na faixa do EUV na termosfera (Abdu, 2005).

A Figura 3.2 ilustra a eletrodinâmica da região F. Os ventos induzem o movimento das partículas carregadas na direção de $\vec{U} \times \vec{B}$. O movimento gerado na direção perpendicular tanto ao campo magnético como ao próprio vento, dá origem a uma corrente elétrica que tende a estabelecer um campo de polarização denominado na Figura 3.2 por \vec{E} .

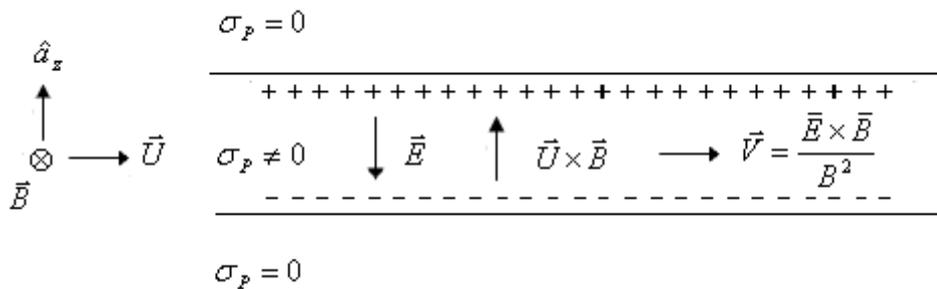


Figura 3.2 - Eletrodinâmica da região F.
 FONTE: Modificada de Kelley (2008).

Como durante o dia a condutividade da região E é apreciável e como os elétrons apresentam alta mobilidade através das linhas de campo magnético, que se comportam como bons condutores, este campo elétrico de polarização é descarregado por correntes

que fluem ao longo das linhas \vec{B} e através da região E, e assim fecha-se o circuito de correntes entre as camadas E e F. Durante a noite, quando a condutividade da região E diminui drasticamente, o circuito não se fecha e isso dá origem a campos elétricos de polarização que resultam num movimento zonal do plasma (Rishbeth, 1971, Woodman, 1972, Heelis et al., 1974, citado por Batista et al., 1986a). Este movimento pode ser representado pela equação:

$$\vec{V} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}. \quad (3.9)$$

3.3 A intensificação do campo elétrico zonal

A intensificação da deriva vertical do plasma nas horas do pôr-do-sol é produzida pela intensificação do campo elétrico zonal (PRE). Acredita-se que esta intensificação seja causada principalmente pelo dínamo da região F que é mais pronunciado durante o equinócio e no verão e apresenta grande variabilidade dia-a-dia e com o ciclo solar (Fejer et al., 1991). Tudo o que é preciso para manter a intensificação do campo elétrico zonal é um vento soprando na direção leste no momento em que a condutividade da região E diminui e isto acontece durante o pôr-do-sol na região E (Farley et al., 1986).

O acoplamento entre as regiões E e F via linhas de campo magnético é fundamental para entender o PRE. Um exemplo disso pode ser visto na Figura 3.3 na qual é apresentada a velocidade vertical do íon na região F (equivalente ao campo elétrico zonal), de acordo com o modelo proposto por Heelis et al., (1974) e uma média típica da velocidade de deriva vertical do plasma para a região de Jicamarca. A velocidade a partir do modelo foi baseada em duas situações, sendo elas:

- **1º caso:** considera-se somente o dínamo da região E (linha sólida);
- **2º caso:** inclui-se o dínamo da região F (linha tracejada);

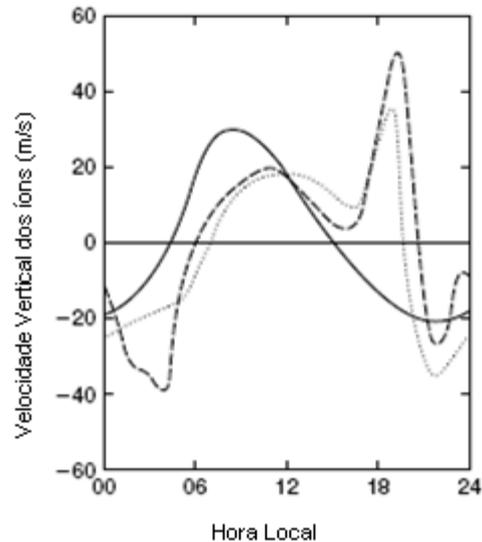


Figura 3.3 - Velocidade vertical do íon considerando somente o dínamo da região E (linha sólida), incluindo o dínamo da região F (linha tracejada) e medida típica da velocidade de deriva vertical do plasma para Jicamarca (linha pontilhada).
 FONTE: Modificada de Heelis et al. (1974).

Nota-se que o comportamento da velocidade vertical dos íons foi bem modelado durante o dia quando comparada com a velocidade obtida a partir de dados experimentais sobre Jicamarca (linha pontilhada). No entanto, para as horas em que ocorre o PRE, somente no caso em que foi incluído o dínamo da região F (linha tracejada) a velocidade a partir do modelo aproximou-se melhor dos dados experimentais. Isso confirma claramente que a intensificação da velocidade ou do campo elétrico zonal é um efeito do dínamo da região F no momento em que a condutividade da região E diminui drasticamente.

A Figura 3.4 mostra como ocorre à intensificação do campo elétrico zonal. São feitas as seguintes considerações:

- o vento termosférico que se direciona através do terminadouro solar, gera um campo elétrico $E_z \cong -\vec{U} \times \vec{B}$ na região F (Farley et al., 1986);
- o campo E_z é mapeado ao longo das linhas do campo geomagnético para a região E em sentido ao equador;
- este campo elétrico mapeado gera uma corrente Hall zonal para oeste $J_{\theta\phi}$;
- com a queda da condutividade na região E, cria-se um acúmulo de cargas negativas próximo ao terminadouro solar e isto induz um campo elétrico zonal

para leste/oeste (E_ϕ) no período diurno/noturno a fim de se de manter equilíbrio eletrostático;

- o campo E_ϕ cria uma corrente Pedersen $J_{\phi\phi}$ que anula $J_{\theta\phi}$ num estado estacionário, e assim E_ϕ é mapeado para a região F produzindo um aumento súbito na deriva vertical do plasma ao entardecer.

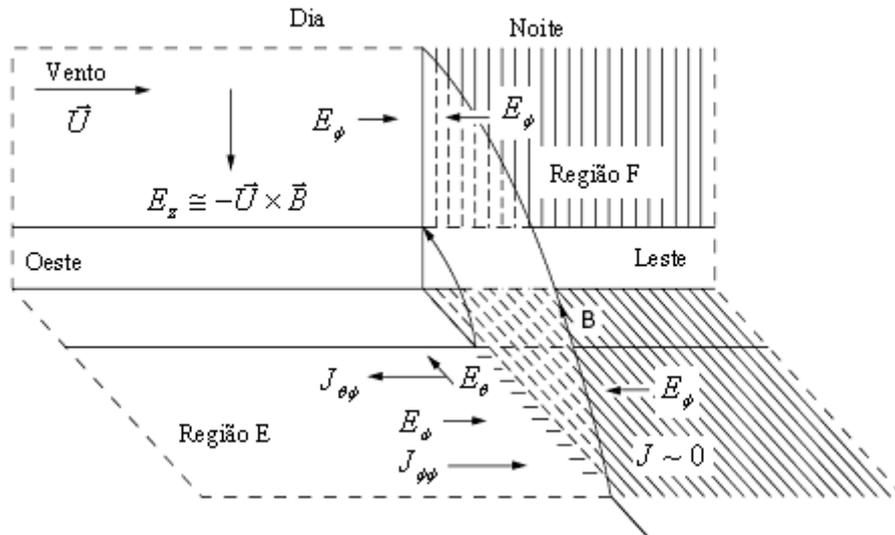


Figura 3.4 - Modelo Simplificado da geração do campo elétrico zonal.
 FONTE: Modificada de Farley et al. (1986).

O vento termosférico (\vec{U}) indicado na Figura 3.4, é gerado pela radiação solar acima de 200 km e é acionado pelo gradiente horizontal de pressão (resultado da expansão térmica da atmosfera terrestre que ocorre durante o dia devido ao aquecimento pela absorção da radiação solar na faixa do EUV). Sua direção é sempre da zona de alta pressão para baixa, ou seja, do lado diurno para o noturno.

De acordo com Kelley (2008), o campo elétrico E_z é $\sim 90\%$ menor durante o dia em relação a noite devido ao efeito de curto-circuito, no entanto nunca é zero.

3.4 Variabilidades observadas na intensificação do campo elétrico zonal

Como dito anteriormente, a intensificação do campo elétrico zonal apresenta grandes variabilidades e estas podem ser atribuídas a vários fatores, tais como a propagação de ondas planetárias, variabilidade no fluxo solar, penetração de campos elétricos de origem magnetosférica, campo elétrico devido ao dínamo perturbado e também o grau

de alinhamento do terminadouro solar com o meridiano magnético (discutido no capítulo 6).

3.4.1 Propagação de ondas planetárias

Os processos de acoplamento vertical do sistema ionosfera-termosfera equatorial através das ondas atmosféricas (ondas planetárias e ondas de maré), que se propagam para alturas ionosféricas vindas de regiões mais baixas de onde são formadas (troposfera-estratosfera) e os processos interativos que as envolvem, controlam a dinâmica e a fenomenologia dos dias calmos. Acredita-se que esses processos interativos envolvendo tais ondas desenvolvem um papel importante nas variabilidades dia-a-dia e de curto prazo que podem ser observadas na corrente do eletrojato equatorial, no campo elétrico zonal de pré-reversão e na deriva do plasma (Abdu et al., 2006b).

Um estudo feito por Abdu et al., (2006a) mostrou que a influência da propagação de ondas planetárias no campo elétrico zonal tem importantes consequências na geração do *spread-F*, que é primeiramente dirigido por esse campo elétrico.

A Figura 3.5 mostra o pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical (V_{zp}) calculado para Cachimbo (9.47° S, 54.83° W, dip: -3°) e Campo Grande (20.44° S, 54.64° W, dip: -22°) para os meses de outubro a dezembro de 2002, os espectros de potência wavelet Morlet do V_{zp} e o vento zonal e meridional para Cachoeira Paulista (95 e 100 km).

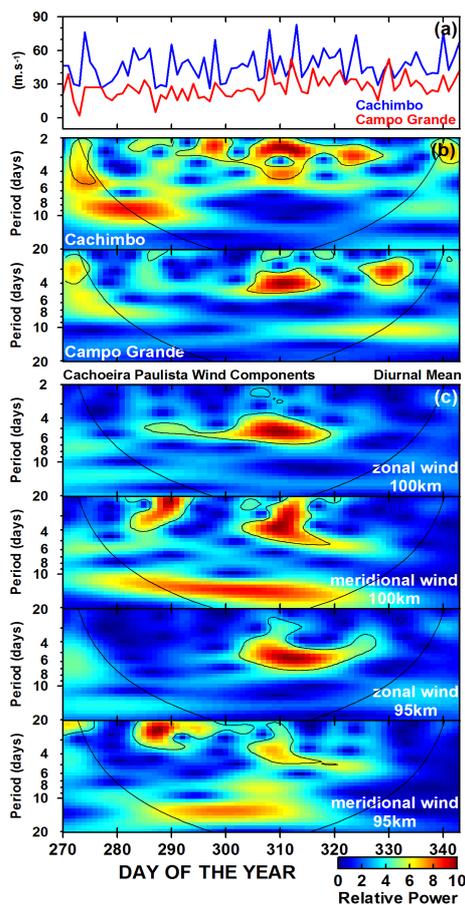


Figura 3.5 – (a) Variações do Vzp sobre Cachimbo e Campo Grande para o período de outubro a dezembro de 2002; (b) Distribuição do espectro de potência wavelet Morlet do Vzp para as duas estações; (c) Distribuição espectral wavelet da média diária dos ventos mesosféricos e meridionais para Cachoeira Paulista a 100 km e 95 km. FONTE: Abdu et al. (2006a).

Em alguns dias a amplitude do Vzp atinge 80 m/s sobre Cachimbo e 50 m/s sobre Campo Grande. Nota-se que ondas planetárias com períodos variando de ~ 2 a 7 dias que estão presentes no Vzp, estão presentes também nos ventos de Cachoeira Paulista. Segundo os autores deste trabalho, nenhuma atividade magnética foi observada para os dias analisados. Sendo assim, é possível que a queda na condutividade da região E imediatamente após o pôr-do-sol e seu gradiente com hora local/longitudinal produzida por mudanças nos ventos da região E, poderiam causar oscilações significantes no PRE. Essas oscilações nos ventos de maré na região E são possivelmente moduladas pela propagação de ondas planetárias que se propagam para cima, detectadas nos ventos da mesosfera medidos pelo radar meteorológico.

Outro exemplo pode ser visto na Figura 3.6, onde são apresentados os valores do índice Dst (*Disturbance Storm Time*) e da velocidade de deriva vertical do plasma sobre

Jicamarca para março de 2000. A velocidade é maximizada às 19 LT e os valores do V_{zp} são típicos da época de alta atividade solar para esta localidade e variando de 20 a 70 m/s. Considerando que o nível de atividade magnética, representado pelo índice Dst, apresenta comportamento típico de dias calmos, acredita-se que as oscilações causadas no V_{zp} sejam atribuídas aos efeitos induzidos pelas ondas planetárias na ionosfera.

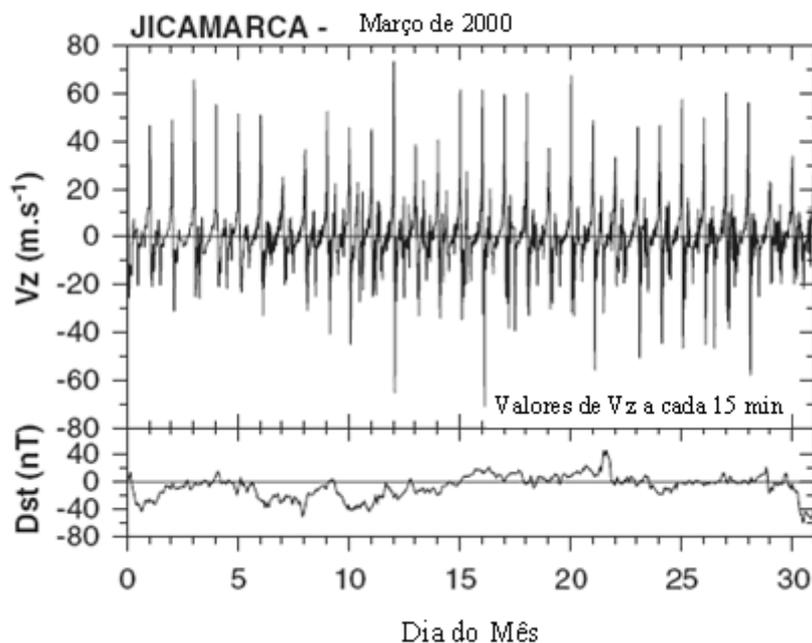


Figura 3.6 - Velocidade de deriva vertical da camada F sobre Jicamarca, calculada a partir da altura real para as frequências específicas do plasma (4 e 5MHz). A média da velocidade para as duas frequências são plotadas nesta figura. O painel inferior mostra variação do índice Dst para o mês de março de 2000.

FONTE: Modificada de Abdu et al. (2006b)

Os valores do pico de velocidade para o mês de março de 2000 da Figura 3.6 podem ser vistos na Figura 3.7 e foram sujeitos a análise de wavelet Morlet. Observam-se amplitudes significativas de 3 a 7 dias durante a segunda semana de março e ondas com períodos de 2 a 3, 4 a 5 e 7 a 8 dias na terceira semana do mês. Nota-se que distúrbios na propagação de ondas planetárias são capazes de modelar a intensidade do V_{zp} da região F (Abdu et al., 2006b).

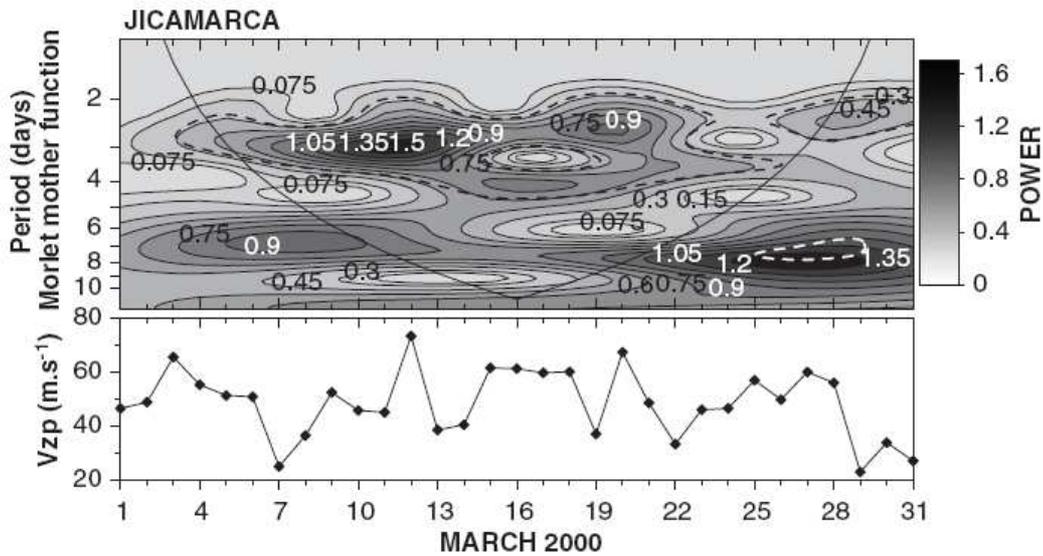


Figura 3.7 - Pico pré-reverção da velocidade de deriva vertical do plasma (Vzp) para março de 2000 sobre Jicamarca e as oscilações do Vzp obtidas através da análise espectral wavelet Morlet.
 FONTE: Abdu et al. (2006b)

3.4.2 Fluxo solar (F10.7)

O índice F10.7 é uma medida de emissão do fluxo de radiação solar em um comprimento de onda igual a 10,7 cm (2800MHz, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) monitorado rotineiramente pelos receptores localizados na superfície da Terra. Este índice é representativo do fluxo de radiação solar ultravioleta responsável pela ionização e aquecimento da termosfera. Ele também se relaciona com o número de manchas solares que é obtido através da contagem no número de manchas individuais e dos grupos de manchas, e devendo ser reduzido a uma escala padrão considerando as diferenças em equipamentos e técnicas utilizados nos diferentes observatórios. As determinações do índice F10.7 são feitas com monitores de fluxo (antenas parabólicas) que são igualmente sensíveis a todos os pontos do disco solar, e são equipados para medir as emissões linearmente polarizadas no sentido norte-sul. O fluxo solar F10.7 pode ser utilizado como índice diário ou como média sobre longos períodos para traçar as tendências da atividade solar, que por sua vez é caracterizada pelo número de manchas solares ou pela densidade do fluxo de potência no comprimento de onda de 10.7 cm (Tapping, 1987).

Algumas faixas de comprimentos de onda e linhas específicas do espectro do fluxo de potência do Sol (principalmente na faixa ultravioleta) são responsáveis pela formação da ionosfera. A radiação solar varia periodicamente entre valores máximos e mínimos e essa variação afeta a taxa de ionização da ionosfera.

Durante a época de alta atividade solar, os efeitos de tempestades magnéticas e atividade solar na velocidade de deriva vertical do plasma são sazonalmente dependentes. Os campos elétricos das regiões de baixas latitudes resultam de um complexo processo interativo entre as regiões E e F e variam consideravelmente do dia para noite, com a sazonalidade, atividade magnética e fluxo solar (Fejer et al., 1991).

A intensificação da deriva vertical da camada F ocorre em meio a uma complicada eletrodinâmica que a ionosfera equatorial apresenta nas horas do pôr-do-sol. Esta intensificação pode ser controlada pelo fluxo solar através do seu efeito no ambiente ionosférico e nos parâmetros termosféricos que participam diretamente ou indiretamente na sua geração (Abdu et al., 2010), como por exemplo o vento termosférico zonal que ativa o dínamo da camada F na presença de um gradiente longitudinal e de hora local na condutividade da camada E (Rishbeth, 1971; Heelis et al., 1974, Farley et al., 1986; Batista et al., 1986b) e a contribuição na divergência da corrente do eletrojo equatorial vindo do gradiente de condutividade da camada E próximo ao pôr-do-sol. Quanto maior o fluxo de radiação solar na atmosfera, maior será a ionização e conseqüentemente campos elétricos mais intensos surgem na ionosfera.

Fejer et al., (1991) mostraram o evidente controle do fluxo solar no Vzp sobre Jicamarca, como mostra a Figura 3.8.

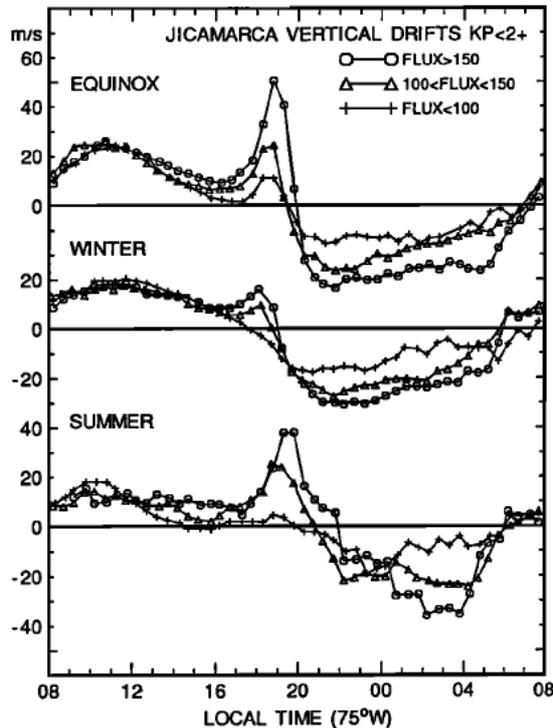


Figura 3.8 - Velocidade de deriva vertical média sobre Jicamarca durante os equinócios (março-abril; setembro-outubro), inverno (maio-agosto) e verão (novembro-fevereiro) para três diferentes níveis de fluxo solar.
 FONTE: Fejer et al. (1991)

Observa-se que a velocidade de deriva durante o dia não muda muito de acordo com a variação do fluxo solar, mas ao entardecer e a noite varia consideravelmente de alta para baixa atividade solar. Às 11 LT, a velocidade se maximiza atingindo valores maiores para o equinócio e menores no solstício de verão. É notável que o pico de velocidade (observado entre 18 e 19 LT) mostra-se mais intenso durante o equinócio e seu aumento com a atividade solar é devido ao correspondente aumento do vento zonal equatorial e a razão entre o campo magnético e a condutividade Pedersen nas regiões E e F.

Neste mesmo trabalho, os autores também mostram a variação do V_{zp} como função do fluxo solar usando dados de 1968 até 1989 com as respectivas curvas de ajuste (Figura 3.9). Nota-se que o pico de velocidade aumenta linearmente com o fluxo solar durante o equinócio. No inverno, o melhor ajuste foi uma curva quadrática, no entanto saturou para valores maiores de fluxo. Para o verão, os dados foram bem ajustados tanto com a curva quadrática como a linear.

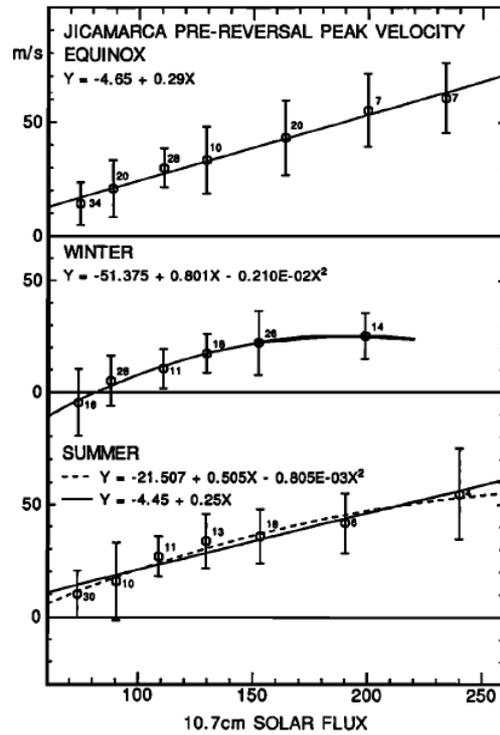


Figura 3.9 - Variação do V_{zp} com o fluxo solar.
 FONTE: Fejer et al. (1991)

Outro exemplo pode ser visto na Figura 3.10, na qual a intensificação do V_{zp} decresce com a atividade magnética durante o equinócio e verão e aumenta durante o inverno. Os dados foram agrupados para valores de $K_p < 2+$ (dias calmos) e $K_p > 3$ (dias perturbados). Os resultados desta análise estão de acordo com Fejer et al., (1989), na qual os autores mostram a dependência da velocidade de deriva vertical média com atividade magnética durante condições de alta atividade solar.

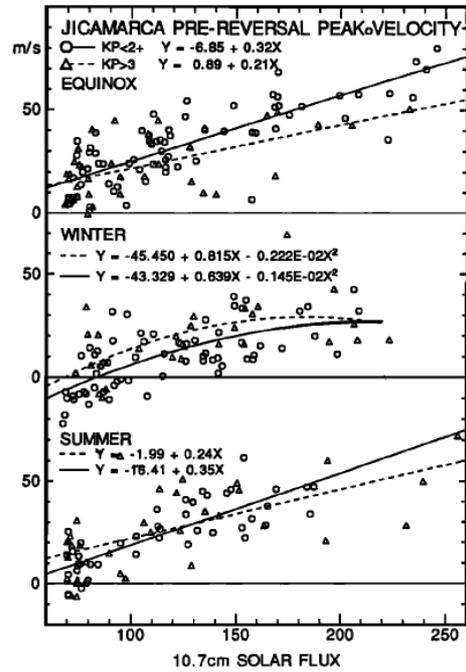


Figura 3.10 - Variação do V_{zp} em função do fluxo solar para dois níveis de atividade magnética.
 FONTE: Fejer et al. (1991)

O aumento da velocidade de deriva vertical do plasma com a atividade magnética para os meses de inverno pode ser vista na Figura 3.11. Nesse caso, nota-se que a velocidade de deriva vertical média durante períodos calmos e perturbados difere uma da outra principalmente durante o amanhecer e anoitecer. As velocidades verticais para cima durante o anoitecer e para baixo no amanhecer são consistentes com um aumento na penetração de campos elétricos de altas latitudes, associados com o aumento na convecção.

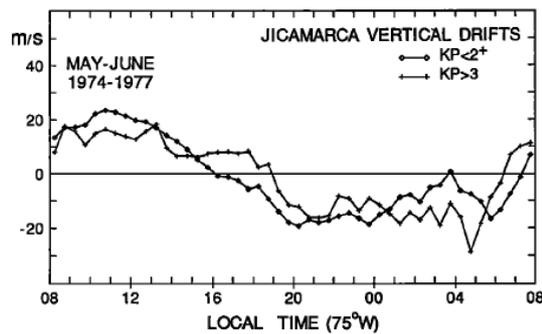


Figura 3.11 - Variação da velocidade de deriva vertical média para condições calmas e perturbadas (maio e junho) durante atividade solar mínima.
 FONTE: Fejer et al. (1991)

Uma análise feita por Abdu et al., (2010) mostrou a relação entre os valores do V_{zp} e o fluxo solar para outubro, novembro e dezembro dos anos de 2001 e 2004 sobre a região

de São Luís e Fortaleza. Os ajustes lineares feitos entre o Vz_p e o fluxo solar podem ser vistos na Figura 3.12.

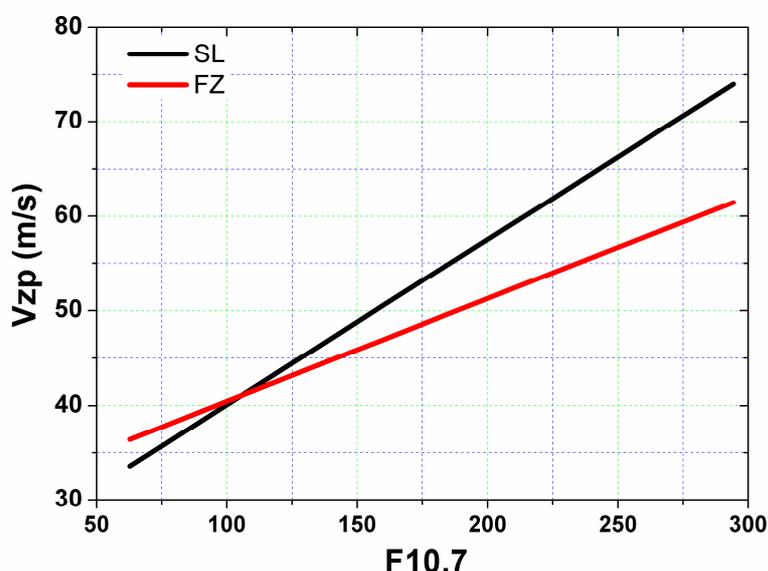


Figura 3.12 - Dependência do Vz_p com o fluxo solar sobre São Luís e Fortaleza para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2001 e 2004.
FONTE: Modificada de Abdu et al. (2010)

Nota-se que os valores do ajuste linear feito para São Luís variam de ~35 a 65 m/s para valores de fluxo variando de 70 a 250 unidades. Para valores maiores de fluxo, este resultado pode ser comparado com os resultados obtidos por Fejer et al., (1991), onde a velocidade da deriva vertical medida pelo radar incoerente sobre Jicamarca variou de 18 a 68 m/s para uma similar variação de fluxo. No entanto, para baixos valores de fluxo há uma significativa diferença, que pode ser atribuída a alguns fatores, tais como às peculiaridades geomagnéticas da região brasileira, caracterizada pelo grande ângulo de declinação magnética e a uma fraca intensidade do campo magnético ou pelo fato desta análise ser restrita aos meses de outubro, novembro e dezembro de apenas dois anos e não cobrir valores de fluxo solar menores do que 80.

Esse estudo feito por Abdu et al., (2010) foi de extrema importância para o desenvolvimento do estudo proposto para esta dissertação, uma vez que foram incluídos nesta análise mais dados referentes a alta e baixa atividade solar para os mesmos meses, no entanto a análise foi feita para cada mês separadamente.

3.4.3 Tempestades magnéticas

Durante períodos calmos a variabilidade no PRE pode ser atribuída à propagação de ondas planetárias. Já para períodos perturbados, campos elétricos de origem magnetosférica podem penetrar nas latitudes equatoriais e ser a causa desta variabilidade, bem como campos elétricos de grande intensidade no setor noturno.

Uma tempestade magnética ocorre quando uma ejeção de massa solar em grande escala atinge a magnetosfera e a ionosfera terrestre. Ela pode ser representada pelo decréscimo acentuado do índice Dst (*Disturbance Storm Time*) que é proporcional a correntes elétricas que circulam no sentido leste-oeste no cinturão de radiação van Allen. A tempestade pode ser dividida em três fases distintas, definidas como:

- **Fase Inicial:** fase na qual ocorre a compressão das linhas magnéticas na magnetosfera pelo vento solar;
- **Fase Principal:** caracterizada pela intensificação da corrente de anel a qual gera um campo magnético oposto ao campo geomagnético;
- **Fase de Recuperação:** recuperação gradual do campo magnético ao seu estado não perturbado.

Essas três fases podem ser vistas na Figura 3.13.

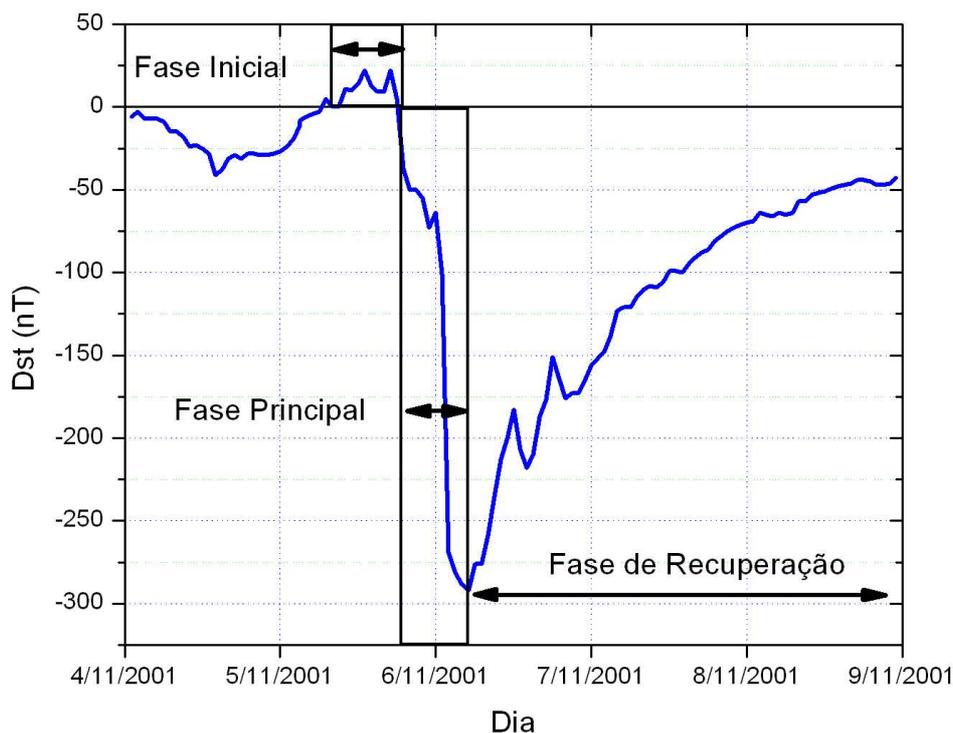


Figura 3.13 - Ilustração das fases de uma tempestade magnética.

Segundo González et al. (1994), as tempestades magnéticas podem ser classificadas de acordo com o índice Dst em fracas, moderadas e intensas, como indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das tempestades magnéticas.

Classificação	Dst_{min}
Intensas	≤ -100 nT
Moderadas	-100 nT < Dst_{min} < -50 nT
Fracas	-50 nT < Dst_{min} < -30 nT

Um estudo avaliando a influência da atividade solar no comportamento da velocidade de deriva pode ser vista na Figura 3.14. Essa análise corresponde à velocidade de deriva vertical sobre a região de Jicamarca, principalmente sob condições de atividade magnética fraca, exceto para os dados de solstício de verão (1975-1976) que são representativos de atividade magnética moderada. Esse estudo mostrou a variação sazonal da velocidade durante os anos de 1968-1971 (atividade solar máxima) e 1975-1976 (atividade solar mínima). As principais diferenças observadas entre o comportamento da velocidade de deriva para as duas situações foram:

- o pico pré-reversão da velocidade é mais pronunciado durante alta atividade solar;
- a velocidade durante o dia praticamente não é afetada pelo ciclo solar e apresenta poucas mudanças com a sazonalidade;
- a intensidade da velocidade durante a noite e a tarde é significativamente menor durante o período de atividade solar mínima. Durante o dia, a velocidade é um pouco maior, exceto para o solstício de verão.

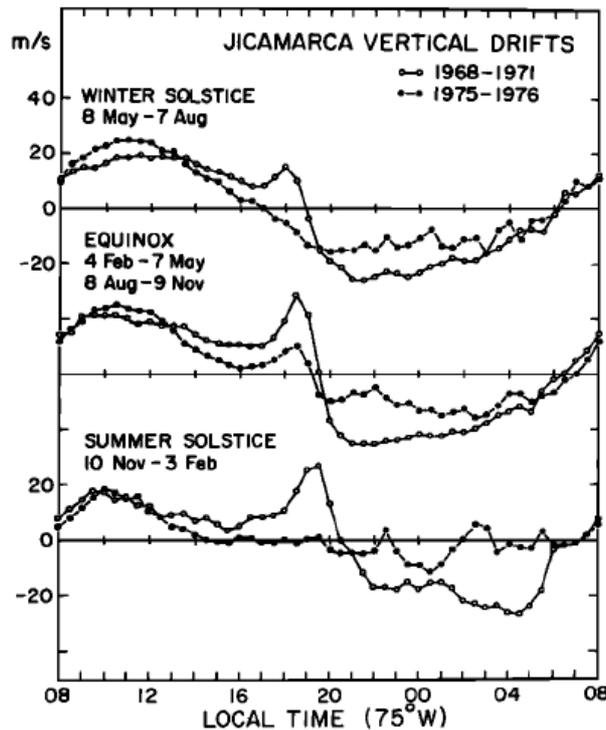


Figura 3.14 - Variação sazonal da velocidade de deriva equatorial durante atividade solar máxima (1968-1971) e atividade solar mínima (1975-1976).
 FONTE: Fejer et al. (1979).

Durante a ocorrência de uma tempestade magnética, tanto o campo magnético quanto a ionosfera podem sofrer mudanças drásticas. A deposição de energia de origem magnetosférica nas altas latitudes conduz perturbações em escala global nos campos elétricos ionosféricos bem como nos ventos termosféricos (Abdu et al., 2006c). Desse modo, há três tipos de campos elétricos de perturbação que podem surgir em latitudes equatoriais em associação a perturbações magnetosféricas: campos elétricos transientes associados com início da tempestade (Sastri et al., 1993), campos elétricos de curta duração (~ 2 horas), e campos elétricos persistentes com duração de várias horas que surgem devido ao dínamo perturbado. Os campos elétricos de curta duração surgem durante o desenvolvimento de subtempestades em sua fase de recuperação, e são

geralmente associados com a inversão do sul para norte da componente Bz do campo magnético interplanetário (Fejer, 1991a; Abdu et al, 1995, Abdu, 1997).

A seguir serão apresentados os efeitos que podem ocorrer na velocidade de deriva vertical do plasma em virtude da penetração de campos elétricos de origem magnetosférica e também os efeitos devido ao campo elétrico do dínamo perturbado.

3.4.3.1 Penetração de campos elétricos magnetosféricos

Considerando o campo magnético interplanetário (Bz) para sul, associado a uma rápida intensificação do eletrojato auroral (o que marca o início do desenvolvimento de uma tempestade/subtempestade), campos elétricos de convecção podem penetrar nas latitudes equatoriais. Esse campo é dito *undershielding* e tem polaridade para leste durante o dia e oeste durante a noite e ocorre quase simultaneamente aos eventos relacionados a altas latitudes.

Quando o plasma quente vindo da magnetosfera interage com a ionosfera, criam-se correntes na região 2 que fluem para dentro e para fora da região auroral em direção ao equador magnetosférico. As correntes dessa região tentam contrabalancear a componente leste-oeste do campo elétrico vindo da calota polar em direção a média e baixas latitudes com um tempo de ~20 – 30 minutos. Este efeito é chamado de blindagem (*shielding*). Quando há uma rápida inversão de Bz para norte, acompanhado da recuperação do eletrojato auroral, o plasma quente magnetosférico que alimenta as correntes na região 2 é temporariamente desequilibrado criando um campo elétrico de blindagem muito forte, denominado de *overshielding*. Neste caso, o campo elétrico da camada de blindagem torna-se forte o suficiente para contrapor aos campos elétricos de penetração diretamente da calota polar, de forma que os campos elétricos equatoriais com penetração direta reverterem à direção (Richmond et al., 2003).

Tanto os campos elétricos *undershielding* e *overshielding* podem causar efeitos na ionosfera. Um estudo feito por Abdu et al., 2009 mostrou que a penetração de um campo elétrico *overshielding* causou a supressão do Vzp sobre São Luís para o dia 31 de março de 2001, dia na qual ocorreu uma grande tempestade e pode ser vista na Figura 3.15.

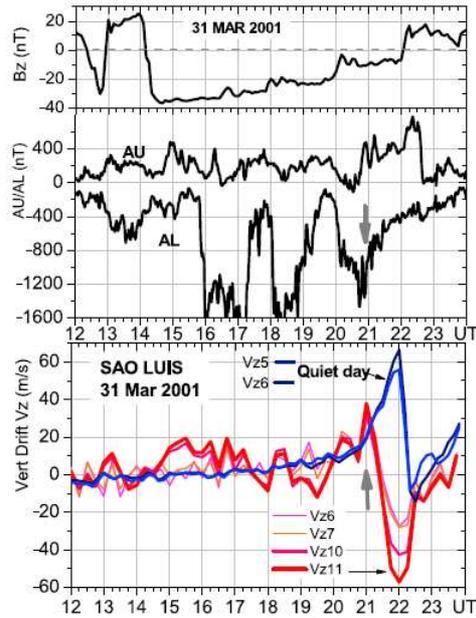


Figura 3.15 - Campo magnético interplanetário (B_z), índice auroral AU/AL e a velocidade de deriva vertical calculada para as frequências de plasma iguais a 6, 7, 10 e 11 MHz sobre São Luís juntamente com a velocidade para os dias calmos.
 FONTE: Abdu et al. (2009).

Neste caso, os autores calcularam a velocidade de deriva para frequências específicas de plasma de 6, 7, 10 e 11 MHz. A Figura 3.15 mostra que B_z teve uma inversão para o sul com início às 14 UT até às 22 UT do mesmo dia (31 de março de 2001). Nesse mesmo período, observa-se uma intensa atividade auroral representada pelos índices AU e AL. Durante o dia, a velocidade calculada a partir da sondagem ionosférica é limitada devido aos processos fotoquímicos e entre às 21 e 22 UT pode ser comparável com a velocidade real do plasma, pois neste caso a altura da camada F geralmente está acima 300 km e assim a velocidade não é influenciada pelos processos de perda devido à recombinação (Bittencourt e Abdu, 1981). Com o índice AL se recuperando às 21 UT e B_z se invertendo para norte às 22 UT, um forte campo elétrico *overshielding* faz com que a velocidade atinja ~ -60 m/s às 22 UT. A linha em azul representa a velocidade de deriva vertical média para dias calmos, na qual sua amplitude chega a 60 m/s para o mesmo horário.

Respostas contrárias da ionosfera devido a campos elétricos de penetração podem ser vistos na Figura 3.16. Nota-se que no início da tempestade, o índice AE sofre uma pequena intensificação (1920 UT) com B_z fracamente para sul. Por volta de 2020 UT o índice AE apresenta um rápido aumento seguido por várias fases de intensificação e recuperação assim como o campo magnético interplanetário. A velocidade para o dia 25

de setembro de 2001 começou a se intensificar bem antes da velocidade média para dias calmos e isso acontece em virtude da penetração de um campo elétrico *undershielding* vindo de uma tempestade que teve início às 1920 UT.

Para o dia 25 de setembro de 2001 às 2130 UT, o V_{zp} atingiu ~ 75 m/s, o que corresponde a um campo elétrico para leste de ~ 2 mV/m. Em relação ao *spread-F*, é comum em dias calmos que ele ocorra imediatamente após o pico pré-reversão da velocidade (~ 22 UT). No caso em que ocorreu a penetração de um campo elétrico *undershielding*, o *spread-F* teve início às 2140 UT, cerca de 20 a 30 minutos antes quando comparado com o padrão dos dias calmos, no entanto também ocorreu logo após o pico da deriva. Em relação ao dia 23 de setembro de 2001, nota-se que com a inversão de B_z para norte às 1940 UT e uma recuperação do índice AE, um campo elétrico *overshielding* contribuiu para total inibição do V_{zp} que, por sua vez, atingiu valores negativos no horário esperado do pico. O campo elétrico que causou esta inibição pode também ser devido ao dínamo perturbado, levando em consideração uma forte atividade auroral e de longa duração antes do horário do pico pré-reversão e relativamente fraca no período de ocorrência do PRE.

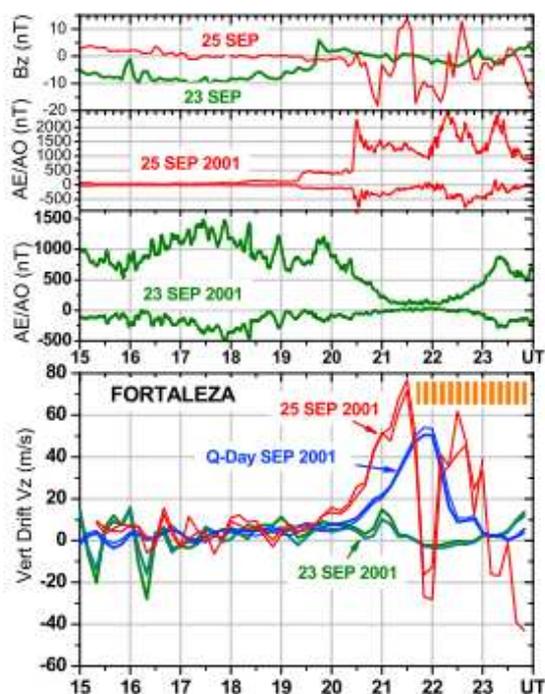


Figura 3.16 - Campo magnético interplanetário (B_z , índice auroral AE e a velocidade de deriva vertical para Fortaleza calculada para as frequências de plasma iguais a 6, 7 MHz juntamente com a velocidade para os dias calmos.

FONTE: Abdu et al. (2009).

3.4.3.2 Campo elétrico do dínamo perturbado

O mecanismo de geração do campo elétrico devido ao dínamo perturbado pode ser entendido com ao auxílio da Figura 3.17. De acordo com Abdu et al., (2006c), a entrada de energia magnetosférica nas altas latitudes conduzem ventos termosféricos perturbados em direção ao equador, derivados do aquecimento Joule e da interação colisional das partículas neutras com íons rapidamente convectivos.

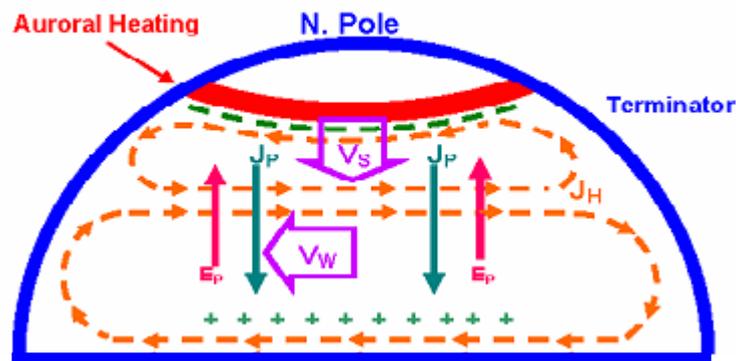


Figura 3.17 - Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.
FONTE: Modificada de Abdu et al. (2006c).

Devido ao aquecimento Joule na região auroral, ventos são produzidos na termosfera e na região F e se propagam em direção ao equador (V_S). Devido à rotação da Terra, surgem movimentos zonais e para oeste em função da força Coriolis (V_W). O movimento zonal dos íons, na presença do campo magnético terrestre, gera a corrente Pedersen que flui em direção ao equador (J_P) e tende a carregar positivamente a ionosfera de baixas latitudes até o momento em que o fluxo de corrente seja cessado pelo campo elétrico resultante (E_P). Esse campo elétrico, que é perpendicular às linhas de \vec{B} , tem o efeito de produzir a deriva do plasma para oeste e uma corrente Hall (J_H). A interrupção da corrente Hall nos terminadouros resulta em dois laços de correntes que estabelecem o campo elétrico anoitecer-amanhecer. Esse campo elétrico tem polaridade oposta ao campo elétrico do dínamo dos dias calmos e se estende para regiões equatoriais e de baixas latitudes através da ionosfera condutora.

Um estudo feito por Fejer et al., (1983), mostrou a primeira distinção entre os efeitos causados na velocidade de deriva vertical do plasma sobre Jicamarca, em virtude do

dínamo perturbado e da penetração de campos elétricos. O campo elétrico do dínamo perturbado pode ser claramente identificado quando um grande distúrbio magnético é seguido por um período calmo. Por outro lado, o padrão de perturbação pode ser mascarado pela penetração de campos elétricos que ocorrem simultaneamente com perturbações no sistema de correntes das altas latitudes. Essas características podem ser identificadas na Figura 3.18.

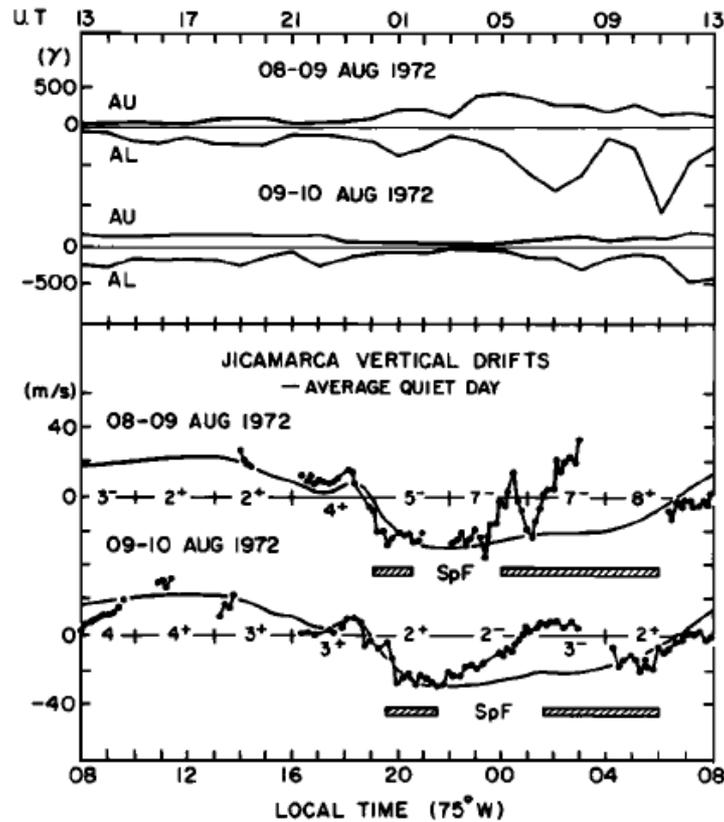


Figura 3.18 - Índices do eletrojato auroral AU/AL e a velocidade de deriva vertical da camada F para os dias 8-10 de agosto de 1972 para Jicamarca. A curva sólida representa a variação da deriva vertical média durante períodos calmos.

FONTE: Fejer et al. (1983).

A Figura 3.18 mostra as velocidades de deriva para os dias 8, 9 e 10 de agosto de 1972, a velocidade média para dias calmos (linha sólida) e os índices AU e AL. O índice AL apresenta variações com início às 03 UT do dia 9 de agosto atingindo um valor máximo próximo às 11 UT. As condições geomagnéticas retornam para baixos níveis próximos às 13 UT permanecendo assim pelas próximas 24 horas. Observam-se rápidas variações na velocidade para o dia 8-9 de agosto com polaridades para cima e para baixo que correspondem a campos elétricos de penetração para leste e oeste respectivamente. Por outro lado, uma lenta variação na velocidade pode ser observada na próxima noite (09-

10 de agosto), iniciando-se ~ às 22 UT e que é desacompanhada de qualquer atividade magnética representada pelos índices AU e AL. Esse fato representa um padrão típico de campo elétrico do dínamo perturbado com polaridade para leste durante a noite, o que faz com que a velocidade se torne positiva, sentido oposto aos dias calmos.

Outros exemplos podem vistos nas Figuras 3.19 e 3.20, na qual foram estudados separadamente os casos de penetração de campos elétricos e dínamo perturbado a partir de dados obtidos pelo satélite ROCSAT-1 (Fejer et al., 2008).

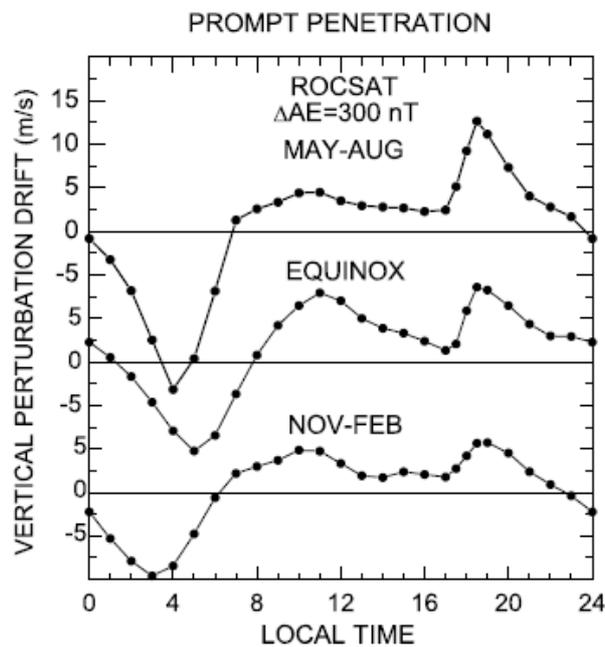


Figura 3.19 - Dependência sazonal da velocidade de deriva vertical média do plasma devido a penetração de campos elétricos obtidas pelo satélite ROCSAT-1, seguido de um aumento de 300 nT do índice AE.

FONTE: Fejer et al. (2008).

Algumas características observadas logo após um aumento súbito da convecção nas altas latitudes são:

- velocidade de deriva positiva entre ~ 07 – 23 LT;
- picos positivos da velocidade às 11 e 19 LT e negativos às 03 e 05 LT;
- o pico da velocidade perturbada durante o dia é maior no solstício de junho e menor no solstício de dezembro;
- a reversão da velocidade ocorre um pouco mais cedo durante os solstícios e mais tarde nos equinócios.

Os resultados obtidos nesta análise estão de acordo com a média sazonal dos valores obtidos a partir de dados de radar sobre Jicamarca (Fejer e Scherliess, 1995, 1997) e com os resultados do modelo de convecção global (Senior e Blanc, 1984; Spiro et al., 1988; Fejer et al., 1990; Peymirat et al., 2000).

Em relação aos efeitos causados na velocidade de deriva vertical devido à ação do dínamo perturbado (Figura 3.20), observaram-se as seguintes características:

- pequena velocidade de deriva entre 07 e 17 LT e menor ainda durante o solstício;
- velocidade apresenta queda antes do anoitecer (maior para o equinócio) e logo após apresenta valores altos para todos os casos;
- durante a noite, a velocidade torna-se positiva sendo maior no solstício de dezembro com pico ~ às 03 LT. Já para o equinócio e solstício de junho, o pico tem magnitudes praticamente iguais (~ 10m/s);
- em comparação com o caso de penetração de campos elétricos, a dependência com a hora local e sazonalidade estão anti-correlacionadas entre si.

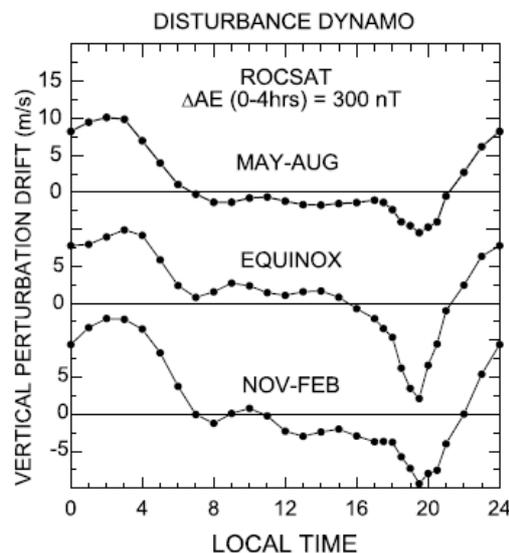


Figura 3.20 - Dependência sazonal da velocidade deriva vertical média do plasma devido a campos elétricos do dínamo perturbado obtidas pelo satélite ROCSAT-1.
 FONTE: Fejer et al. (2008)

Os resultados obtidos estão de acordo com observações do radar de Jicamarca (Fejer e Scherliess, 1995 e 1997) e com resultados teóricos (Blanc e Richmond, 1980). Os dados selecionados para esta análise correspondem a períodos nos quais o índice auroral AE, de hora em hora, foi maior do que -200 nT por pelo menos quatro horas.

3.5 Intensificação da deriva vertical noturna e o desenvolvimento do *spread-F*

Dependendo das condições em que o ambiente ionosfera-termosfera se encontra, à ionosfera equatorial noturna se torna frequentemente instável a perturbações na sua densidade eletrônica. Essas perturbações acontecem devido aos processos eletrodinâmicos que ocorrem no pôr-do-sol, tais como a deriva vertical e zonal do plasma que, por sua vez, conduz a geração de irregularidades como às bolhas ionosféricas / *spread-F*.

A intensificação do campo elétrico zonal, responsável pela subida brusca da camada F nas horas do pôr-do-sol, e o gradiente de densidade eletrônica que se acentua na parte inferior da ionosfera (devido aos efeitos eletrodinâmicos e de recombinação), formam um conjunto de pré-condições que são favoráveis ao desenvolvimento da instabilidade do tipo *spread-F* (Abdu 2005). No momento em que a camada F está suficientemente alta, ou o gradiente está alto o suficiente para superar os efeitos de recombinação, há um crescimento das flutuações na densidade eletrônica. Essas flutuações darão origem às chamadas bolhas ionosféricas, que são imensas regiões do espaço onde a concentração de elétrons livres é acentuadamente reduzida.

A teoria mais aceita para explicar a geração das bolhas ionosféricas é a teoria de Rayleigh – Taylor (Kelley, 2008). Uma ilustração dos processos eletrodinâmicos equivalentes ao que explica essa teoria pode ser vista na Figura 3.21. Considera-se dois fluídos, ambos com densidades diferentes representadas por n_1 e n_2 , tal que $n_1 > n_2$, sujeitos a ação da gravidade e do campo magnético. Desprezando os efeitos colisionais,

a corrente produzida pela gravidade é dada por $\vec{J} = \frac{nm\vec{g} \times \vec{B}}{B^2}$. A corrente na direção x , a

qual é estritamente horizontal, é dada por $J_x = \frac{nmg}{B}$. De acordo com essa expressão, J_x

depende da densidade n , de maneira que qualquer perturbação na superfície que separa os dois fluídos poderia causar uma divergência na corrente, ocasionando assim um acúmulo de cargas na borda da perturbação. Esse acúmulo de cargas dá origem a um campo elétrico de polarização, o qual, na presença do campo magnético, causará a deriva de íons e elétrons ($\delta\vec{E} \times \vec{B}$). Essa deriva faz com que o plasma de menor densidade suba e o de maior densidade desça, formando assim a bolha ionosférica.

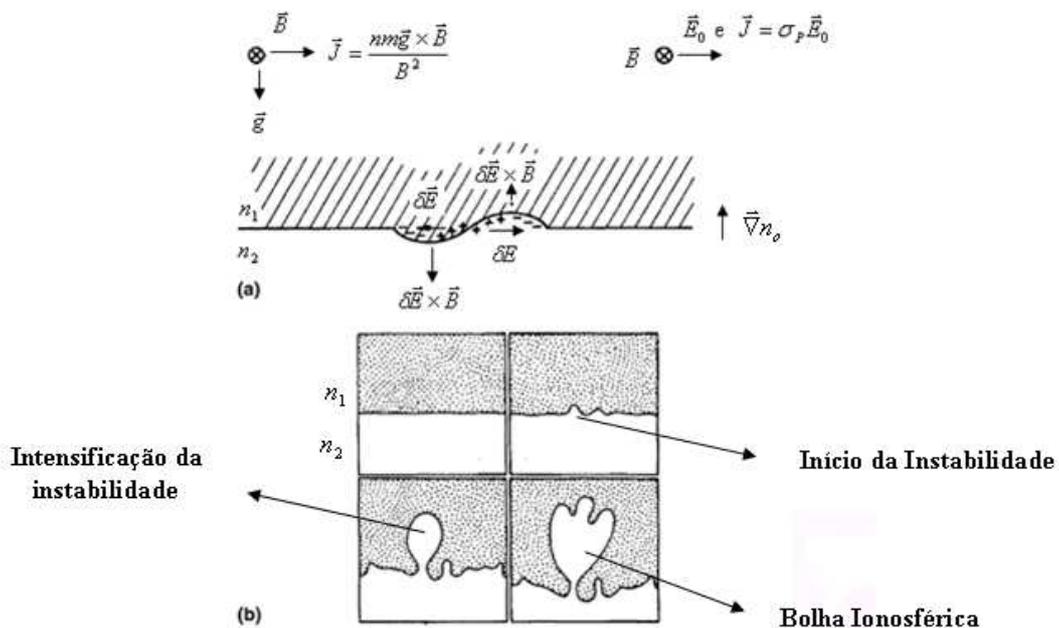


Figura 3.21 - (a) Representação esquemática das condições favoráveis à geração da instabilidade Rayleigh-Taylor. (b) Ilustração da evolução da instabilidade segundo a teoria Rayleigh-Taylor.
 FONTE: Adaptada de Kelley (2008).

De todos os parâmetros que controlam a taxa de crescimento da instabilidade e assim o desenvolvimento do *spread-F* equatorial, a intensificação da deriva vertical noturna é uma das mais estudadas e observadas (Abdu, 2001).

Um estudo feito por Fejer et al., (1999), mostrou que há uma pequena dependência entre a intensificação do V_{zp} e a intensidade do *spread-F* com o fluxo solar durante anos de baixa atividade solar, no entanto essa dependência se torna notável para condições de alta atividade solar, especialmente para os casos em que há forte *spread-F* durante os meses de equinócio. Para os meses de solstício, a dependência é considerada fraca, mas para o solstício de dezembro nota-se uma dependência melhor do que o solstício de junho. Esse estudo foi baseado em dados ao longo de ~ 24 anos sobre a região de Jicamarca onde foram observados alguns dias representando cada mês. Três casos foram considerados: dias observados sem *spread-F*, dias com fraco *spread-F* e dias com forte *spread-F*. O resultado deste estudo pode ser visto na Figura 3.22.

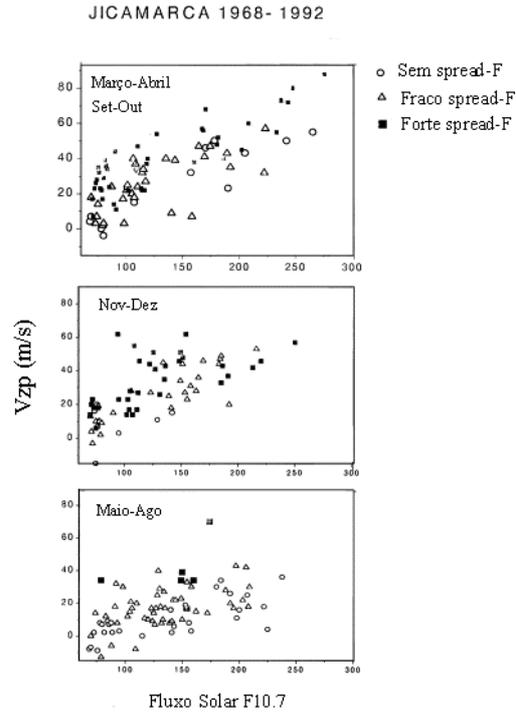


Figura 3.22 - Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma sobre a região de Jicamarca, em função do fluxo solar para os casos de forte *spread-F* (quadrado), fraco *spread-F* (triângulo) e sem *spread-F* (círculo).
 FONTE: Adaptada de Fejer et al. (1999).

A instabilidade do tipo *spread-F* pode se manifestar de diferentes maneiras, sendo denominado de *spread-F* em altura ou *spread-F* em frequência. Quando essas duas maneiras se manifestam juntas, denomina-se por *spread-F* misto. A Figura 3.23 ilustra o *spread-F* para os três casos:

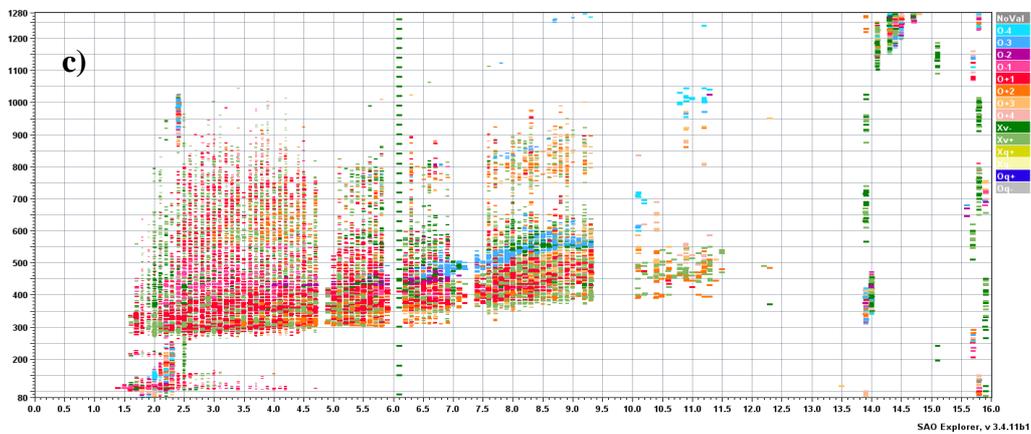
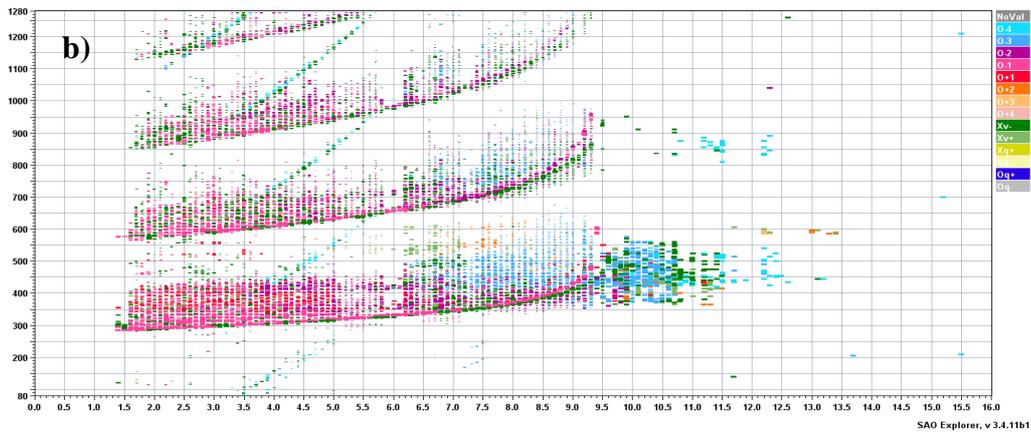
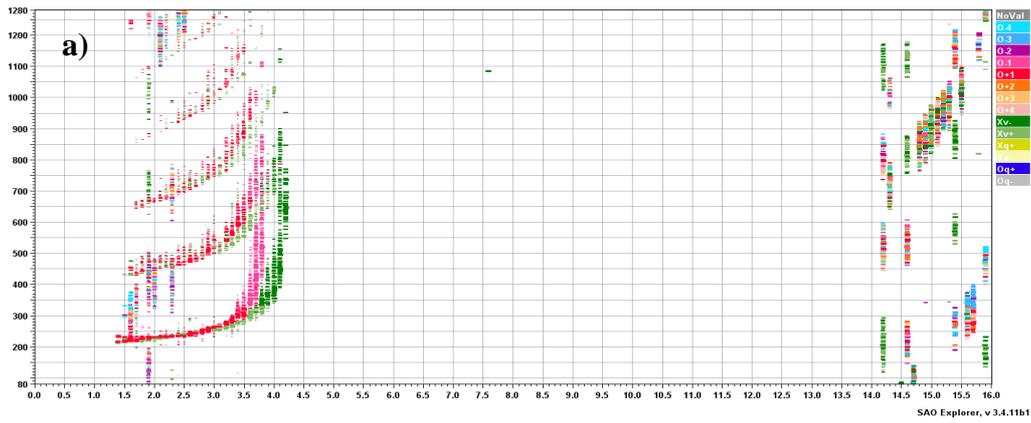


Figura 3.23 – Exemplo de ionograma para Fortaleza mostrando a) *spread-F* em frequência, b) *spread-F* em altura e c) *spread-F* misto.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A ionossonda é um equipamento que mede a variação da altura de reflexão das ondas incididas verticalmente na ionosfera em função da frequência de sondagem, a qual fornece informações do perfil vertical de densidade eletrônica da ionosfera (Reinish et al., 1986). Uma digissonda nada mais é do que uma ionossonda digital, com uma tecnologia mais desenvolvida e por isso apresenta mais precisão nos dados referentes ao comportamento da ionosfera. Para este trabalho, foram utilizadas as informações ionosféricas obtidas pelas digissondas instaladas em São Luís e Fortaleza.

Vários estudos podem ser realizados a partir dos dados obtidos por esse instrumento, tais como a altura virtual das camadas ionosféricas (h'), a amplitude e fase do sinal refletido, o ângulo de incidência, a polarização da onda eletromagnética, o deslocamento Doppler da frequência transmitida (devido ao movimento do alvo refletor) e também a curvatura da frente de onda.

4.1 Princípios de funcionamento das digissondas

Uma das técnicas mais utilizadas para estudar a ionosfera e a alta atmosfera é baseada na propagação das ondas de rádio. Essas ondas se propagam na ionosfera e são refletidas após penetrarem até uma determinada altura, que depende das condições de reflexão do plasma que está sujeito a ação do campo magnético terrestre. As técnicas de sondagem ionosférica podem ser divididas em três grupos: 1° a onda de rádio pode ser totalmente refletida pelo meio; 2° a onda de rádio pode passar pelo meio e emergir alterada e 3° a maior parte da energia pode viajar através do meio sendo que uma pequena fração espalhada ou parcialmente refletida pode ser devido às estruturas irregulares.

No 1° e 3° grupo, na qual a onda é totalmente refletida pelo meio e a maior parte da energia pode viajar através deste, envolve um transmissor e um receptor, ambos

situados abaixo ou acima da ionosfera. Para o 2º grupo, é necessária uma fonte ou receptor acima da ionosfera.

A digissonda é um dos instrumentos mais representativos para a medida de dados ionosféricos. Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética em frequências que variam de 1 a 20MHz.

Desprezando os efeitos do campo geomagnético, bem como as colisões entre elétrons e as partículas neutras, o índice de refração do plasma ionosférico é dado por (Ratcliffe, 1962):

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \left(\frac{f_N}{f} \right)^2, \quad (4.1)$$

X é expresso por:

$$X = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m f^2} \quad (4.2)$$

onde e , N_e e m são respectivamente a carga, densidade e massa dos elétrons; ϵ_0 é a permissividade elétrica no espaço livre, e f é a frequência da onda e f_N frequência do plasma. Abaixo da ionosfera, o índice de refração é igual a 1, N_e é nulo, e portanto, X também é nulo. A partir do ponto em que $X > 0$, devido à presença de elétrons livres, μ tende a ficar cada vez menor até anular-se, momento na qual acontece a reflexão da onda incidente. Assim temos as equações:

$$f_N^2 = f^2 \quad (4.3)$$

e

$$f_N^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m} = f^2, \quad (4.4)$$

onde f_N é frequência do plasma e f a frequência da onda.

A partir dos valores das constantes e da frequência transmitida f , o perfil de densidade eletrônica pode ser calculado. Quanto maior a frequência de sondagem, mais alta é a camada refletora.

Para uma situação real, em que o campo magnético não pode ser desprezado, o índice de refração do meio ionizado é representado pela equação de Appleton-Hartree:

$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm [Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.5)$$

onde

$$Y_{L,T} = \frac{eB_{L,T}}{2\pi mf}, \quad (4.6)$$

e

$$\frac{eB}{2\pi m} = f_H. \quad (4.7)$$

$B_{L,T}$ são as componentes do campo magnético na direção longitudinal (paralela) e transversal (perpendicular) à normal da onda; e f_H é a frequência natural na qual os elétrons giram em torno das linhas do campo geomagnético. Da equação (4.5), a solução positiva e negativa da raiz quadrada demonstra a possibilidade de existência das componentes de onda do modo ordinária e extraordinária (Davies, 1990), que será detalhada mais adiante.

4.2 Pré-processamento dos dados e o Ionograma

Os registros produzidos pelos sondadores ionosféricos são chamados de *ionogramas* e mostram a altura virtual de reflexão da onda de rádio em função da frequência dessa onda (Yamashita, 2000).

Os dados de sondagem ionosférica são pré-processados pela digissonda através de uso do software ARTIST (*Automatic Real Time Ionogram Scaler with Trueheight*) e depois de gravados podem ser manualmente editados através de uso do software SAO-Explorer (*Standard Archive Output Format*). Estes programas fornecem vários parâmetros ionosféricos, tais como os descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros ionosféricos.

h'F1	Altura virtual mínima da camada F1
h'F2	Altura virtual mínima da camada F2
h'F3	Altura virtual mínima da camada F3
h'E	Altura virtual mínima da camada E
h'Es	Altura virtual mínima da camada Es (esporádica)
hmF1	Altura do pico da camada F1
hmF2	Altura do pico da camada F2
foEs	Frequência crítica da camada Es
foF1	Frequência crítica da camada F1
foF2	Frequência crítica da camada F2
foE	Frequência crítica da camada E
fbEs	Frequência de Blanketing da camada Es
fminEs	Frequência mínima da camada Es
fminF	Frequência mínima da camada F
fminE	Frequência mínima da camada E

A altura da camada medida pelos sondadores ionosféricos é dita virtual devido ao fato da sonda medir o tempo decorrido entre a transmissão do pulso e a recepção do mesmo, após ter ocorrido à reflexão na ionosfera. Esse tempo é proporcional a altura de onde se deu a reflexão e essa altura é calculada supondo que a propagação do pulso ocorreu com a velocidade de luz. No entanto, a velocidade do pulso é menor do que a velocidade da luz e varia com a densidade eletrônica do meio da propagação. Sendo assim, a altura real na qual a reflexão realmente aconteceu é sempre menor que a altura virtual devido ao retardo do sinal eletromagnético pela ionização existente abaixo do ponto de reflexão.

Através de um ionograma, nota-se que os ecos dentro de certa faixa de frequência se separam em dois traços. Tal separação ocorre devido à presença do campo geomagnético. Um representa a componente ordinária, ou traço O e se refere à menor frequência. O outro é a componente extraordinária, ou traço X e se refere à maior frequência (Hargreaves, J.K, 1992, Reinisch et. al, 1989). Os traços ordinários (O) e

extraordinários (X) registram a frequência crítica da camada F que se diferem por um valor da ordem de f_b , onde:

$$f_b = \text{frequência ciclotrônica do elétron} / 2 \quad (4.8)$$

O traço O é refletido pela ionosfera após se propagar até uma altura em que a frequência da onda seja igual à frequência de plasma. Em alguns ionogramas observam-se os traços repetidos, que se referem a múltiplas reflexões entre a ionosfera e a Terra.

A Figura 4.1 ilustra um ionograma que nada mais é do que o resultado em forma de gráfico da medida da amplitude do sinal com a frequência e a altura. A abscissa representa a frequência (com ruídos) e a ordenada representa a altura de reflexão (que pode ser transformada em tempo supondo que a onda se propaga com a velocidade da luz, ou 3×10^8 m/s). A amplitude do sinal é representada pela intensidade (ou pixels) da curva, o desvio Doppler pela cor da curva e a polarização pelo gradiente de cores. As cores “frias” (escalas de azul-verde-cinza) mostram polarização do traço extraordinário e as cores “quentes” (escalas de vermelho-amarelo-branco) mostram a polarização do traço ordinário.

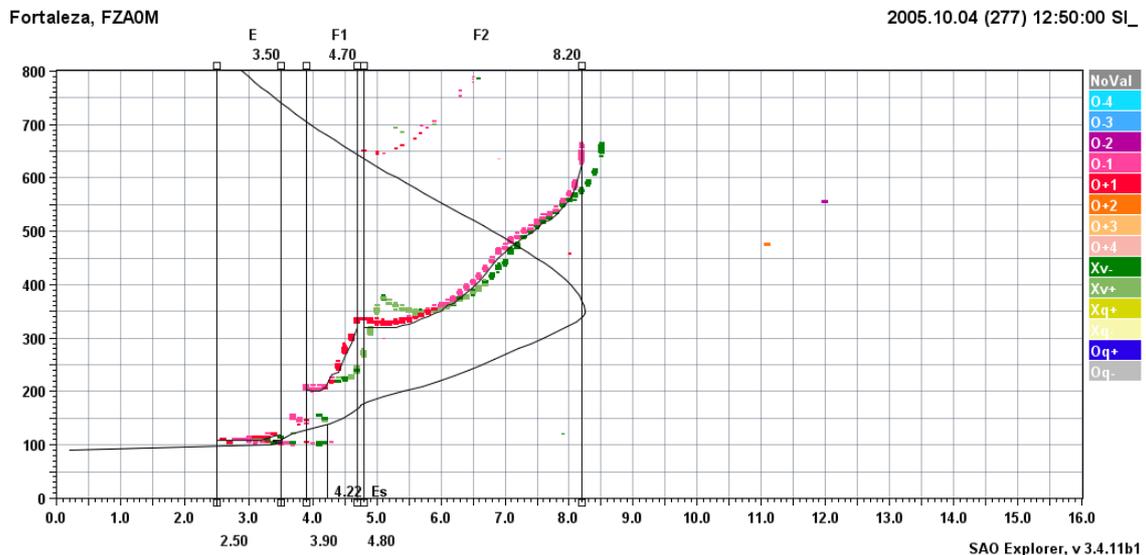


Figura 4.1 - Exemplo de ionograma sobre Fortaleza mostrando o perfil de densidade da ionosfera representado pela curva preta.

O perfil da ionosfera, que está representado pela curva preta da Figura 4.1, é calculado pelas digissondas a partir de medições e já converte a altura virtual em real. Acima do

pico de densidade da camada F2 é feita somente uma extrapolação. No caso, do ionograma apresentado na Figura 4.1, nota-se que para frequências acima de 8,5MHz, os sinais que foram emitidos não foram refletidos, ou seja, atravessaram toda a ionosfera.

A seguir, será brevemente descrito os dois tipos de digissondas que foram utilizadas para a obtenção dos dados do estudo proposto nessa dissertação, bem como o seu modo de funcionamento.

Digissonda 256 (DGS 256)

Este tipo de digissonda opera com radares de alta frequência e foi desenvolvida pela Universidade de Lowell. Ela opera como uma ionossonda de incidência vertical digitalizada o que torna mais fácil o processamento dos dados. A DGS 256 consiste basicamente dos seguintes equipamentos:

- um transmissor de 10 kW de potência de pico;
- receptor de sinais de rádio-frequência;
- microcomputadores acoplados;
- antenas transmissoras;
- arranjo de antenas receptoras.

A digissonda 256 opera no modo pulsado, emitindo pulsos de alta frequência que são refletidos em diversas alturas da ionosfera. Os ecos são recebidos através de um arranjo simples de antenas e transformados em sinais digitais por um sistema de aquisição e tratamento dos dados.

Uma antena tipo delta é utilizada para a transmissão pulsada que pode varrer uma frequência de 0,5 a 30 MHz com uma taxa de repetição do pulso de 50, 100 ou 200 Hz e uma potência de pico de até 10 kW (Reinisch, 1886; Reinisch, 1886a; Reinisch et al, 1989; Bertoni, 1998). Os sinais são transmitidos por um feixe na vertical e ao encontrar as camadas da ionosfera são refletidos e captados por um arranjo de 4 antenas de espiras transversais. Essas antenas permitem medir o ângulo de chegada e a polarização das

ondas ordinárias e extraordinárias dos ecos ionosféricos. O arranjo de antenas é na forma de um triângulo equilátero tendo uma das antenas no centro.

A DGS 256 funciona sob dois modos diferentes de configuração: modo ionograma e modo deriva. No modo ionograma, os pulsos emitidos varrem as frequências de 1 a 20MHz em passos com incremento de 5, 25, 100 ou 200 kHz (Reinish et al., 1989). Cada frequência recebida é processada em tempo real para determinar a resolução Doppler através da transformada de Fourier discreta e para calcular a altura virtual em função da frequência de sondagem. Já no modo deriva, a digissonda opera em 1, 2 ou 4 frequências e obtém espectros dos sinais recebidos por arranjos de 4 a 7 antenas. O sinal emitido pelo transmissor ilumina a área de algumas centenas de quilômetros de diâmetro da ionosfera. Os ecos retornam de pontos situados em uma superfície caracterizada por:

$$f_N = f , \quad (4.9)$$

onde:

f_N é a frequência do plasma; e f a frequência da onda.

Na Figura 4.2 podem ser vistas as antenas transmissoras e receptoras da DGS instalada em São Luís, MA.



(a)

(b)

Figura 4.2 - Fotografias a) antena receptora dos sinais refletidos da ionosfera b) antena transmissora, ambas situadas em São Luís, MA.

FONTE: Bertoni (1998).

Digissonda DPS

A digissonda DPS (*Digisonde Portable Sounder*) é um instrumento capaz de realizar medidas da ionosfera, fornecendo o processamento e a análise de dados em tempo real no local onde está instalada.

A DPS duplica todas as funções do seu processador em um pacote de menor potência. Isso inclui medidas simultâneas de sete parâmetros observáveis, oriundos dos sinais refletidos (ou refratados, na incidência oblíqua) na ionosfera. São eles:

- frequência;
- intervalo ou altura de incidência vertical das medidas simultâneas;
- amplitude;
- fase da onda;
- desvio Doppler e espalhamento;
- ângulo de chegada;
- polarização do sinal recebido.

Tanto a DGS como a DPS utilizam um arranjo com 4 antenas, como mostrado na Figura 4.3. Cada elemento do arranjo de antenas utilizado para recepção de sinais consiste de

dois laços ortogonais, na qual os sinais são somados ou subtraídos por um deslocamento de fase de até 90°. O espaçamento das antenas receptoras forma um triângulo equilátero com 60 m de comprimento na base, com uma quarta antena no centro do triângulo como indicado na Figura 4.3.

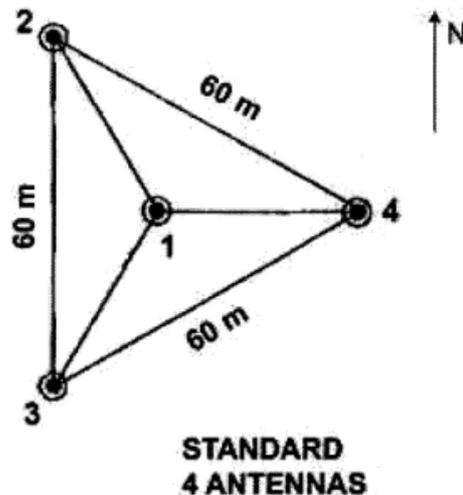


Figura 4.3 - Configuração do arranjo de quatro antenas.
FONTE: <<http://ulcar.uml.edu/uda>>

Em regiões equatoriais, os elementos da antena são combinados para formar polarizações lineares, paralelas ou perpendiculares ao campo magnético da Terra. A DPS tem grande capacidade de medir os ângulos de chegada dos ecos ionosféricos e para isso é utilizado uma técnica de interferometria Doppler (Reinisch, 1996).

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Os estudos realizados em relação à velocidade de deriva vertical do plasma foram baseados em dados obtidos pelas digissondas instaladas em São Luís e Fortaleza. A velocidade foi calculada para os meses de outubro, novembro e dezembro dos anos de 2001 a 2009.

O valor da velocidade aqui apresentada foi feito tomando-se a média entre a velocidade para 5 MHz e 6 MHz, como mostra a Equação 5.1. O cálculo da velocidade para cada frequência específica foi feita dividindo-se a diferença entre duas alturas consecutivas pelo tempo entre elas.

$$V_z = \frac{\left(\frac{dhF_{5MHz}}{dt} + \frac{dhF_{6MHz}}{dt} \right)}{2} \quad (5.1)$$

Uma vez que os dados obtidos para esta análise foram obtidos a cada 15 minutos em São Luís e a cada 10 minutos em Fortaleza, o cálculo da velocidade (V_z) aqui apresentada (sem levar em conta o efeito da recombinação) foi feito tomando-se a diferença entre a altura atingida pela camada F num dado tempo t e a altura em $t-15$ / $t-10$ minutos e em seguida dividindo-se o resultado por 15 minutos / 10 minutos para São Luís / Fortaleza. Essas duas alturas foram obtidas por meio das curvas de 5 MHz e 6 MHz providas pelas digissondas. Para as velocidades apresentadas no capítulo 7, quando não havia dados de altura real disponível para essas duas frequências, utilizaram-se outras como referência. Neste caso, a velocidade foi calculada da mesma maneira, ou seja, fazendo-se a média entre duas velocidades para cada frequência específica.

Com a velocidade calculada dessa maneira, determinou-se o valor do V_{zp} como sendo o valor máximo que a velocidade atinge ao anoitecer antes da sua inversão de sentido. Os valores do V_{zp} foram encontrados entre ~ 21 UT e 22 UT e correspondem aos meses de outubro, novembro e dezembro, período na qual o V_{zp} é mais pronunciado no setor

equatorial brasileiro. A Figura 5.1 ilustra a altura real da camada F para as frequências de 5 e 6 MHz e a velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para o dia 05/10/2001. Na mesma Figura, está denotado o que chamamos nesta dissertação de V_{zp} . Nota-se que nesse caso, o V_{zp} atingiu $\sim 70\text{m/s}$ por volta de 2130 UT.

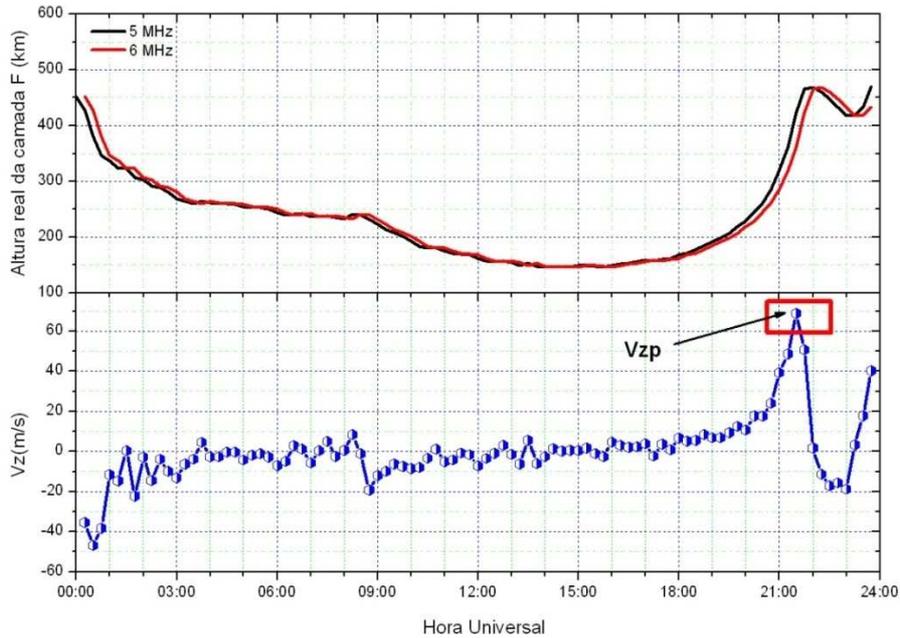


Figura 5.1 - Exemplo da altura real e velocidade de deriva vertical do plasma da camada F obtida através das frequências específicas do plasma (5 e 6 MHz) para o dia 05/10/2001 sobre São Luís.

Segundo Bittencourt e Abdu (1981), o cálculo da velocidade levando em conta somente a variação da altura pelo tempo é válido quando a altura da camada F é igual ou superior a 300 km e isso geralmente ocorre nas horas em que o campo elétrico zonal é intensificado. Para os casos em que a altura da camada esteve abaixo dos 300 km, como pode ser vista na Figura 5.2 para São Luís e Fortaleza, foi feita uma correção nos valores do V_{zp} , visto que nesses casos a camada F apresenta um movimento de subida aparente, uma vez que a mesma está sendo “corroída” pelos processos de recombinação. Segundo os autores, nas horas noturnas apenas os processos de produção podem ser negligenciados. Já os processos de perda devido à recombinação devem ser levados em consideração.

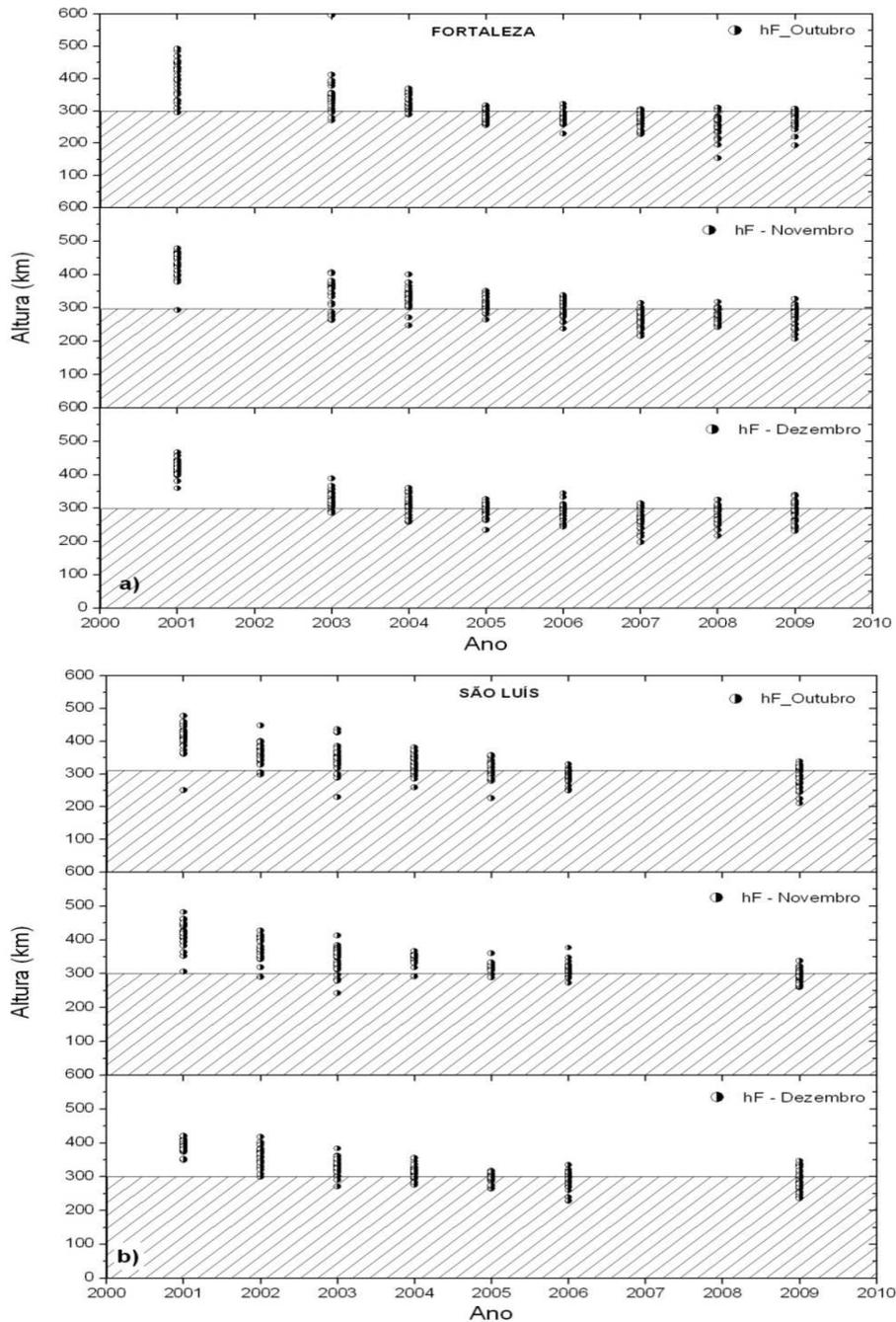


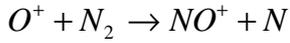
Figura 5.2 - Altura real média da camada F para os meses de outubro, novembro e dezembro obtida através das frequências específicas do plasma (5 e 6 MHz) entre 21 e 22 UT para a) Fortaleza e b) São Luís.

A correção no V_{zp} foi feita calculando-se o fator de perda por recombinação - βH - (Subbarao e Krishnamurthy, 1983), onde β é o coeficiente de recombinação e H é a altura de escala de ionização.

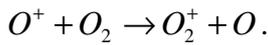
Considerando uma atmosfera em que os constituintes O_2 e N_2 são igualmente importantes nos processos de perda, o coeficiente β pode ser obtido da seguinte forma:

$$\beta = k_1[N_2] + k_2[O_2],$$

onde k_1 é a taxa de reação para:



e k_2 a taxa de reação para:



Os coeficientes k_1 e k_2 utilizados nesta correção foram obtidos de acordo com Anderson e Rusch (1980) dados por:

$$k_1 = 7 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 2 \times 10^{-11} \cdot (T_n/300)^{-\frac{1}{2}} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}, \text{ onde } T_n \text{ é a temperatura neutra.}$$

A altura de escala da ionização pode ser obtida pela expressão $H = N \left(\frac{dh}{dN} \right)$, onde N é a densidade eletrônica e h a altura da camada.

Os valores da concentração de O_2 , N_2 e a temperatura neutra T_n foram obtidos pelo modelo atmosférico MSISE-90 (Hedin, 1991). Afim de obter essas concentrações e a temperatura neutra, escolheu-se um dia de cada mês como representativo para os dias calmos. Já para os dias perturbados (classificados de acordo com o somatório de 24h do índice Kp), os valores foram obtidos para o dia específico. Em relação à escolha do horário (parâmetro de entrada do modelo) considerou-se a hora em que o Vzp geralmente ocorre (entre 21 e 22 UT).

Uma vez calculado o fator βH , pode-se encontrar a velocidade real de subida da camada através da equação 5.2.

$$V_r = \frac{dh_F}{dt} - \beta H \quad (5.2)$$

onde V_r corresponde à velocidade de deriva real devido a campos elétricos, $\frac{dh_F}{dt}$ é a velocidade de deriva aparente e βH o termo devido a recombinação.

A diferença entre os valores do Vz_p considerando os efeitos de recombinação ou não pode ser vista na Figura 5.3.

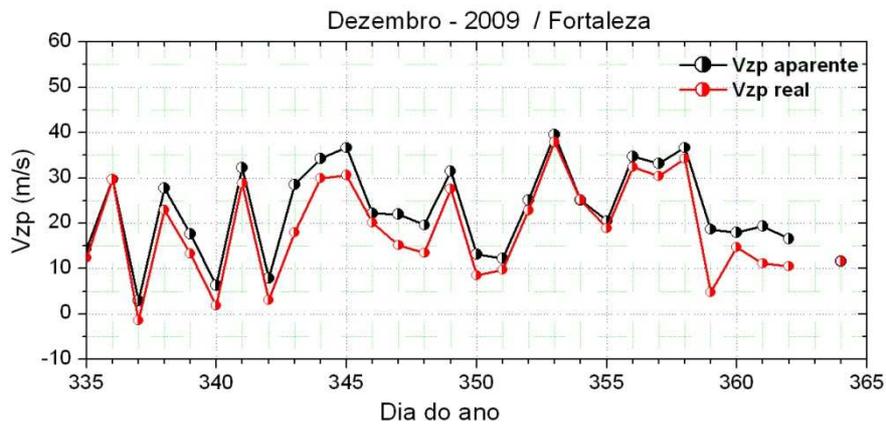


Figura 5.3 - Diferenças observadas entre o Vz_p real e aparente para o mês de dezembro de 2009.

Para as velocidades de deriva vertical do plasma apresentadas no capítulo 7 desta dissertação, deve-se considerar somente a velocidade no momento em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal, ou seja, nas horas do pôr-do-sol, uma vez que o horário de interesse do estudo é este. Neste caso, foi observado que a altura da camada esteve acima de 300 km e então os fatores de recombinação podem ser desprezados. Para as análises feitas em outros horários que não seja no momento da intensificação do campo elétrico zonal, também foi verificado que a camada estava acima de 300 km.

Os dados utilizados no estudo se referem aos meses de outubro, novembro e dezembro dos anos indicados na Tabela 5.1 para as regiões de São Luís e Fortaleza.

Tabela 5.1 - Anos utilizados para o estudo.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
SL	x	x	x	x	x	x			x
FZ	x		x	x	x	x	x	x	x

Os parâmetros utilizados nessa dissertação foram os seguintes:

- **Índice AE (*Eletrojato Auroral*)** - obtido a partir de uma cadeia de magnetômetros dispostos ao longo do globo terrestre na zona do eletrojato auroral. Sua intensidade é proporcional ao depósito de energia cinética das partículas que se precipitam na região auroral (disponível no site: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html>);
- **Índice Dst (*Disturbance Storm Time*)** - obtido a partir de uma cadeia de magnetômetros dispostos ao longo do globo terrestre na região equatorial. Esse índice representa a intensidade da corrente de anel, durante períodos perturbados (disponível no site: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>);
- **Bz (*Campo Magnético Interplanetário*)** - Componente norte-sul do campo magnético interplanetário. Quando está para sul, ocorre um forte acoplamento energético entre o meio interplanetário e a magnetosfera terrestre. Esse acoplamento, atribuído ao fenômeno da reconexão entre os campos magnético interplanetário e magnetosférico, favorece a entrada de partículas energéticas na região auroral, o que faz com que o eletrojato auroral se intensifique e expanda para latitudes mais baixas. Quando se Bz inverte para norte, tal acoplamento diminui e o eletrojato auroral se retrai (disponível no site: <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/dataset.do>);
- **F10.7 (*Fluxo Solar*)** - O índice F10.7 é uma medida de emissão da radiação solar em um comprimento de onda de 10,7 cm (2800MHz) recebida na superfície da Terra. As determinações do fluxo F10.7 são feitas com monitores de fluxo (antenas parabólicas) que são igualmente sensíveis a todos os pontos do disco solar, e são equipados para medir as emissões linearmente polarizadas no sentido norte-sul.

- **Índice Kp:** número proporcional ao grau de perturbação global do campo magnético terrestre. Os valores de Kp representam uma média de valores obtidos num intervalo de três horas, portanto, um dia apresenta oito valores de Kp. A classificação entre dias calmos e perturbados pode ser feita de acordo com a soma desses oito valores. Se ΣKp for superior a 24+ o dia é classificado como perturbado, caso contrário o dia é classificado como calmo (disponível no site: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>).

CAPÍTULO 6

RESULTADOS I: COMPORTAMENTO DO V_{zp} EM FUNÇÃO DO FLUXO

SOLAR

Com o objetivo de analisar a dependência do V_{zp} com o fluxo solar, consideraram-se quatro situações:

1. análise do V_{zp} real em função do fluxo solar somente para dias calmos;
2. análise do V_{zp} real em função do fluxo solar somente para dias perturbados;
3. análise do V_{zp} real em função do fluxo solar para dias calmos e perturbados;
4. análise do V_{zp} aparente em função do fluxo solar para dias calmos e perturbados.

A partir dessas quatro análises, foi possível avaliar as diferenças entre o comportamento do V_{zp} em função do fluxo solar para cada situação, bem como influência da inclusão ou não dos dias perturbados nos resultados obtidos.

6.1 Dependência do V_{zp} real com o Fluxo Solar (F10.7) para dias calmos - Fortaleza

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise feita para todos os anos descritos na Tabela 5.1 e os meses referentes à primeira situação, ou seja, análise de V_{zp} real somente para dias calmos (classificados de acordo com o somatório do índice K_p). A Figura 6.1 mostra a análise do V_{zp} sobre Fortaleza utilizando os 8 anos disponíveis de dados para essa região, bem como o coeficiente de correlação da curva (R).

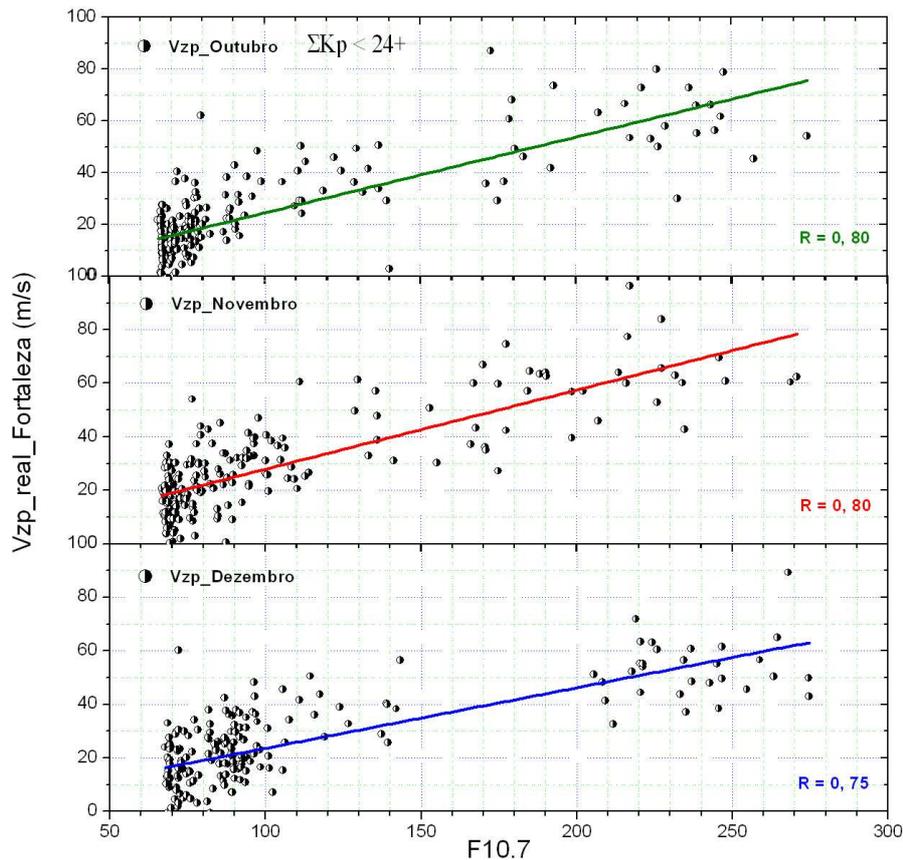


Figura 6.1 - Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (Vzp) sobre Fortaleza (2001-2009, exceto para 2002 por falta de dados) para dias calmos, juntamente com os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro.

Características observadas:

- para baixos valores de fluxo ($F10.7 < 100$), os picos de velocidade se concentram numa faixa aproximada de 0 a 40 m/s. À medida que o valor de fluxo aumenta, o pico pré-reversão da velocidade também aumenta;
- as curvas de ajuste para os três meses analisados mostram claramente que o Vzp aumenta linearmente com F10.7. Em outubro o aumento foi de ~ 15 a 68 m/s para valores de F10.7 variando de ~ 70 a 250 unidades. Em novembro o aumento do Vzp com o fluxo solar foi maior, de ~ 20 a 71 m/s e em dezembro o aumento foi de ~ 16 a 58 m/s para a mesma faixa de variação de fluxo;
- em dezembro a falta de pontos entre 150 a 200 unidades de fluxo solar não corresponde à falha de dados, mas simplesmente porque neste mês, em relação aos anos e dias disponíveis para a análise, não existiram valores de fluxo variando nesta faixa.

A comparação entre os ajustes lineares da Figura 6.1 pode ser analisada na Figura 6.2.

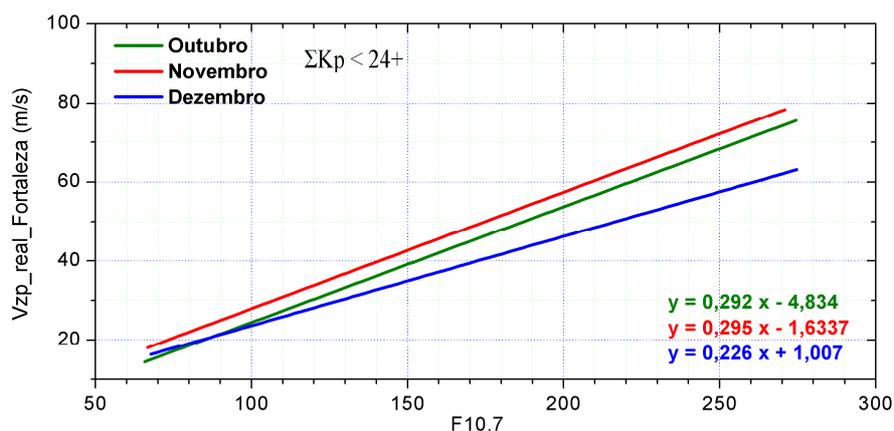


Figura 6.2 - Comparação entre os ajustes lineares da Figura 6.1 para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre para Fortaleza para dias calmos.

Nesta Figura, nota-se que a dependência do Vzp com F10.7 para cada mês se difere uma da outra à medida que F10.7 aumenta. Nota-se também que a diferença observada entre as análises referentes a outubro e a novembro foi praticamente constante para toda a faixa de fluxo observada. Para o mês de dezembro, a diferença torna-se maior em relação a outubro e a novembro à medida que o fluxo solar aumenta. Para altos valores de fluxo, esse resultado talvez não seja muito representativo, uma vez que os pontos representando o Vzp apresentam-se dispersos. Sendo assim, seriam necessários mais dias analisados que cobrissem essas faixas maiores de fluxo para se afirmar com certeza os resultados encontrados.

6.2 Dependência do Vzp com o Fluxo Solar (F10.7) para dias calmos – São Luís

A mesma análise foi feita com os dados referentes a São Luís e pode ser vista na Figura 6.3.

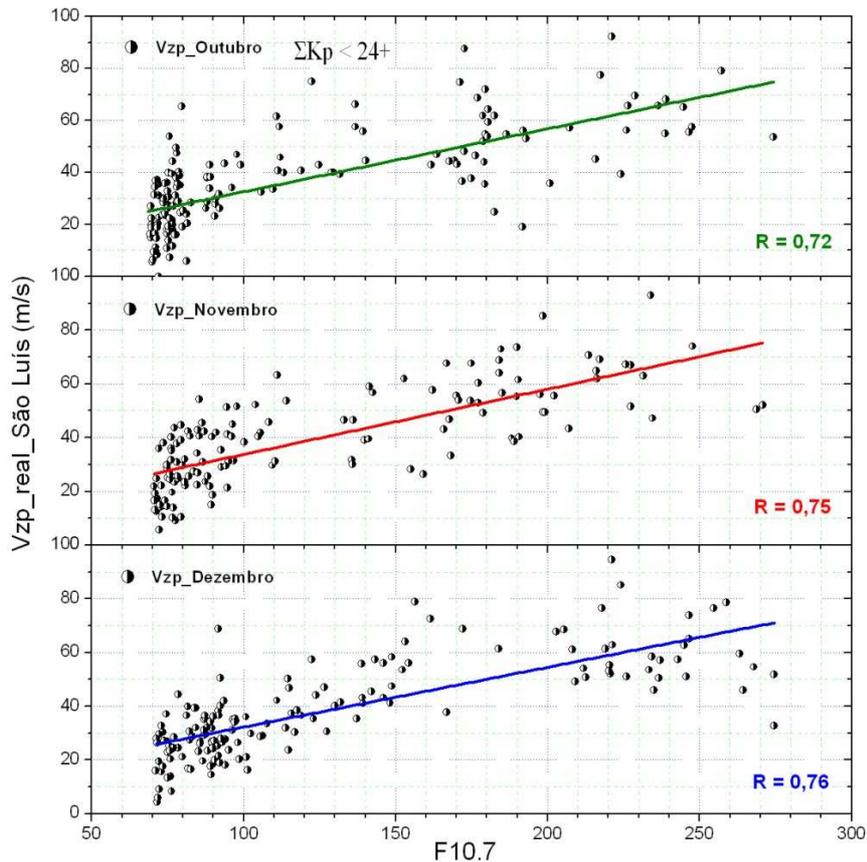


Figura 6.3 – Pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (Vzp) sobre São Luís (2001-2009 exceto 2007 e 2008 por falta de dados), juntamente com os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro.

Características observadas:

- semelhante a Fortaleza, para baixos valores de fluxo ($F10.7 < 100$), nota-se que a maioria dos picos de velocidade se concentram numa faixa de ~ 0 a 40 m/s. À medida que o valor de fluxo aumenta o pico de velocidade também aumenta e isso é evidente na dispersão dos pontos em relação à reta que representa o ajuste linear feito;
- em outubro o aumento foi de ~ 25 a 68 m/s para valores de fluxo variando de ~ 70 a 250 unidades. Em novembro o aumento da velocidade foi de ~ 26 a 70 m/s e em dezembro o aumento foi de ~ 25 a 65 m/s para mesma variação de fluxo.

Os resultados obtidos desta análise podem ser comparados com a velocidade de deriva vertical média obtida pelo radar incoerente de Jicamarca por Fejer et al., (1991). Na ocasião, os autores encontraram uma variação de ~ 8 a 70 m/s para o solstício de verão (novembro-fevereiro) e de ~ 15 a 75 m/s para o equinócio (março-abril, setembro-outubro) para mesma variação de fluxo. Em relação ao equinócio, utilizando como

referência os resultados para o mês de outubro dessa dissertação, nota-se que há uma discordância maior entre os valores de baixa atividade solar. Já em relação ao solstício, utilizando novembro e dezembro como referência, as discrepâncias foram maiores tanto para baixo como alto fluxo solar. Essas diferenças podem ser atribuídas as peculiaridades geomagnéticas da região brasileira (ângulo de declinação magnética e a fraca intensidade do campo magnético) ou devido à análise ser restrita a 7 anos para os meses de outubro, novembro e dezembro, enquanto a análise feita com os dados de Jicamarca foi baseada em ~20 anos. Outro ponto importante é que sobre a região de Jicamarca o maior alinhamento entre o terminadouro solar e as linhas do campo magnético terrestre ocorre em setembro, situação diferente para a região brasileira na qual isso ocorre durante o mês de novembro.

A Figura 6.4 mostra a comparação entre os ajustes lineares feitos para São Luís. É interessante notar que ao contrário de Fortaleza, não há significativas diferenças no comportamento mensal do Vz_p. A mesma apresentou um aumento praticamente constante entre os meses em estudo, fato que não se observa para Fortaleza. Os ajustes lineares mostram que o comportamento do Vz_p em relação aos baixos valores de fluxo para os meses de outubro e novembro são praticamente iguais e à medida que o fluxo aumenta essa situação não muda muito.

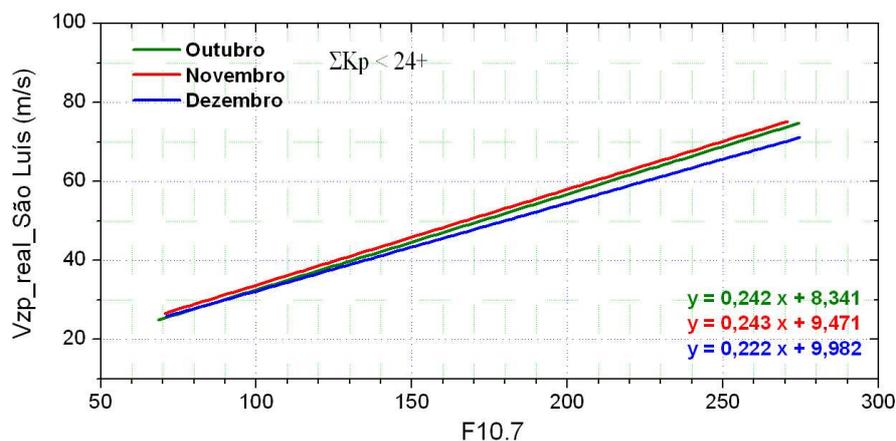


Figura 6.4 - Comparação entre os ajustes lineares da Figura 6.3 para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís somente para dias calmos.

6.3 Comparações entre os ajustes lineares do Vz_p para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís e Fortaleza para dias calmos

A Figura 6.5 mostra a comparação entre os ajustes lineares para outubro, novembro e dezembro para São Luís e Fortaleza.

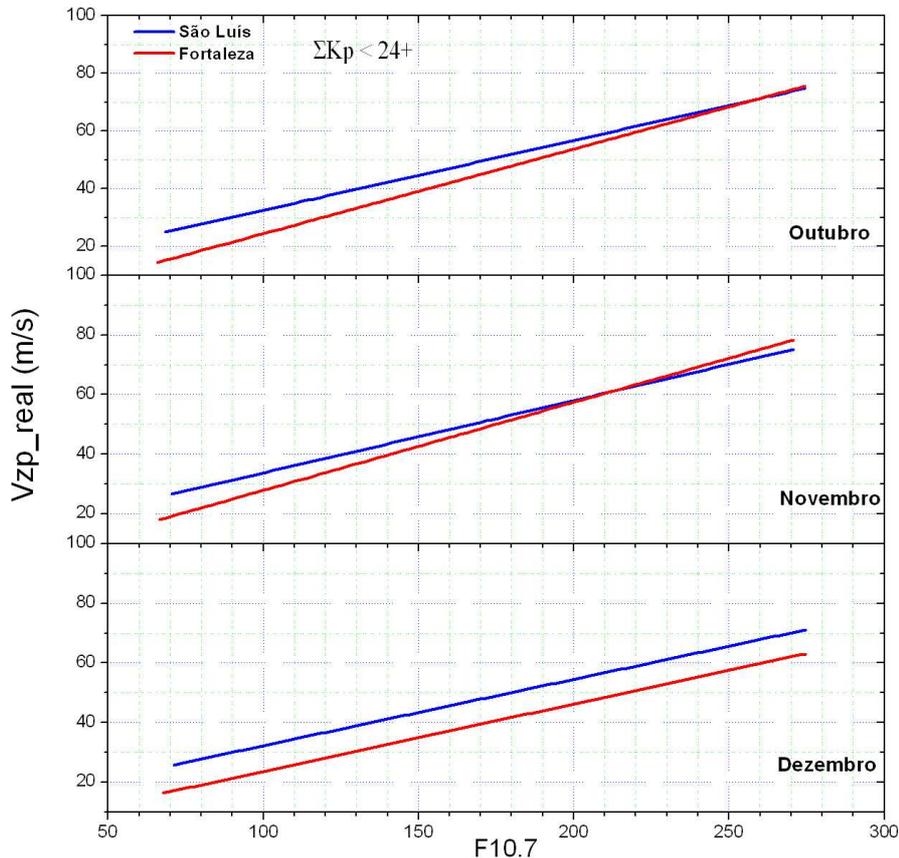


Figura 6.5 - Comparações entre os ajustes lineares para os meses de outubro, novembro e dezembro feitos para São Luís e Fortaleza.

Para o mês de dezembro, a velocidade sobre São Luís foi superior a Fortaleza para toda a faixa de fluxo solar observada, no entanto para os meses de outubro e novembro a diferença entre o Vz_p das duas regiões diminui. Isso pode ter sido influenciado pela quantidade de dados analisados, uma vez que para Fortaleza não há dados, por exemplo, para o ano de 2002, representativo de alta atividade solar. Para baixos valores de fluxo, a maior diferença entre os ajustes feitos pode ser observada para o mês de dezembro. O fato do Vz_p sobre São Luís ser superior a Fortaleza pode ser atribuído aos diferentes ângulos de inclinação magnética entre as duas localidades. O maior ângulo de inclinação magnética sobre Fortaleza ($I \approx -11.5^\circ$) proporciona um efeito maior dos

ventos meridionais sobre a deriva vertical dessa região, situação diferente para São Luís, uma vez que $I \approx 0$.

6.4 Comparações entre os ajustes lineares do Vz_p para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís e Fortaleza entre dias calmos e perturbados

A mesma análise feita para os dias calmos foi também feita para os dias perturbados. As comparações entre os resultados obtidos para Fortaleza e São Luís para os meses de outubro, novembro e dezembro podem ser vistos na Figura 6.6 e Figura 6.7, respectivamente.

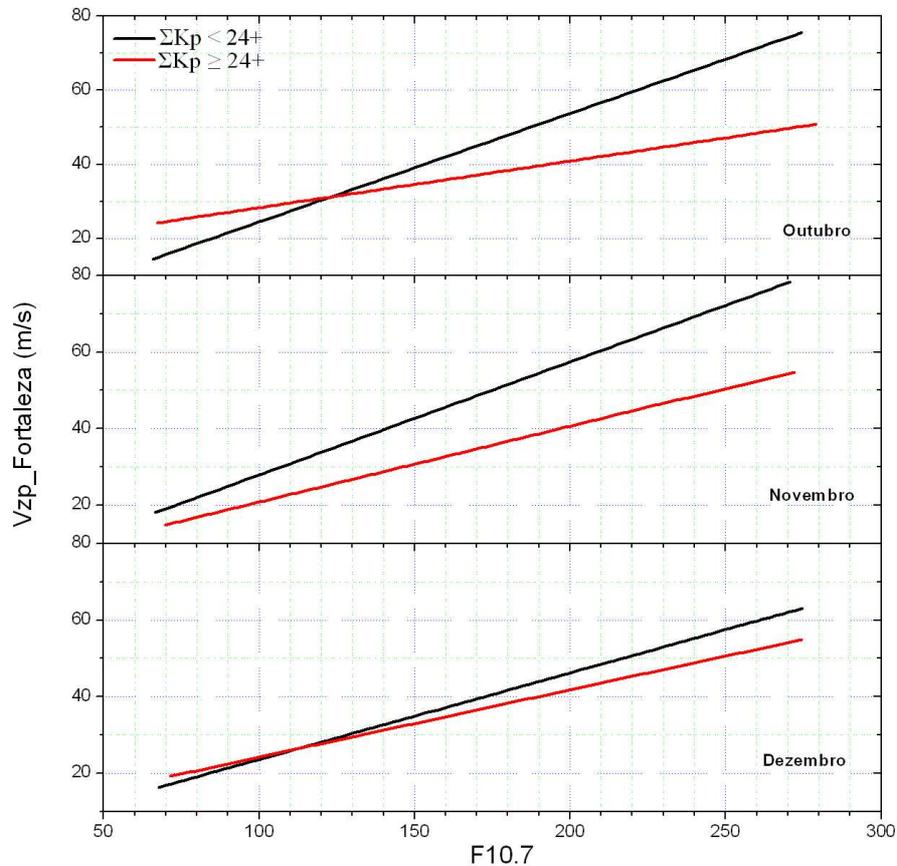


Figura 6.6 - Comparações dos ajustes lineares entre dias calmos e perturbados para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre Fortaleza.

Características observadas:

- em outubro a variação do Vz_p para os dias perturbados foi de ~ 25 a 47 m/s para uma variação de ~ 70 a 250 unidades de F10.7. Já para os dias calmos, esta variação foi de ~ 15 a 68 m/s para a mesma variação de fluxo. Para valores de fluxo menores do que 100 observa-se que o ajuste linear feito para os dias perturbados foi superior aos dos dias calmos;

- para o mês de novembro, a variação do Vz_p perturbado foi de ~15 a 50 m/s para F10.7 variando de 70 a 250 unidades. Para os dias calmos, a variação foi de ~20 a 71 m/s para mesmo valor de fluxo;
- por fim o mês de dezembro mostrou uma variação de ~20 a 50 m/s para os dias perturbados e ~16 a 58 m/s para os dias calmos, para fluxo variando de 70 a 250 unidades. Dentre os meses analisados, dezembro mostrou a menor variação entre os dias calmos e perturbados.

A comparação entre as análises para São Luís pode ser vista na Figura 6.7:

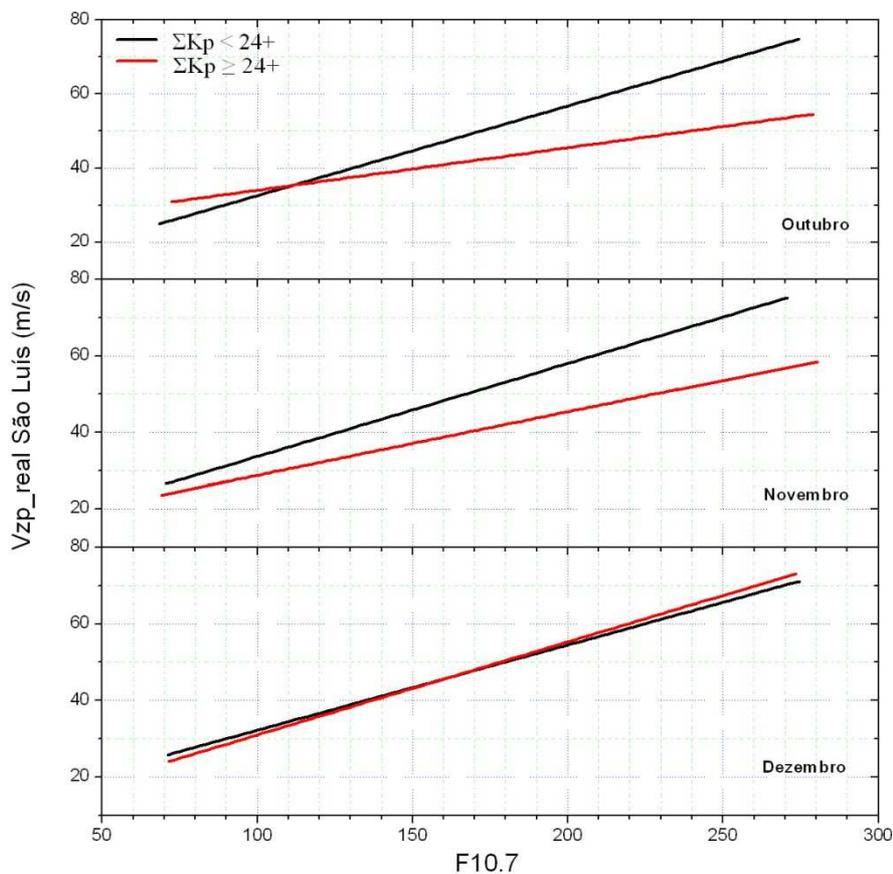


Figura 6.7 - Comparações dos ajustes lineares entre dias calmos e perturbados para os meses de outubro, novembro e dezembro sobre São Luís.

Características observadas:

- em outubro a variação do Vz_p para os dias perturbados foi de ~ 31 a 50 m/s para uma variação de 70 a 250 unidades de F10.7. Já para os dias calmos, essa variação foi de ~25 a 68 m/s para mesma variação de fluxo. Similar a Fortaleza,

para valores de fluxo menores do que 100 observa-se que o ajuste linear feito para os dias perturbados foi superior aos calmos;

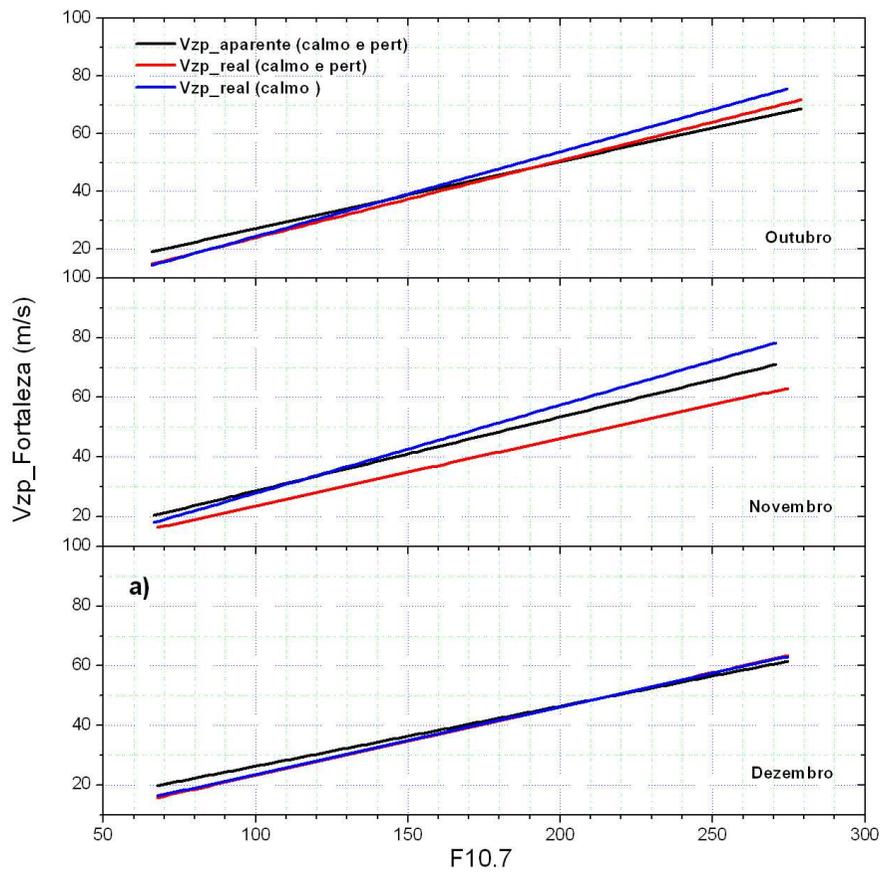
- para o mês de novembro, a variação do Vz_p perturbado foi de ~24 a 52 m/s para F10.7 variando de ~70 a 250 unidades. Para os dias calmos, a variação foi de ~26 a 70 m/s para mesmo valor de fluxo;
- para dezembro, o Vz_p mostrou uma variação de ~24 a 66 m/s para os dias perturbados e ~25 a 65 m/s para os dias calmos, para fluxo variando de 70 a 250 unidades. Similar a Fortaleza, para este mês, nota-se poucas variações entre as análises feitas.

De uma maneira geral, observa-se que o comportamento mensal do Vz_p mediante a análise feita entre as duas regiões foi similar. Em novembro, mês em que ocorre um maior alinhamento entre o terminadouro solar e as linhas de campo magnético, observa-se que tanto em São Luís quanto Fortaleza, o Vz_p cresce em função do fluxo solar a uma taxa mais rápida em relação os outros meses, tanto para o Vz_p calmo como para o Vz_p perturbado.

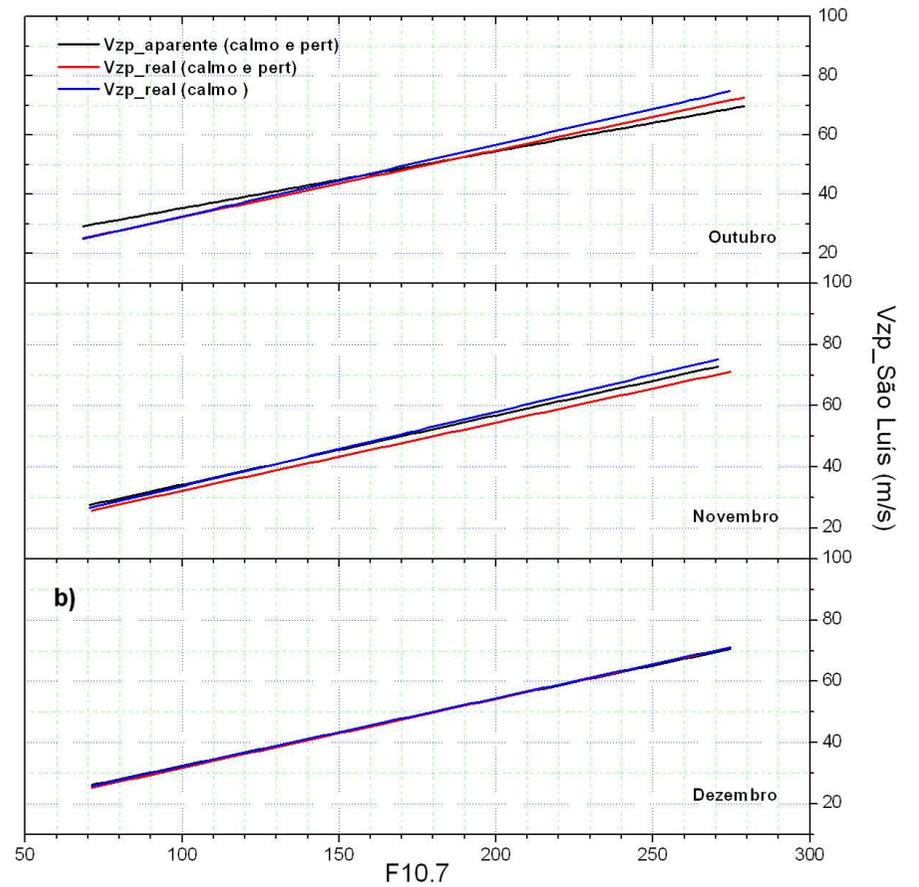
Comparando os dados de São Luís com Jicamarca (Fejer et al., 1991, Figura 4), observa-se algumas diferenças entre os resultados obtidos. Enquanto para Jicamarca o Vz_p perturbado em outubro (equinócio) variou de ~15 a 55 m/s para F10.7 variando de 70 a 250 unidades, em São Luís o Vz_p perturbado variou de ~31 a 50 m/s para a mesma faixa de fluxo solar. A maior diferença ocorre para baixos valores de F10.7. Já durante o solstício de verão, representado aqui por novembro e dezembro, em Jicamarca nota-se uma variação de ~15 a 50 m/s enquanto nossas análises mostram uma variação em novembro de ~24 a 52 m/s e dezembro de ~24 a 66 m/s. Essas diferenças podem ser atribuídas como já dito anteriormente, aos diferentes ângulos de declinação magnética entre as duas regiões e também pelo fato de nossa análise ser estritamente mensal. Já o estudo realizado por Fejer et al., 1991, se refere a uma análise sazonal, ou seja, no equinócio estão incluídos os meses de março, abril, setembro e outubro. No solstício de verão inclui-se além de novembro e dezembro os meses de janeiro e fevereiro.

Por fim, é importante avaliar as diferenças observadas no estudo da dependência do V_{zp} em função do fluxo solar, para as diferentes situações estudadas. O resultado desta comparação pode ser vista na Figura 6.8a e 6.8b. Essa análise tem como objetivo ressaltar dois pontos importantes:

- a influência dos dias perturbados na análise do V_{zp} em função do fluxo solar;
- a importância da correção do V_{zp} devido aos fatores de recombinação quando a altura da camada F está abaixo dos 300 km de altura.



a)



b)

Figura 6.8 - Comportamento da dependência do Vzp com o fluxo solar para três casos: Vzp aparente (dias calmos e perturbados), Vzp real (dias calmos) e Vzp real (dias calmos e perturbados) sobre a) Fortaleza e b) São Luís.

Características observadas em Fortaleza (Figura 6.8a):

- em outubro, observa-se que para valores de $F10.7 < 150$ não há praticamente nenhuma diferença entre as análises do Vzp real para dias calmos e perturbados e a do Vzp real somente para dias calmos. Em relação ao Vzp aparente, nota-se uma diferença maior em relação ao Vzp real para baixos valores de fluxo;
- em novembro é possível notar grandes diferenças entre os três casos analisados. Em relação ao Vzp aparente, nota-se uma diferença em relação ao Vzp real, principalmente para baixos valores de fluxo. Os dias perturbados tiveram grande influência nos resultados obtidos e podemos notar isso pelo comportamento das retas em azul e vermelho. Nota-se também que a diferença entre o Vzp aparente e o Vzp real incluindo dias calmos e perturbados aumenta à medida que o fluxo aumenta. Para toda faixa de fluxo analisada, o Vzp real incluindo dias calmos e perturbados foi inferior aos outros dois casos;
- para dezembro, similar a outubro, os dias perturbados praticamente não tiveram influência nos resultados obtidos para este mês. O Vzp aparente mostra-se superior aos outros dois casos para $F10.7$ aproximadamente menor que 180 unidades.

Características observadas em São Luís (Figura 6.8b):

- em outubro, observa-se comportamento geral para as três análises foi similar a Fortaleza para toda a faixa de fluxo solar analisada;
- em novembro, ao contrário do que se observou em Fortaleza, notam-se pequenas variações entre o Vzp real (calmo e perturbado) e o Vzp aparente, indicando que o Vzp não sofreu grandes variações devido aos processos de recombinação. Com a exclusão dos dias calmos na análise do Vzp real, nota-se diferenças maiores entre os valores mais altos de $F10.7$;
- já para o mês de dezembro, não foi notada nenhuma diferença entre as três situações analisadas. Nesse caso, nem os dias perturbados e nem os fatores de recombinação influenciaram os resultados referente ao Vzp incluindo somente dias calmos.

6.5 Variabilidade diária observada no Vzp

Com o objetivo de analisar a variabilidade diária do Vzp durante o período estudado, construiu-se a Figura 6.9, que se refere aos valores do Vzp durante os meses de outubro, novembro e dezembro observados em Fortaleza e a Figura 6.10 referente aos valores do Vzp para São Luís. Tanto para São Luís quanto Fortaleza, nota-se que o Vzp apresenta grande variabilidade dia-a-dia. Essa variabilidade, durante dias calmos pode ser atribuída, por exemplo, à propagação de ondas planetárias. Como já dito no capítulo 3, tópico 3.4 desse trabalho, acredita-se que os processos interativos que envolvem as ondas atmosféricas, controlam a dinâmica e a fenomenologia dos dias calmos (Abdu et al., 2006b). Esses processos interativos, por sua vez, desenvolvem papel importante no campo elétrico zonal, responsável pela intensificação da deriva vertical ao entardecer.

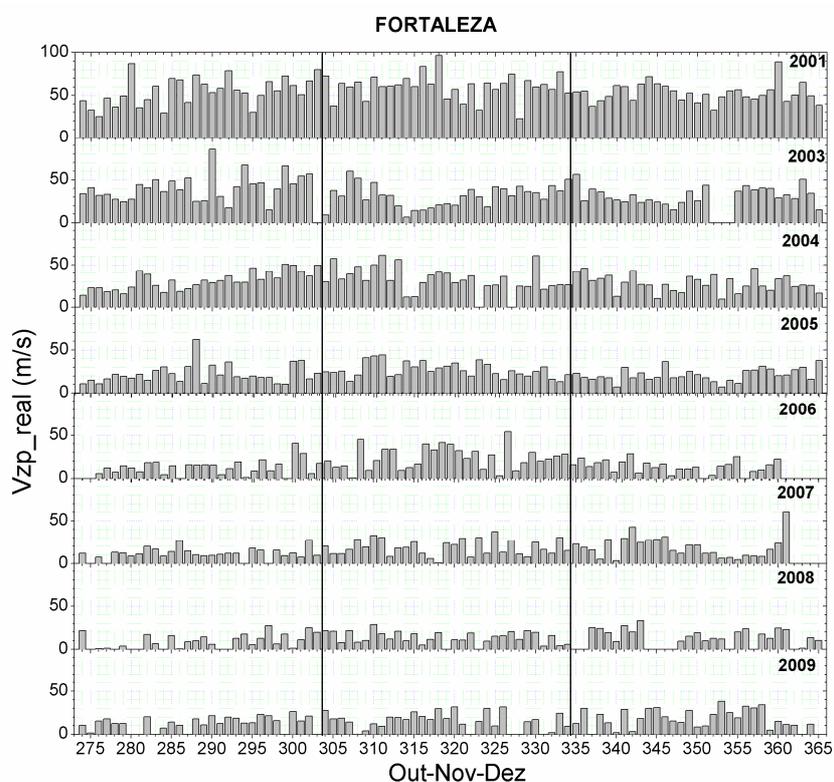


Figura 6.9 - Comportamento do Vzp para os meses de outubro à dezembro de 2001-2009 (exceto 2002), sobre a região de Fortaleza.

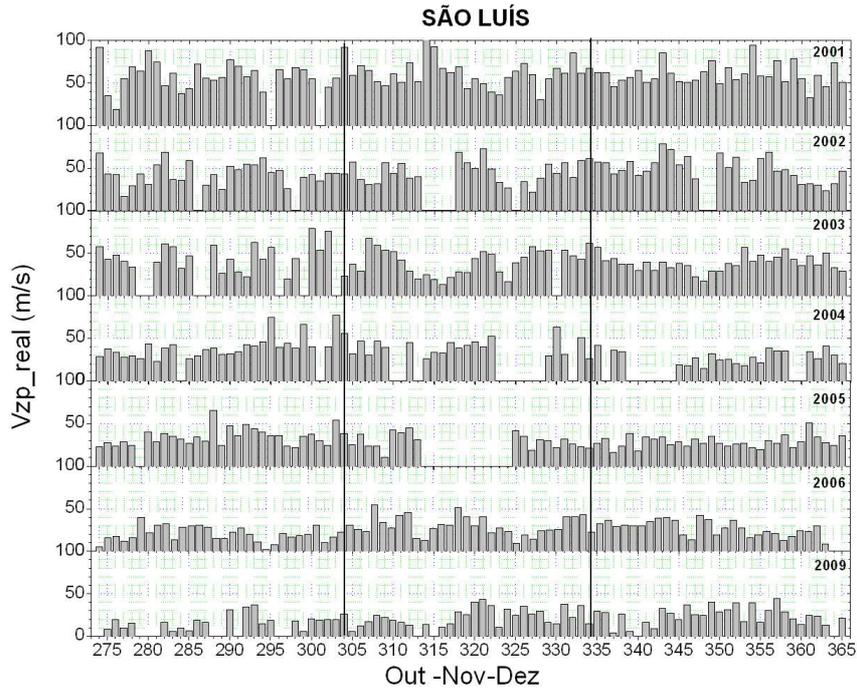


Figura 6.10 - Comportamento do Vzp para os meses de outubro à dezembro de 2001-2009 (exceto 2007 e 2008), sobre a região de São Luís.

Em Fortaleza (Figura 6.9), observa-se que em outubro (275-304) a menor variabilidade na amplitude do Vzp pode ser vista nos anos de 2004 a 2009. Já para São Luís (Figura 6.10), nota-se uma menor variabilidade em dezembro de 2005 (335-365). É notável que à medida que se aproxima do mínimo solar, as amplitudes do Vzp diminuem para as duas estações, principalmente para Fortaleza em outubro, denotando assim o efeito que o fluxo solar gera no Vzp.

As diferenças observadas nas amplitudes do Vzp entre os anos de alta e baixa atividade solar para Fortaleza e São Luís podem ser atribuídas aos efeitos que o fluxo solar gera no ambiente ionosférico e nos parâmetros que participam diretamente ou indiretamente na geração dos campos elétricos que são os responsáveis pela deriva vertical ionosférica.

De todos os anos analisados nesse estudo, 2001 e 2008 apresentaram respectivamente, o maior e o menor valor do fluxo solar médio ($F_{10.7m}$) entre os meses de outubro a dezembro. Com o objetivo avaliar as diferenças observadas na variabilidade diária do Vzp entre essas duas condições, ou seja, alta e baixa atividade solar fez-se a comparação

entre os valores médios do Vzp real (Vzp_m) para os dois anos citados, como mostra a Figura 6.11.

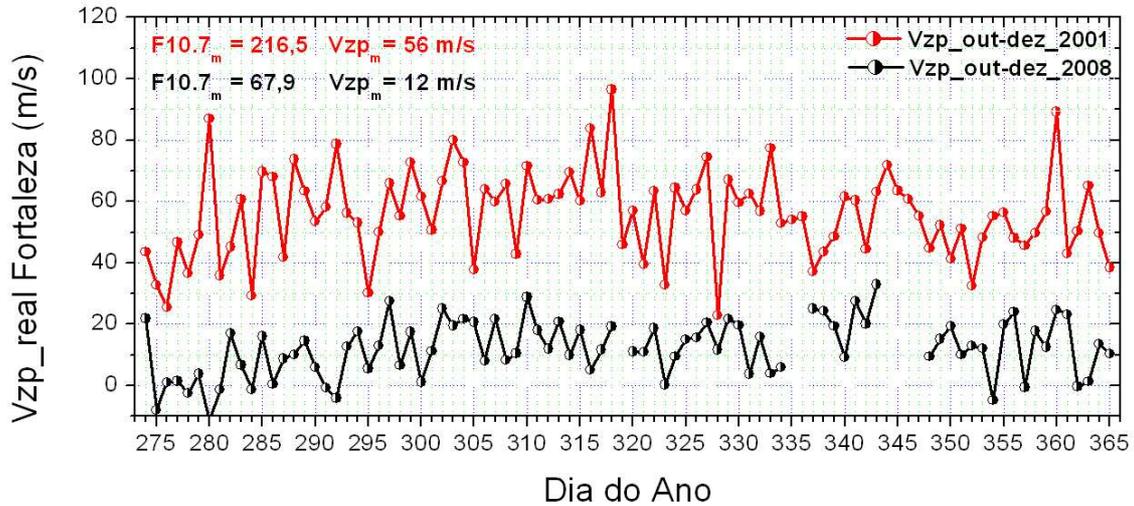


Figura 6.11 - Variabilidade observada no Vzp durante os meses de outubro a dezembro para os anos de 2001 ($F10.7_m = 216,5$; $Vzp_m = 56\text{m/s}$) e 2008 ($F10.7_m = 67,9$; $Vzp_m = 12\text{ m/s}$) sobre Fortaleza.

Nota-se que no ano de 2008 ($F10.7_m = 67,9$), embora existam variabilidades diárias na amplitude do Vzp, essas são bem inferiores as amplitudes observadas em 2001 ($F10.7_m = 216,5$). É importante lembrar que quanto maior o fluxo de radiação provinda do sol, maior será a quantidade de elétrons livres na ionosfera, portanto mais intensos serão os campos elétricos formados nesta região e consequentemente as amplitudes do Vzp serão maiores. O valor do Vzp_m para os três meses (outubro, novembro e dezembro) foi de $\sim 56\text{ m/s}$ em 2001 e $\sim 12\text{ m/s}$ em 2008. Nota-se que em 2008, o Vzp_m foi $\sim 80\%$ menor do que em 2001. Esta análise foi feita somente para Fortaleza, pois em 2008 não há dados disponíveis para São Luís.

6.6 Comportamento anual do Vzp_m (Vzp médio) e do $F10.7_m$ (F10.7 médio)

Neste momento será apresentado como foi o comportamento médio do Vzp e do F10.7 ao longo dos anos estudados nesta dissertação. A Figura 6.12 mostra os resultados para Fortaleza e a Figura 6.13 mostra os resultados para São Luís.

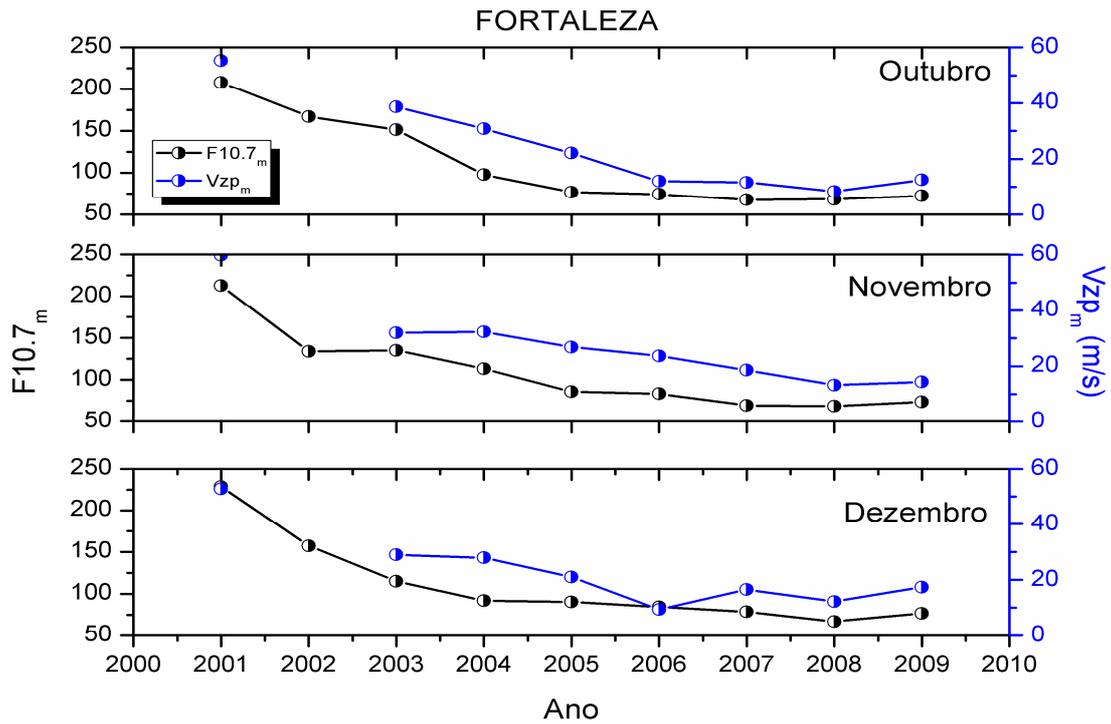


Figura 6.12 - Comportamento médio do Vzp e do fluxo solar para a região de Fortaleza em função do ano.

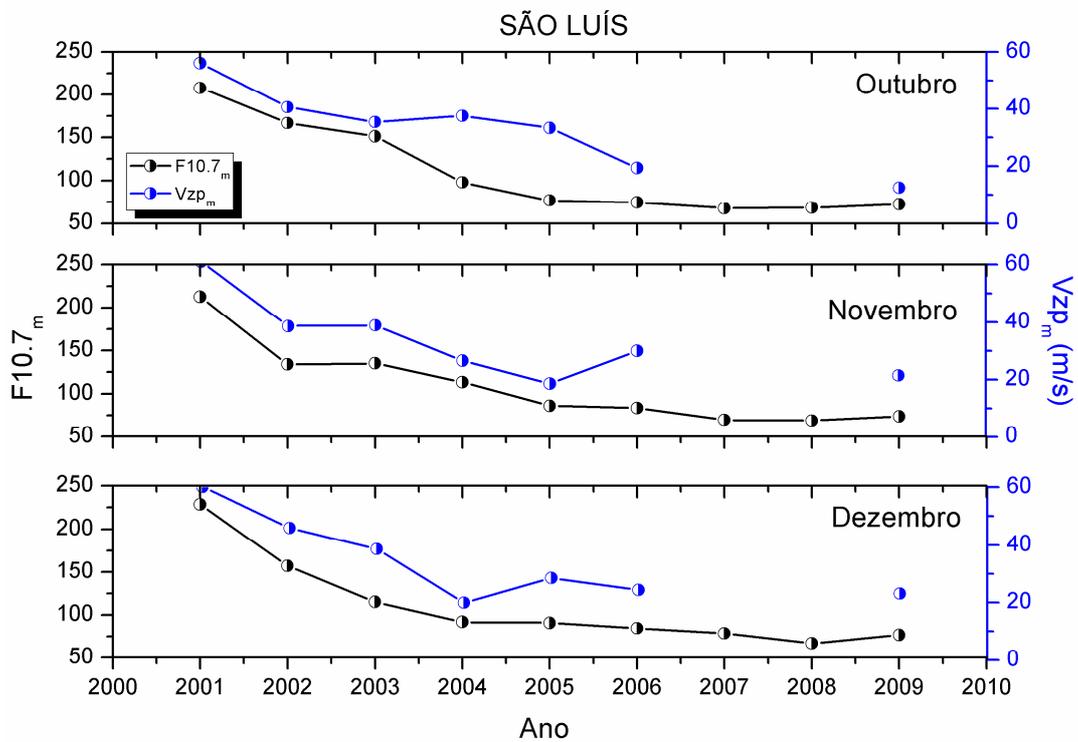


Figura 6.13 - Comportamento médio do Vzp e do fluxo solar para a região de São Luís em função do ano.

Os resultados para São Luís e Fortaleza mostram boas correlações entre o comportamento médio do Vz_p e do F10.7. O correspondente aumento ou diminuição do Vz_p com o fluxo solar pode ser causado pelo correspondente aumento ou diminuição dos ventos termosféricos zonais, que por sua vez ativam o dínamo da camada F no momento em que existe um gradiente longitudinal e com a hora local na condutividade da região E ao entardecer. As variações no mesmo parâmetro pode ser também responsáveis pela variação do Vz_p em função de F10.7.

6.7 Discussões

6.7.1 Efeitos do vento meridional termosférico no Vz_p

Tanto a análise do Vz_p aparente como do Vz_p real mostrou que o Vz_p para São Luís é maior do que o Vz_p para Fortaleza. Uma explicação para este fato pode ser dada em termos do vento meridional termosférico, que apresenta um efeito significativo no movimento da camada F2 ionosférica conforme discutido por Abdu et al. (2010).

A componente do vento ao longo do meridiano magnético U_M pode ser expressa como:

$$U_M = U_{GM} \cos(\delta_M) + U_{GZ} \sin(\delta_M), \quad (6.1)$$

onde U_{GM} representa a componente geográfica meridional, U_{GZ} a componente geográfica zonal e δ_M a declinação magnética. Numa região de grande ângulo de declinação magnética, a componente geográfica do vento zonal pode movimentar a camada de ionização significativamente (Muella, 2004).

Para latitudes equatoriais como São Luís, as linhas do campo magnético são praticamente horizontais e então o vento meridional magnético não contribui para movimentar a camada ionizada na vertical, sendo este movimento causado essencialmente pela deriva $\vec{E} \times \vec{B}$. Já em regiões de latitudes mais baixas, caso de Fortaleza, o movimento da camada ionizada é causado pela influência de vários processos eletrodinâmicos que envolvem os efeitos do campo elétrico gerado pelo dínamo, ventos neutros e o campo magnético. Sendo assim, em Fortaleza, o Vz_p pode ser expresso como:

$$V_{zp} = V_{zpo} \cdot \cos(I) - U_M \cdot \sin(I) \cdot \cos(I), \quad (6.2)$$

onde U_M é o vento meridional termosférico, V_{zpo} é o pico pré-reversão da velocidade de deriva do plasma no equador magnético e I a inclinação magnética. Em São Luís, com $I \approx 0$, o V_{zp} fica dependente apenas do primeiro termo da equação 6.2. Já sobre Fortaleza, com $I \approx -11.5^\circ$, o V_{zp} fica dependente dos dois termos desta expressão, ou seja, do ângulo de inclinação e também do vento termosférico.

Os efeitos observados no V_{zp} devido ao vento termosférico dependerão da direção em que mesmo estiver soprando (Figura 6.14). Para um vento transequatorial, tipo mais comum de vento, nota-se que ocorrerá uma deriva para cima no hemisfério em que o vento sopra em direção ao equador, e uma deriva para baixo no outro hemisfério.

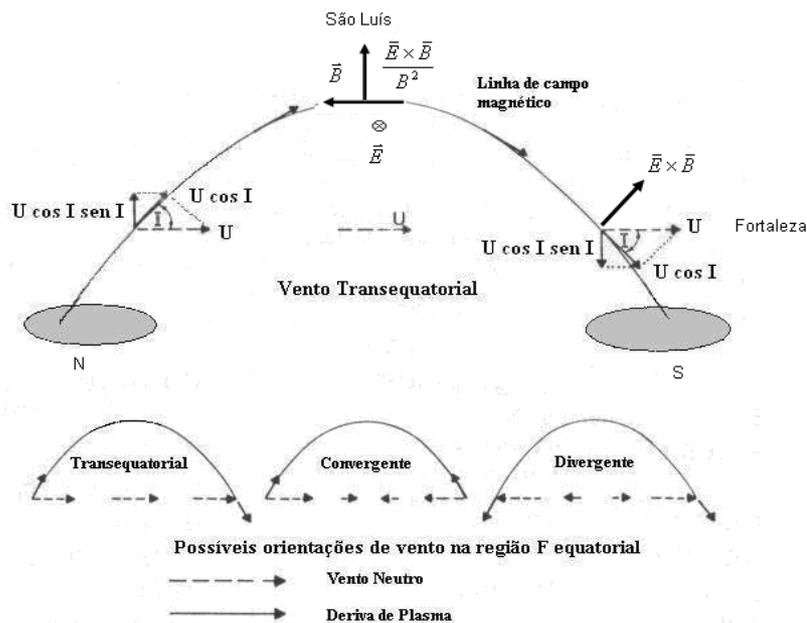


Figura 6.14 - Diagrama esquemático ilustrando a deriva causada somente pelos campos elétricos em São Luís e Fortaleza e também os efeitos devido ao vento meridional termosférico em Fortaleza. São mostradas também as possíveis orientações do vento meridional em baixas latitudes.

FONTE: Modificada de Rishbeth (1977).

6.7.2 Efeitos da declinação magnética no V_{zp}

Outro aspecto importante é a declinação magnética. Nos resultados obtidos, nota-se que a taxa de crescimento do V_{zp} com o fluxo solar é maior para novembro e isto ocorre porque neste mês há um maior alinhamento entre a linha do terminador solar e as

linhas do campo magnético terrestre. Nesta ocasião, tem-se que o pôr-do-sol ocorre simultaneamente entre as duas regiões E conjugadas e assim os circuitos dessas duas regiões conjugadas são interrompidos simultaneamente. Quando ocorre um desalinhamento, isso faz com que seja dia em uma região e noite na outra região E conjugada. Isto implica que enquanto no lado diurno existe condutividade, no lado noturno não há. Sendo assim os circuitos não são interrompidos simultaneamente. Enquanto um é interrompido (no lado noturno), ocorrerão descargas no lado iluminado pelo sol (Abdu et al, 1981, Batista et al., 1986a). Tudo isto pode ser entendido com o auxílio da Figura 6.15.

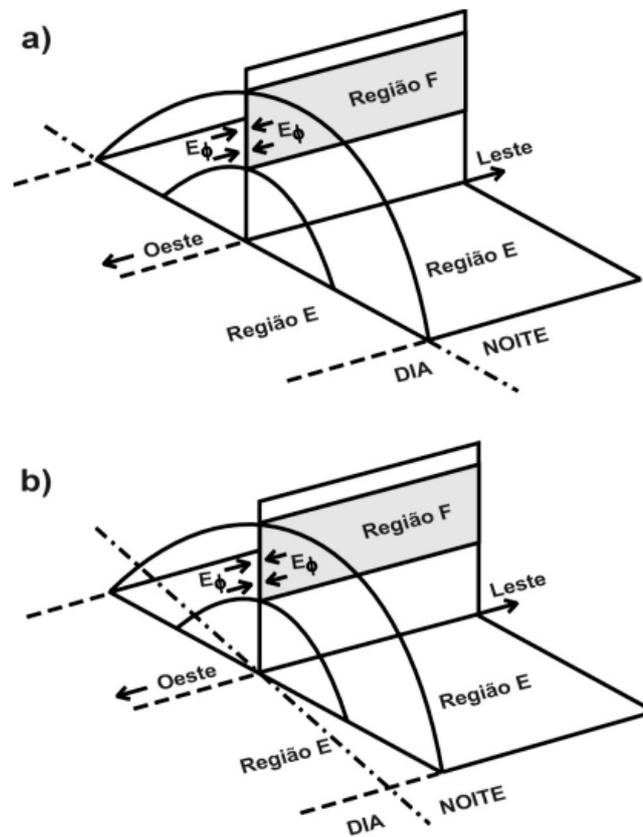


Figura 6.15 - Relação geométrica que representa a) perfeito alinhamento entre a linha do terminadouro solar e as linhas do campo magnético terrestre e b) desalinhamento.

FONTE: Carrasco (2005).

O alinhamento entre o terminadouro solar e as linhas do campo magnético, representado pela Figura 6.15 (a), faz com que a taxa de crescimento do Vz_p seja maior e isto ocorre em nossos dados no mês de novembro. Para o caso da Figura 6.15 (b), situação que representa o mês de dezembro em nossas análises, o Vz_p cresce a uma taxa menor em relação a novembro e a outubro. O fato de o pôr-do-sol ocorrer simultaneamente entre as duas regiões E conjugadas faz com que a variação longitudinal e com a hora local na

condutividade seja mais rápida. Para o caso contrário, ou seja, uma variação mais lenta na condutividade, tem-se uma taxa de crescimento menor do V_{zp} .

CAPÍTULO 7

RESULTADOS II: EFEITO DA TEMPESTADE MAGNÉTICA EM Vzp

A interação física do meio interplanetário com a magnetosfera terrestre gera uma variedade de processos globais no sistema magnetosfera-termosfera-ionosfera. De acordo com a literatura referentes a esse assunto, por exemplo, Abdu et al., (2009a), durante a ocorrência de uma tempestade/subtempestade magnética o Vzp poderá sofrer grandes modificações que podem ser atribuídas ao dínamo perturbado e/ou a penetração de campos elétricos de origem magnetosférica. Esse estudo visa analisar as diferentes consequências observadas no Vzp dependendo da hora de ocorrência de uma tempestade magnética.

Ao todo foram estudadas 10 tempestades, mas neste capítulo serão apresentados apenas alguns casos e uma Tabela resumindo os efeitos observados no Vzp durante essas tempestades. Será apresentada também uma análise feita em relação à duração total do *spread-F*, seja ele em frequência ou em altura, observado logo após a ocorrência do Vzp. As tempestades não apresentadas neste capítulo poderão ser vistas no apêndice A desta dissertação.

Em cada tempestade magnética apresentada nesse capítulo, foram analisados um conjunto de dados com 7 dias. Para os casos em que foram observadas algumas mudanças no Vzp ou na velocidade em outros horários que não seja próximo ao pôr-do-sol em virtude de uma tempestade magnética, fez-se uma análise separada para esses dias levando em consideração se a altura da camada esteve acima dos 300 km, pois nesse caso os efeitos devido à recombinação podem ser desconsiderados (Bittencourt e Abdu,1981).

7.1 Tempestade Magnética de 21 a 24 outubro de 2001

Na Figura 7.1 são apresentados o comportamento do campo magnético interplanetário Bz (com resolução temporal de 5 minutos), o índice AE (resolução temporal de 1 minuto), o índice Dst (resolução temporal de 1 hora), a média da velocidade para os dias calmos tanto para São Luís e Fortaleza, a velocidade de deriva referente ao dia em questão para São Luís (resolução temporal de 15 minutos) e Fortaleza (resolução temporal de 10 minutos) e por fim a duração do *spread-F*.

O período analisado na Figura 7.1, corresponde aos dias 18-24 de outubro de 2001. Esta mesma Figura encontra-se ampliada no apêndice desta dissertação. Dentre os dias analisados, serão dados enfoques aos efeitos sofridos por Vzp durante os dias 19, 20 e 21 de outubro de 2001. Para esses dias, verificou-se que nos horários em que a velocidade é discutida, a camada F esteve acima dos 300 km de altura.

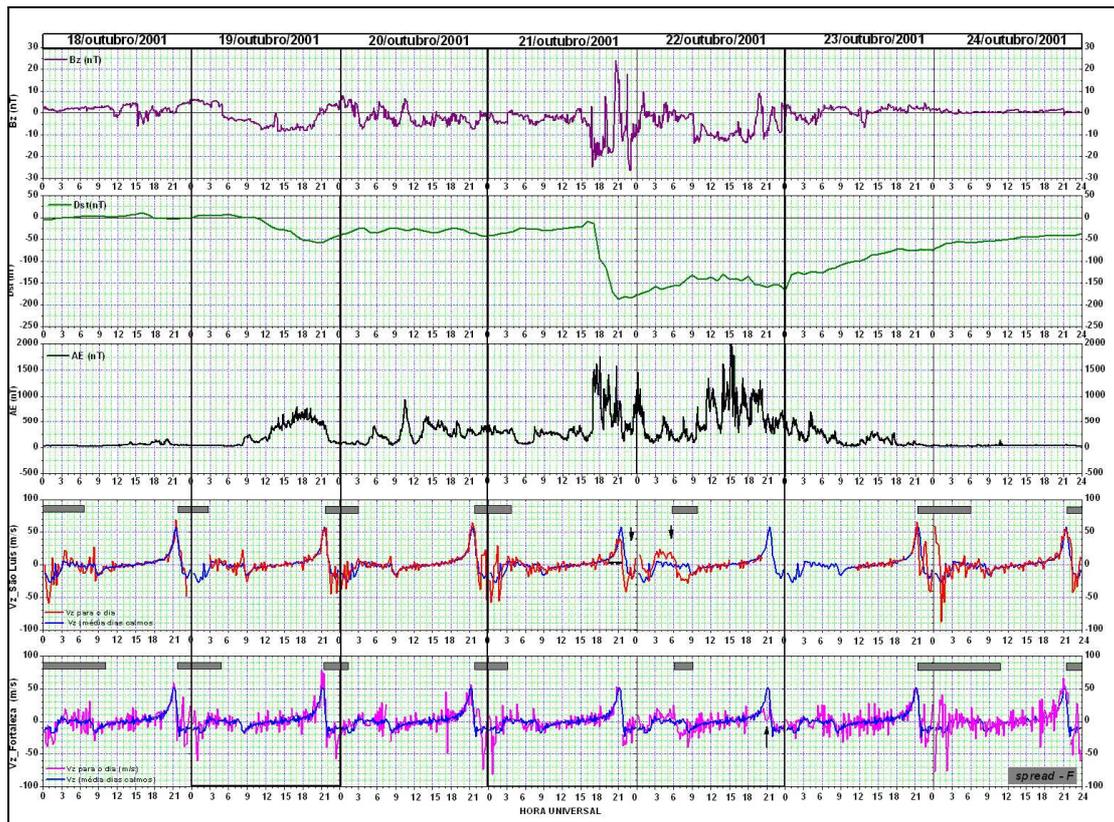


Figura 7.1 - Comportamento do campo magnético interplanetário (curva roxa), índice Dst (curva verde), índice auroral (curva preta), média da velocidade para dias calmos (curva azul), velocidade sobre São Luís (curva vermelha), velocidade sobre Fortaleza (curva magenta) e duração do *spread-F* (barra horizontal cinza) para o período de 18 a 24 de outubro de 2001.

Nota-se na Figura 7.2 que no dia 19/10/2001 uma tempestade teve início ~ às 11UT com o Dst atingindo um valor mínimo de ~-60nT às 21 UT. Nesse dia, observa-se que o Vzp foi intensificado em relação aos dias calmos para Fortaleza, no entanto não se observa o mesmo em São Luís. Como nesta ocasião Bz está para norte neste horário e não apresenta nenhuma variação brusca, essa intensificação não deve ser, por exemplo, devido a um campo elétrico do tipo *undershielding*. Sendo assim, acredita-se que esse

efeito observado no Vz sobre Fortaleza tenha sido possivelmente causado pela ação dos ventos meridionais termosféricos.

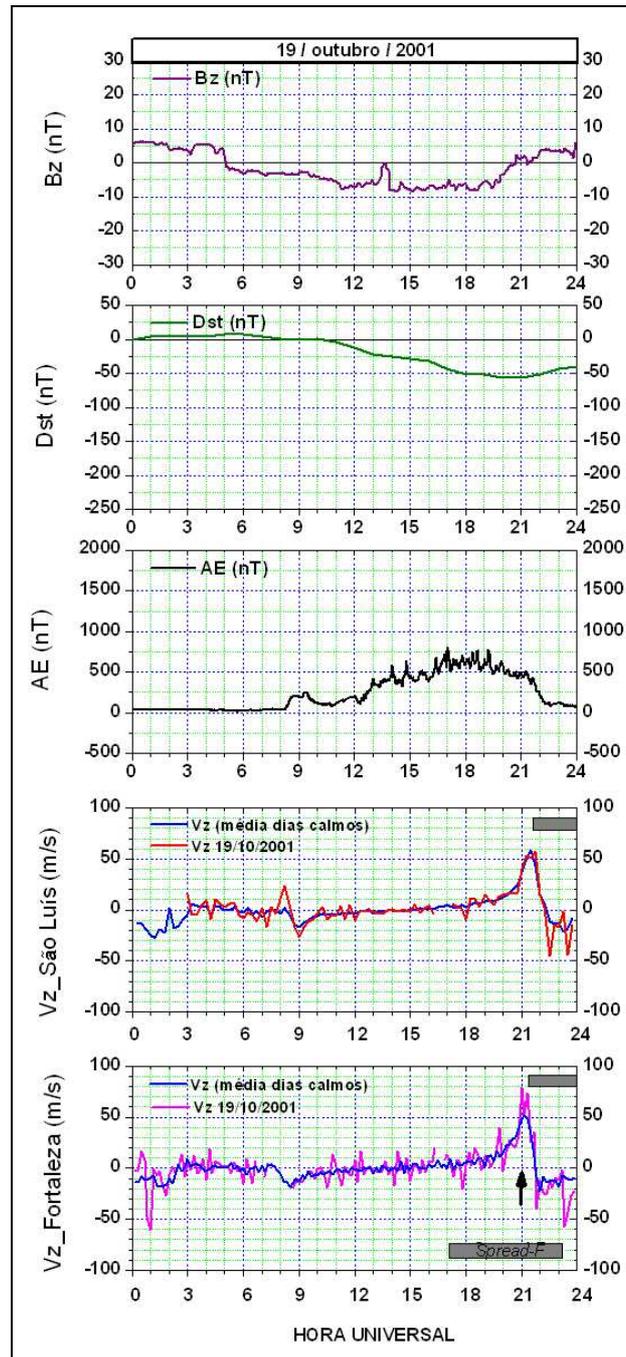


Figura 7.2 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para o dia 19 de outubro 2001.

Na Figura 7.3, nota-se que no dia 21/10/2001 uma nova tempestade tem início às 1648 UT com Dst mínimo (Dst_m) igual a -187 nT às 21UT. Na fase principal da tempestade, com Bz apresentando fortes oscilações, nota-se que o Vz sobre São Luís apresenta-se menos intenso e adiantado quando comparado com a média dos dias calmos, fato que

não se observa sobre Fortaleza. Isto pode ter sido gerado devido à penetração de um campo elétrico *overshielding* que apresenta polaridade oposta ao campo elétrico zonal devido ao dínamo da camada F. A ação deste campo elétrico no Vzp durante a tempestade magnética, fez com que o *spread-F* não se desenvolvesse logo após a ocorrência do Vzp tanto em São Luís como em Fortaleza. Entre ~ 2230 UT do dia 21/10/2001 e 06 UT do dia 22/10/2001 a velocidade sobre São Luís mostra-se intensificada em relação aos dias calmos e isto pode ter ocorrido devido à ação do campo elétrico do dínamo perturbado. Em Fortaleza esse efeito não é tão evidente. Foi após esse aumento na subida da camada que o *spread-F* teve início nas duas regiões.

Ainda na Figura 7.3, nota-se que no dia 22/10/2001 em Fortaleza, o Vzp apresenta-se inibido no mesmo momento em que a velocidade de deriva média para os dias calmos atinge ~ 50m/s. Isso pode ter acontecido devido ao campo elétrico do dínamo perturbado juntamente com a penetração de um campo elétrico para oeste. Com essa inibição do Vzp, o *spread-F* também foi totalmente inibido durante essa noite e toda a madrugada do dia seguinte, voltando a se estabelecer somente após o pico pré-reversão do próximo dia (23/10/2001). A tempestade do dia 21/10/2001 teve início ~ 4 horas antes da ocorrência do Vzp, no entanto notam-se efeitos no Vzp até 26 horas depois.

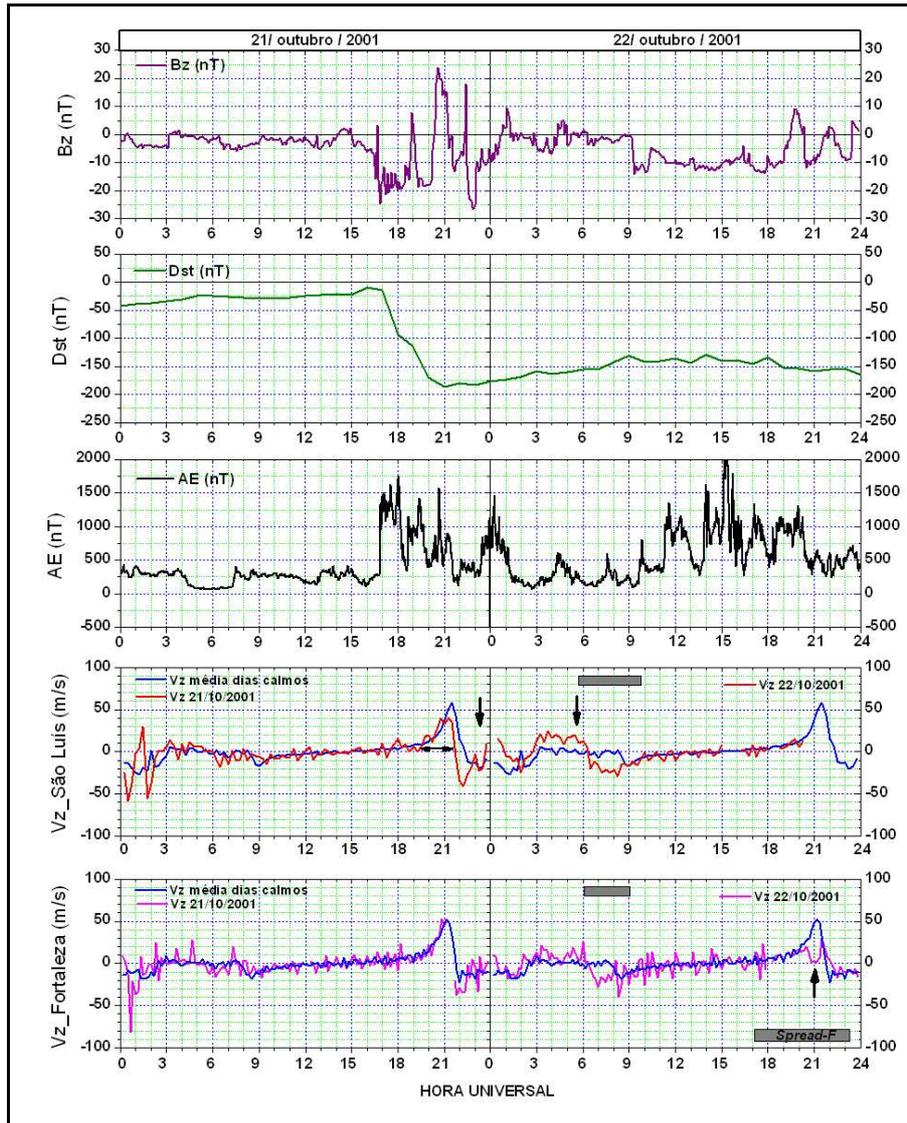


Figura 7.3 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para os dias 21 e 22 de outubro 2001.

Resumindo, as principais características observadas na velocidade foram:

- período analisado: 18/10/2001 a 24/10/2001;
- início da tempestade: 19/10/2001 às 11 UT e 21/10/2001 às 1648 UT;
- $dst_m = -52$ nT às 21 UT e -187 nT às 21 UT;
- 19/10/2001: Intensificação do Vz_p em Fortaleza possivelmente devido à ação dos ventos termosféricos;
- 21/10/2001: Vz_p inibido e adiantado em São Luís possivelmente devido ao campo elétrico *overshielding*;
- 21-22/10/2001: Intensificação da velocidade entre 2230 UT até às 06 UT em São Luís devido ao campo elétrico do dínamo perturbado;

- 22/10/2001: Inibição do Vzp sobre Fortaleza possivelmente devido ao campo elétrico do dínamo perturbado + penetração de campo elétrico.

7.1.1 Duração do *spread-F* durante o período de 18 a 24 de outubro de 2001

Uma das condições necessárias para levar ao desenvolvimento de irregularidades do tipo *spread-F* equatorial é a subida rápida da camada F que ocorre nas horas do pôr-do-sol. O desenvolvimento ou não desta instabilidade dependerá de alguns fatores, tais como:

- intensidade do campo elétrico zonal/deriva vertical do plasma;
- campo elétrico de polarização possivelmente induzido pela propagação de ondas planetárias;
- a amplitude da densidade inicial perturbada;
- condutividade integrada a linha de campo.

A duração de *spread-F* para o período de 18-24 de outubro de 2001 será analisada levando em conta a intensidade do Vzp. Na Figura 7.4, nota-se que a duração do *spread-F* foi diminuindo à medida que a tempestade magnética se aproximava. No dia 22/10/2001, o *spread-F* durou ~ 4 horas sobre São Luís e um pouco menos em Fortaleza e ao contrário do que geralmente ocorre, não teve início logo após o Vzp e só foi ocorrer após a subida da camada devido ao dínamo perturbado (~ 06 UT). Nesse mesmo dia em Fortaleza, observa-se a inibição total do *spread-F* nas horas após o pôr-do-sol, uma vez que o pico pré-reversão da velocidade foi totalmente inibido (observado somente em Fortaleza devido à falta de dados para São Luís). Nos dias seguintes, 23 e 24/10/2001, o Vzp praticamente não foi influenciado pela tempestade magnética e o *spread-F* apresentou maior duração em relação aos outros dias ocorrendo logo após a ocorrência do Vzp. O símbolo *** indicado nas figuras referente à análise da duração do *spread-F* indica falha de dados, seja por problemas com a digissonda ou porque a camada subiu demais e a digissonda não conseguiu captar os dados. As horas indicadas nas barras representam o atraso entre a ocorrência do Vzp e o início do *spread-F*. Quando não aparecer esta notação, isso indica que o *spread-F* teve início logo após o Vzp.

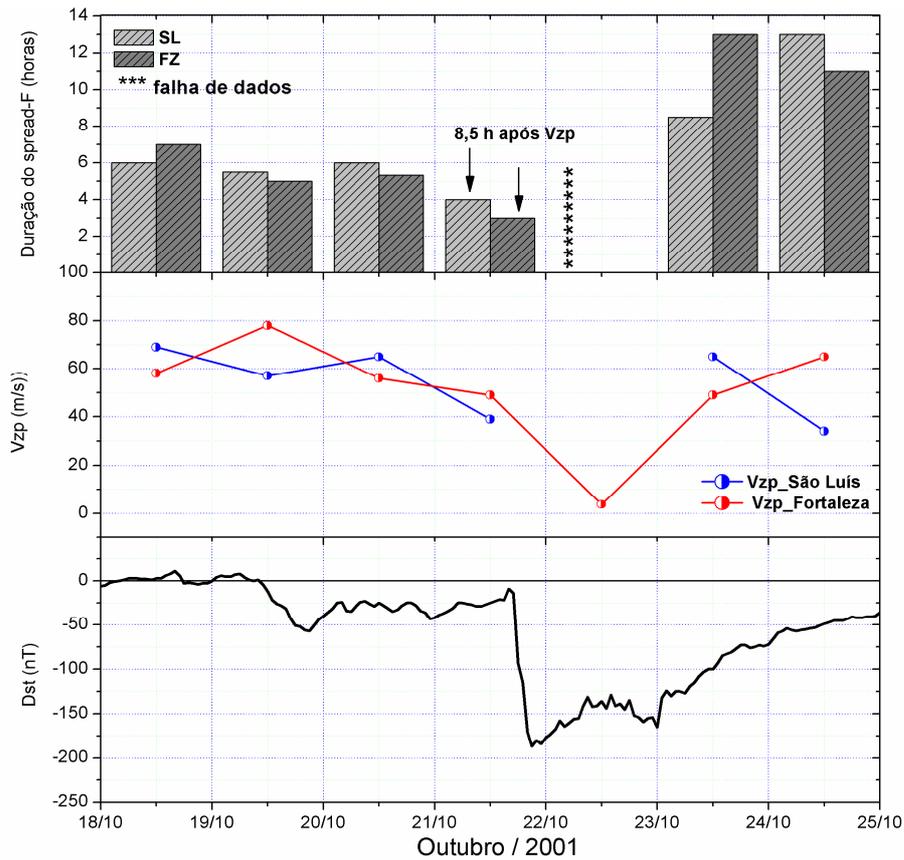


Figura 7.4 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 18 a 24 de outubro de 2001.

7.2 Tempestade Magnética de 01 a 07 outubro de 2002

O período estudado na Figura 7.5 corresponde aos dias de 01 a 07 de outubro de 2002 somente para São Luís devido à falta de dados para Fortaleza. Dos dias apresentados nesta Figura, será dado destaque aos efeitos observados na velocidade durante os dias 1, 4, 5 e 7 de outubro de 2002.

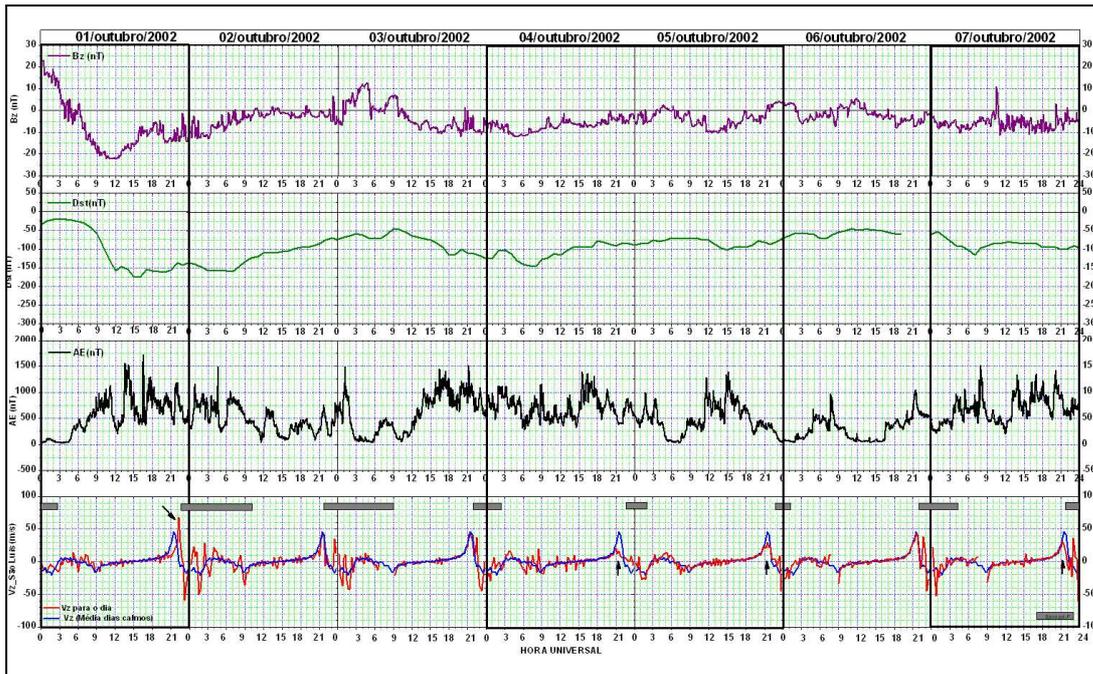


Figura 7.5 - Similar a Figura 7.1, mas somente para São Luís durante o período de 01 a 07 de outubro de 2002.

Essa tempestade teve início no dia 01/10/2002 às 07 UT com Dst_m igual a $-176nT$ às 16 UT. Neste mesmo dia (Figura 7.6), nota-se que o V_{zp} mostra-se intensificado e atrasado por ~ 40 minutos em relação aos dias calmos. Essa intensificação pode ter ocorrido devido à possível penetração de campos elétricos e atrasado devido a um campo elétrico *overshielding*. Esse campo elétrico de penetração, que tem polaridade para leste, geralmente é observado no setor noturno quando B_z apresenta variações negativas e um aumento simultâneo na convecção das altas latitudes representado pelo índice AE (Fejer et al., 1991a e Sobral et al., 1997). Como consequência desse aumento, o *spread-F* teve início logo após o pico de velocidade e apresentou durabilidade de ~ 11 horas.

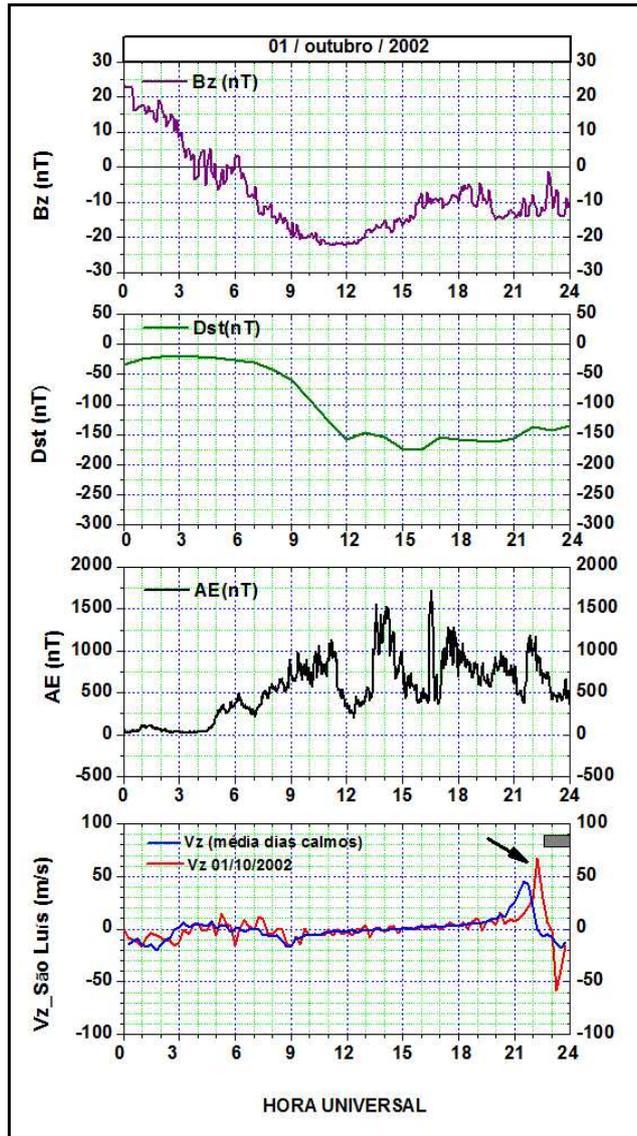


Figura 7.6 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para o dia 01 de outubro 2002.

Alguns efeitos observados na velocidade devido a essa tempestade magnética também podem ser vistos nos dias 04 e 05 de outubro de 2002, como mostra a Figura 7.7. No dia 04/10/2002, o pico pré-reversão da velocidade foi inibido e o desenvolvimento do *spread-F* apresentou curta duração (~5 horas), não ocorrendo imediatamente após o pico de velocidade como observado em outros dias. Como neste caso Bz se encontrava para sul e não apresentou nenhuma variação brusca, esse efeito de inibição no pico da velocidade não poderia ter sido causado por um campo elétrico de penetração para oeste (*overshielding*) como mostrado por Abdu et al., (2009a). A causa dessa inibição parece ser devido ao dínamo perturbado considerando um longo histórico de tempestade que

antecedeu esse evento. Situação similar ao do dia 04/10/2002 ocorreu também no dia 05/10/2002, na qual o V_{zp} apresenta-se inibido em relação aos dias calmos e o *spread-F* apresenta pouca duração. O índice AE apresentou uma recuperação às ~18 UT e às 21 UT B_z se inverteu para norte. Sendo assim, a inibição do V_{zp} pode ter ocorrido em virtude de um campo elétrico *overshielding* e também devido ao campo elétrico do dínamo perturbado.

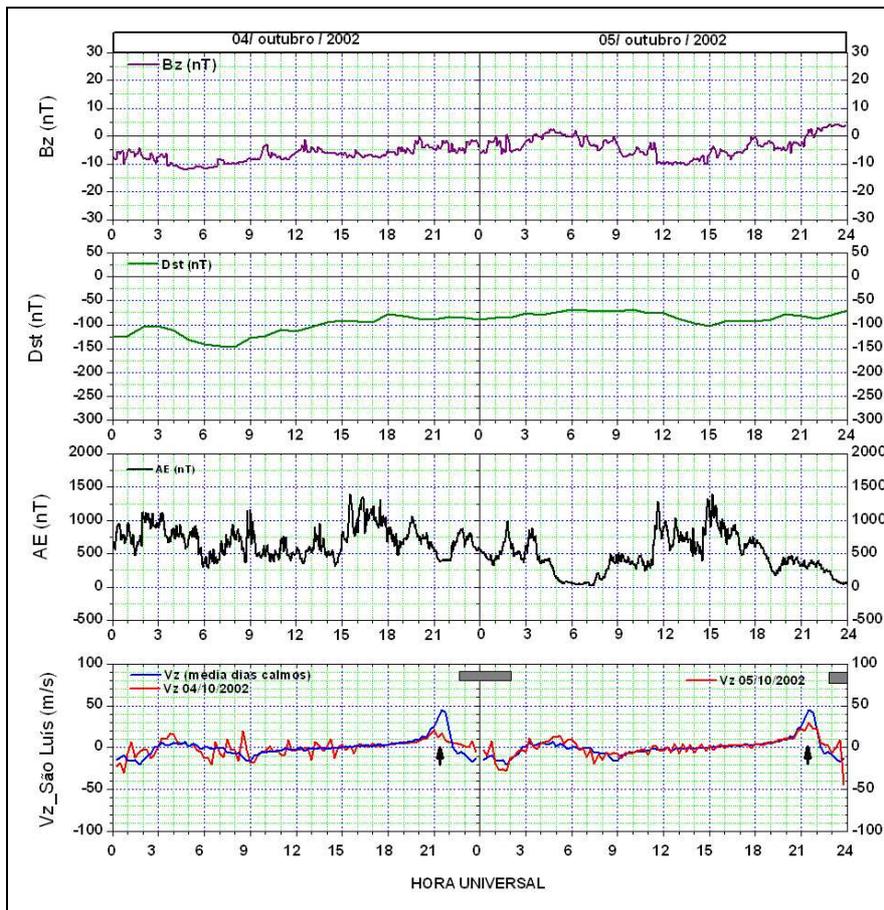


Figura 7.7 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para os dias 04 e 05 de outubro 2002.

No dia 07/10/2002 (Figura 7.8), nota-se que o V_{zp} foi inibido novamente e também adiantado em relação aos dias calmos. Às 21 UT desse dia, observou-se que o índice AE variou de -1000 nT para -500 nT permanecendo nesse valor por ~2 horas. Com B_z para sul, atribui-se a inibição observada a um campo elétrico com direção para oeste devido ao dínamo perturbado.

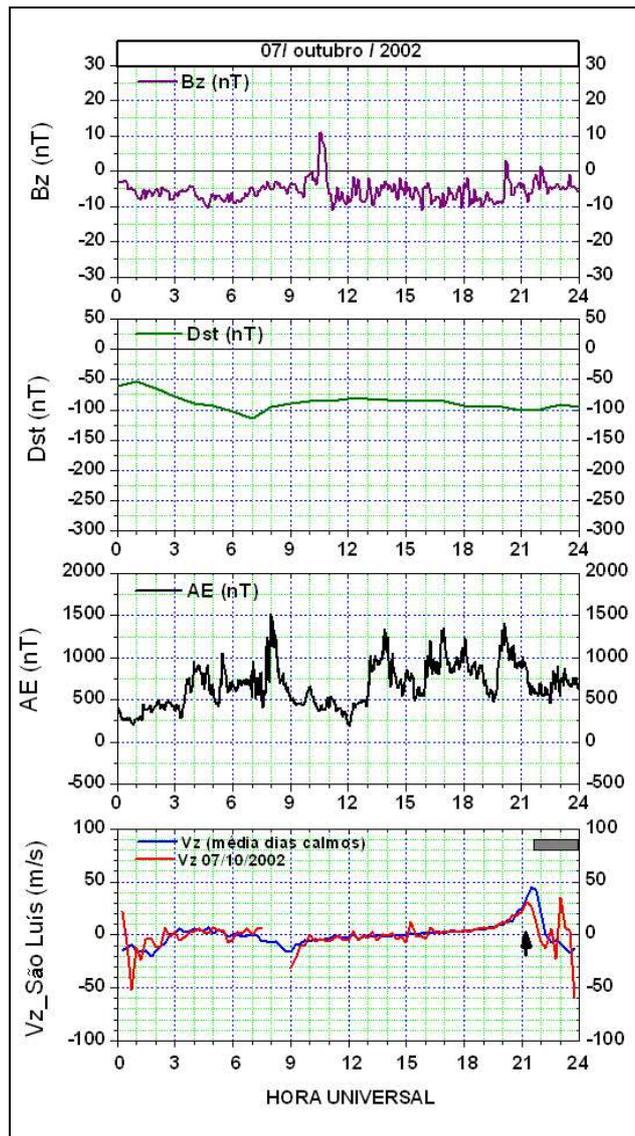


Figura 7.8 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís para o dia 07 de outubro 2002.

Esta tempestade magnética apresentou uma longa fase de recuperação (~288 horas). Apenas uma parte dela foi apresentada aqui (01 a 07 de outubro de 2002) e nesses 7 dias apresentados, 4 mostraram-se influenciados pela tempestade, tanto com inibição do V_{zp} como também com sua intensificação. A velocidade para os outros 7 dias estudados (08 a 14 de outubro de 2002) também apresentou mudança em relação aos dias calmos. Os resultados desta análise podem ser conferidos no apêndice A desta dissertação.

Resumindo, as principais características observadas na velocidade foram:

- período estudado: 01/10/2002 à 07/10/2002;
- início da tempestade: 01/10/2002 às 07 UT ;

- $dst_m = -176$ nT às 16 UT;
- 01/10/2002: Vz_p intensificado em São Luís devido à penetração de campos elétricos para leste e atrasado devido à ação de um campo elétrico do tipo *overshielding*;
- 04/10/2001: Vz_p inibido devido ao dínamo perturbado, breve duração do *spread-F* (~5 horas) com 1,5 horas de atraso em seu início em relação aos outros dias;
- 05/10/2001: Vz_p inibido devido ao dínamo perturbado + campo elétrico *overshielding* e pouca duração de *spread-F* (~2 horas). Também nesse dia, o início do *spread-F* teve um atraso de 1,5 horas em relação aos outros dias;
- 07/10/2001: Vz_p possivelmente inibido e adiantado devido ao dínamo perturbado.

7.2.1 Duração do *spread-F* durante a tempestade magnética de 01 a 07 de outubro de 2002

A Figura 7.9 apresenta a duração do *spread-F* para a tempestade magnética observada de 01-07 de outubro de 2002. Nos dias em que o Vz_p mostrou-se inferior aos dias calmos (4 e 5 de outubro 2002), devido ao campo elétrico do dínamo perturbado, o *spread-F* teve um atraso de ~ 1,5 horas em relação, por exemplo, aos dias 01 e 02 de outubro. À medida que a tempestade foi encaminhando para uma recuperação, o *spread-F* também foi apresentando uma maior duração.

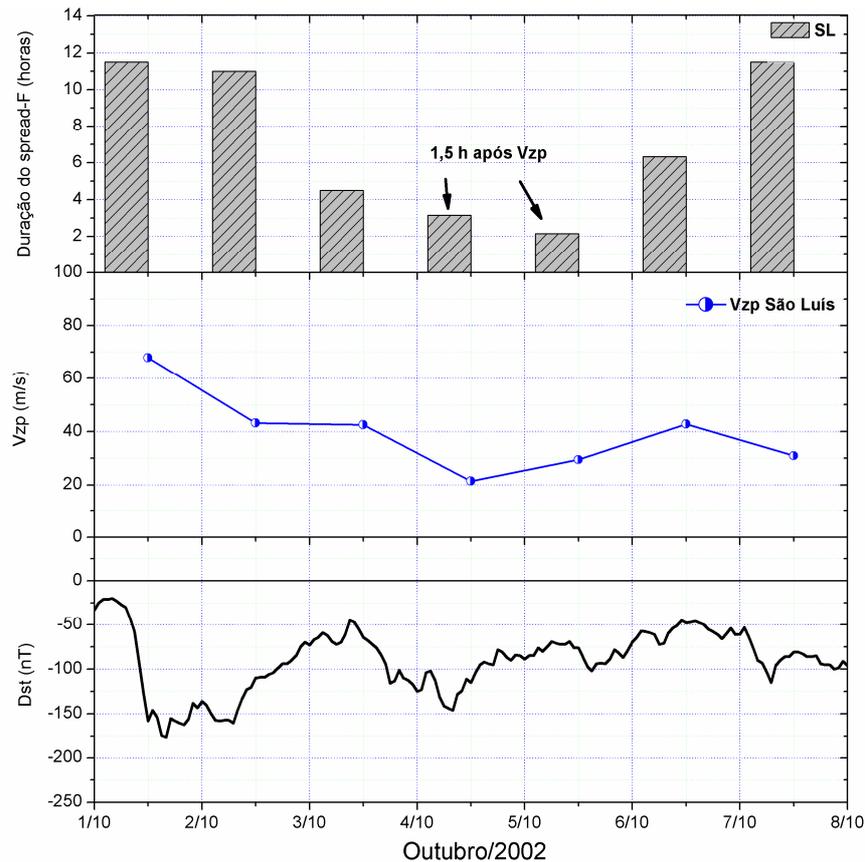


Figura 7.9 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para a tempestade de 01 a 07 de outubro de 2002.

7.3 Tempestade Magnética de 29 de maio a 01 de junho de 2003

Na Figura 7.10, nota-se que uma tempestade magnética teve início no dia 29/05/2003 às 1224 UT, e sua fase principal ocorre bem próximo ao horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal (~ 21 UT). O índice Dst apresenta um valor mínimo de -144nT às 24 UT do mesmo dia. Esse pico de -144 nT classifica este evento como sendo uma tempestade magnética intensa. A duração da fase principal e de recuperação desta tempestade soma 70 horas.

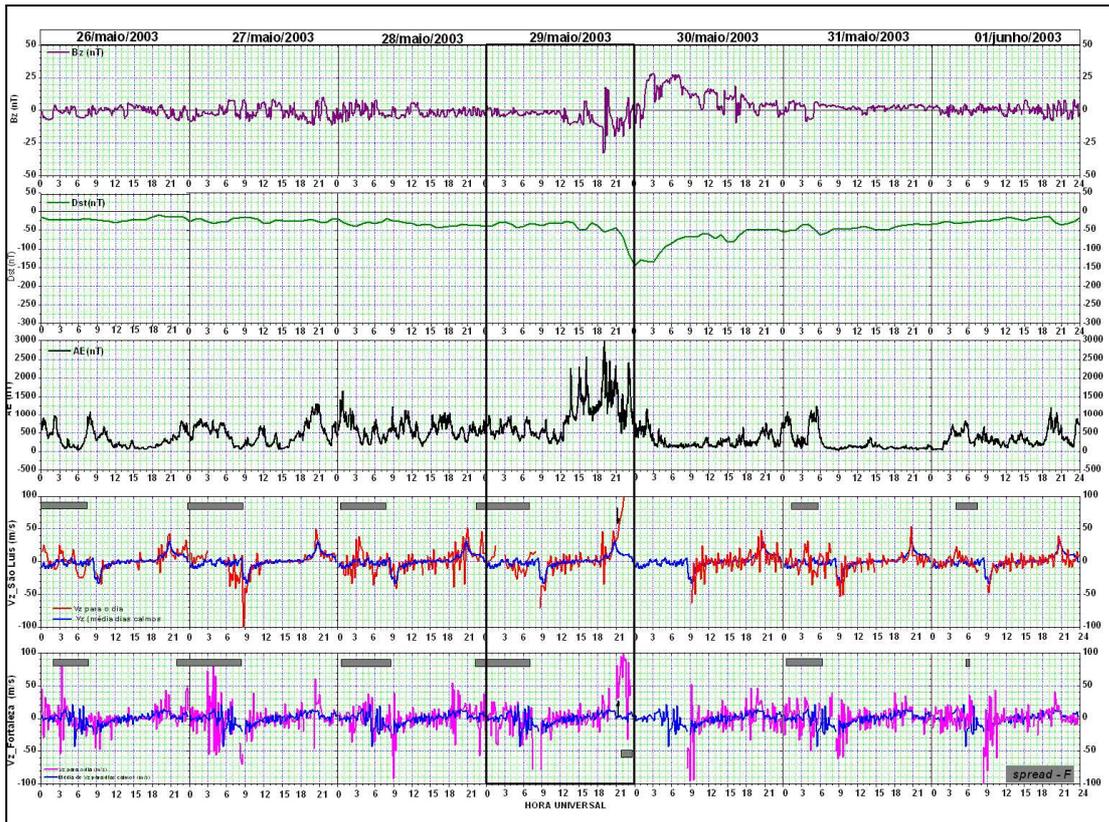


Figura 7.10 – Similar a Figura 7.1, mas para o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003.

A maior resposta da ionosfera pode ser vista no dia 29/05/2003 durante a fase principal da tempestade. Na Figura 7.11, nota-se que às 20 UT Bz se inverte para sul e que aproximadamente meia hora depois em São Luís a velocidade atinge um pico de ~ 40 m/s, o que corresponde um campo elétrico de ~ 1 mV/m. Logo após esse pico de velocidade, a mesma tende a diminuir e em seguida apresenta uma forte subida atingindo ~ 100 m/s (campo elétrico perturbado de $\sim 2,5$ mV/m). Em Fortaleza, também no dia 29/05/2003, nota-se o mesmo comportamento.

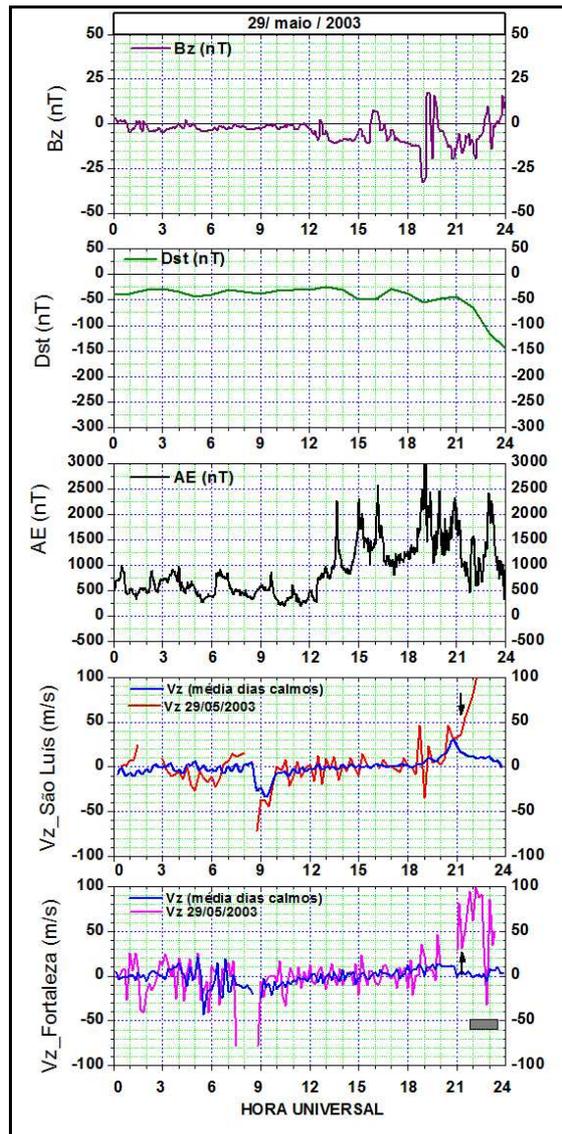


Figura 7.11 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre São Luís e Fortaleza para o dia 29 de maio de 2003.

Acredita-se que esta subida tenha ocorrido inicialmente devido à penetração de campos elétricos, no entanto, nota-se nos dados de altura real (Figura 7.12) que a camada se mantém alta por mais algumas horas. Como o índice AE já apresentava certa atividade por ~ 7 horas, acredita-se que devido ao tempo de permanência em que a camada ficou elevada (~ 9 horas), a mesma também sentiu os efeitos devido ao dínamo perturbado. Logo após essa subida da camada, o sinal da digissonda é perdido e então não se sabe qual foi à durabilidade do *spread-F*.

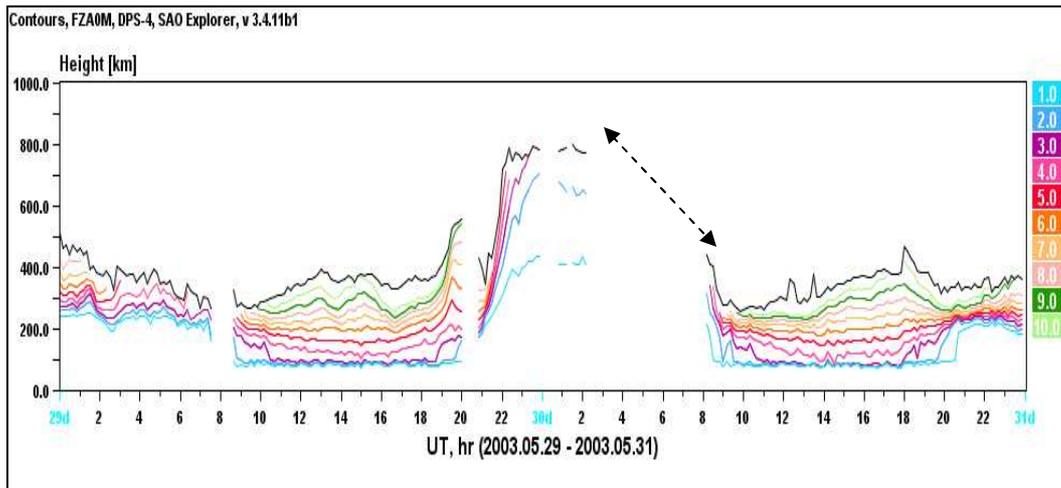


Figura 7.12 - Isolinhas da altura real da camada para diferentes frequências para os dias 29 e 30 de 2003 sobre Fortaleza.

Resumindo, as principais características observadas na velocidade foram:

- período estudado: 26/05/2003 a 01/06/2003;
- início da tempestade: 29/05/2003 às 1224 UT ;
- $dst_m = -144$ nT às 24 UT do dia 29/05/2003;
- 29/05/2003: Forte intensificação do Vzp em São Luís e Fortaleza devido penetração de um campo elétrico e permanência devido ao campo elétrico do dínamo perturbado.

É importante notar que esta tempestade magnética que teve início às 1224 UT apresentou sua fase de principal bem definida à partir das 21 UT, praticamente na hora em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal. Neste caso, a camada F sentiu drasticamente os efeitos causados por essa tempestade. Em Fortaleza, por exemplo, a camada F atingiu ~ 700 km de altura.

7.3.1 Duração do *spread-F* durante o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003

Ao contrário das outras tempestades estudadas até o momento, nota-se que todos os dias analisados desta tempestade (Figura 7.10), inclusive antes mesmo da tempestade acontecer (26-28 de maio /2003), o *spread-F* apresentou um certo atraso em relação à ocorrência do Vzp.

Na figura 7.13, nota-se que no dia 26/05/2003, o *spread-F* começou ~3 horas após a ocorrência do Vzp em São Luís e em Fortaleza o atraso foi de 1 hora. Comportamento

similar pode ser visto para os dias 27 e 28 /05/2003. No dia em que a tempestade teve início (29/05/2003), o Vzp apresentou um valor de ~ 100 m/s em São Luís e ~80 m/s em Fortaleza. Por falta de dados, não foi possível avaliar a duração do *spread-F* para esse dia, no entanto o mesmo ocorreu imediatamente após o Vzp.

Para os dias 30 e 31/05/2003, ao contrário do que ocorreu na tempestade analisada anteriormente, a duração do *spread-F* apresentou-se breve e com várias horas de atraso tanto para São Luís quanto em Fortaleza. Foi observado que nos dias em que ocorreu esse atraso, a camada não apresentou uma subida rápida e isso pode ter sido o responsável pelo retardo do *spread-F*. É provável que devido à ação do campo elétrico do dínamo perturbado tenha enfraquecido o campo elétrico zonal e em consequência disso a camada subiu lentamente no horário em que ocorre o Vzp.

No dia 01/06/2003, o *spread-F* foi totalmente inibido e só ocorreu no dia seguinte (02/06/2003) 8,5 horas após o Vzp do dia 01/06/2003. Isto pode ter ocorrido pelo mesmo motivo descrito para os dias 30 e 31/05/2003.

Na figura 7.13, deve-se levar em consideração somente o valor do Vzp para o dia 29/05/2003, pois somente nesse caso, tanto em São Luís como em Fortaleza, a altura da camada esteve acima de 300 km. Para os outros dias, devido aos efeitos da recombinação, os valores do Vzp devem ser menores do que os apresentados nessa figura.

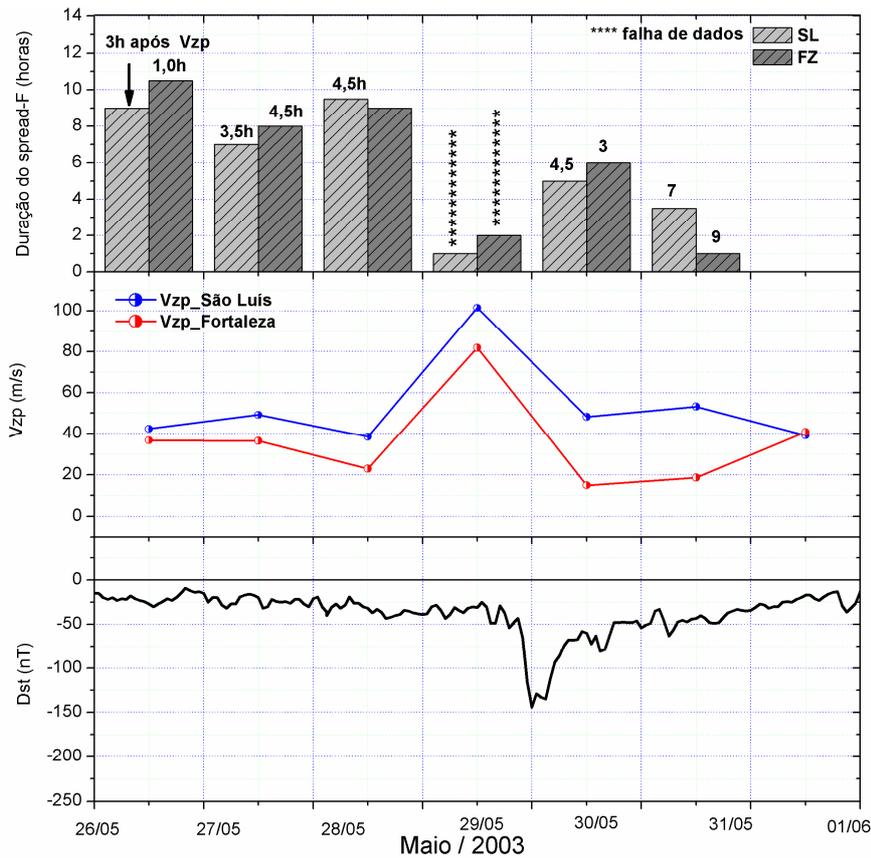


Figura 7.13 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 26 de maio a 01 de junho de 2003.

7.4 Tempestade Magnética de 18 a 24 de janeiro de 2005

Na Figura 7.14, nota-se que no dia 18/01/2005 o índice Dst atinge um valor mínimo de ~ -125 nT às 09 UT e depois tende a uma recuperação. No dia 21/01/2005, uma nova tempestade se inicia às 1711 UT com Dst_{mim} atingindo um valor de -105 nT às 07 UT do dia 22/01/2005.

Similar ao que aconteceu na tempestade apresentada anteriormente, essa foi uma tempestade que também ocorreu próxima ao horário em que se observa a intensificação do campo elétrico zonal e isso influenciou fortemente a velocidade de subida da camada F.

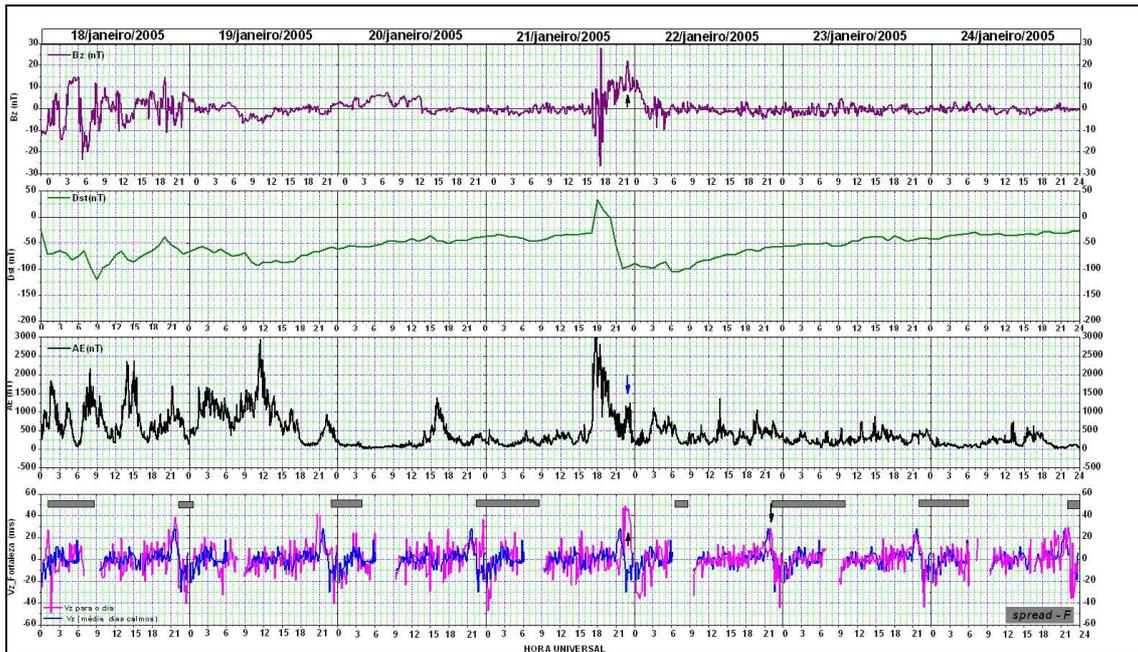


Figura 7.14 - Similar a Figura 7.1, mas somente para Fortaleza durante o período de 18 a 24 de janeiro de 2005.

No dia 21/01/2005 (Figura 7.15), com o índice AE apresentando uma tendência de recuperação à partir das 19 UT e atingindo um valor de 500nT às 21UT, nota-se que ~2130 UT a velocidade apresenta um valor negativo (~-12m/s) no mesmo instante que a média dos dias calmos é de ~30m/s. Logo em seguida, o índice AE se intensifica novamente (entre 22 e 24UT), Bz se encontra para norte e a velocidade atinge um pico de ~50m/s.

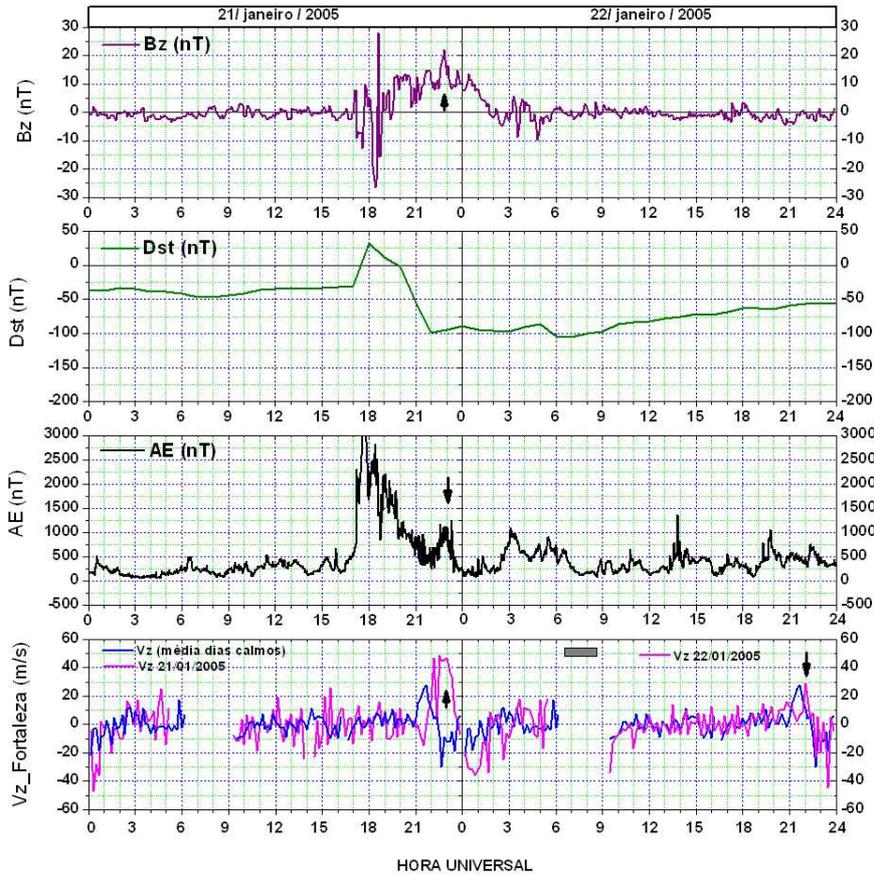


Figura 7.15 - Efeitos da tempestade magnética na velocidade de deriva vertical do plasma sobre Fortaleza para os dias 21 e 22 de janeiro de 2005.

Analisando a velocidade do vento solar através da figura 7.16 para o dia em que a tempestade se iniciou (21/01/2005), nota-se que a mesma sofreu um aumento súbito de ~ 600 km/s para ~ 1000 km/s em um curto intervalo de tempo. O vento solar é não uniforme e mudanças na sua pressão dinâmica ($P = \rho V_{sw}^2$, onde ρ é a densidade de massa e V_{sw} é a velocidade do vento solar) são acompanhadas por choques interplanetários e isso faz que a magnetosfera seja comprimida (Saunders, 1989).

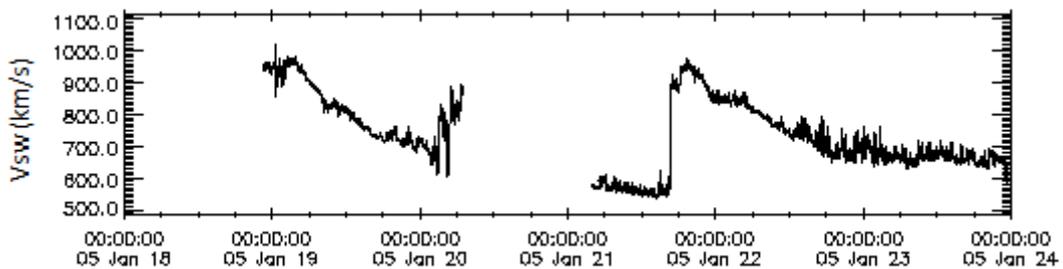


Figura 7.16 - Velocidade do vento solar para os dias 18 a 24 de janeiro de 2001.

FONTE: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>

Há duas perguntas importantes a serem feitas em relação ao que se observa no comportamento do índice AE e na velocidade de subida do plasma para o dia 21/01/2005. São elas:

- com Bz para norte, o que indica que não há reconexão na região equatorial da magnetopausa, como pode haver uma intensificação da atividade auroral?
- o que fez a camada F subir no mesmo momento em que o índice AE se intensifica e Bz esta para norte?

A resposta para a primeira pergunta é que embora Bz esteja para norte, pode sim existir reconexão magnética, só que esta acontece na região da cúspide polar. A cúspide polar é conhecida como sendo região na qual “separa” as linhas do campo magnético terrestre que ficam no lado diurno da magnetopausa, da região onde as linhas do campo magnético formam a cauda magnética no lado noturno (Saunders, 1989)

Na região da cúspide polar, o campo magnético terrestre apresenta sentido oposto a Bz e assim pode haver a reconexão. Ocorrendo a reconexão, haverá a entrada de partículas na região auroral e isso explicaria a intensificação do índice AE entre 22 e 24 UT.

Em relação à segunda pergunta sobre a subida da camada F após a intensificação do índice AE, é possível tenha ocorrido à transmissão de um campo elétrico polar para a região equatorial do tipo DP2, descrito por Kikuchi (1986). Esta hipótese é feita considerando que a subida da camada não poderia ser atribuída a um efeito devido ao dínamo perturbado, pois de acordo com o padrão estabelecido este deveria manter a subida da camada por mais tempo. Também não poderia ser devido a uma penetração de campo elétrico, uma vez que o campo magnético interplanetário está para norte há aproximadamente 2 horas. Sendo assim, acredita-se que um campo elétrico estabelecido na região polar, gerado através de processos dinâmicos em grande escala na magnetosfera, e a súbita compressão pela onda de choque interplanetária ou pela mudança na convecção magnetosférica tenha se transmitido para a região equatorial e causado uma intensificação na subida da camada. A direção desse campo elétrico seria aproximadamente de leste para oeste (dawn-dusk) (Kikuchi et al., 1978).

Quando a magnetosfera é comprimida por uma onda de choque do vento solar, um campo elétrico de polarização é produzido dentro do lado diurno da magnetopausa. Este campo elétrico é então transmitido pelo modo de onda Alfvén resultando num campo elétrico na ionosfera polar. Este campo elétrico pode então ser transmitido para as baixas latitudes ionosféricas com um guia de onda centrada no pico de ionização da camada F2 (Kikuchi et al 1986).

Os efeitos dessa onda de choque que atingiu a magnetosfera no dia 21/01/2005 próximo às 18 UT pode ser visto também nos dados de altura real da camada F. A Figura 7.17 mostra o comportamento da altura real para diferentes frequências para a região de Fortaleza e Jicamarca, respectivamente.

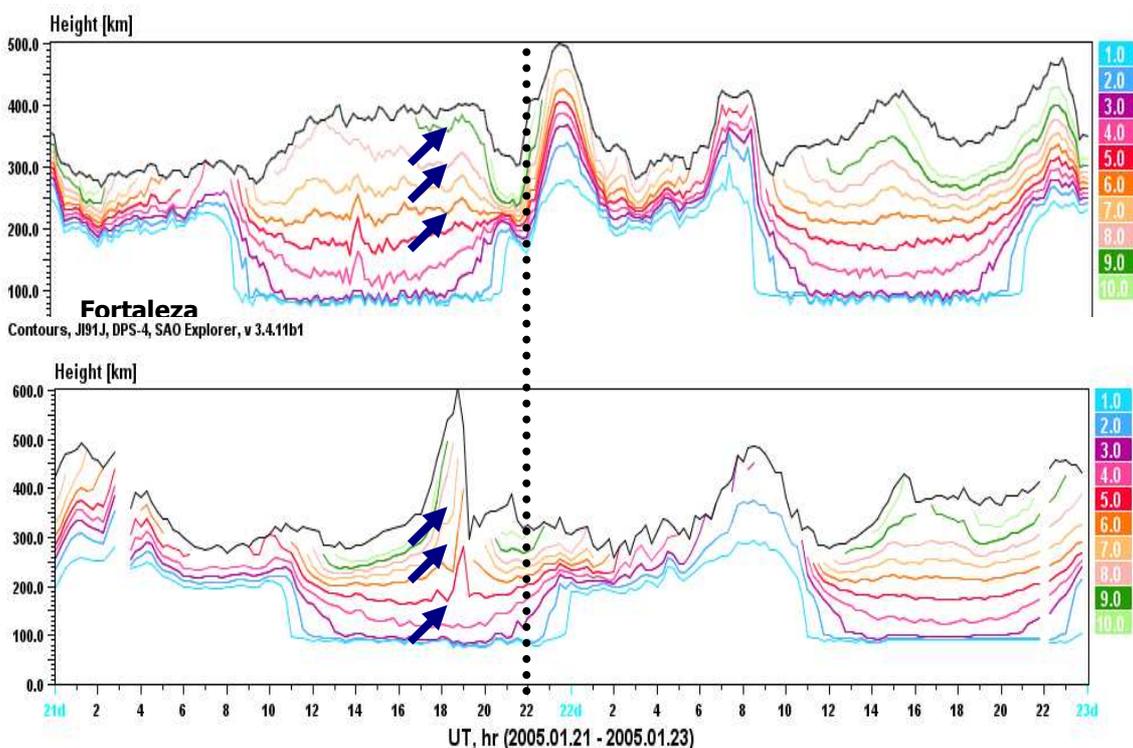


Figura 7.17 - Isolinhas da altura real da camada F para diferentes frequências para os dias 21 e 22 de janeiro de 2005 sobre Fortaleza e Jicamarca.

Na Figura 7.17, nota-se que em Jicamarca a altura da camada atingiu ~ 500 km bem próximo ao horário em que a onda de choque atingiu a magnetosfera (~18 UT). Já em Fortaleza, nesse mesmo horário, pouca mudança foi vista na altura da camada. Situação contrária ocorre a partir das 22 UT, quando a camada atinge ~ 450 km em Fortaleza e em Jicamarca ~ 300 km.

Resumindo, as principais características observadas na velocidade foram:

- período estudado: 18/01/2005 a 24/01/2005;
- $Dst_m = -125$ nT às 09 UT do dia 18/01/2005 e -105 nT no dia 22/01/2005 às 1711 UT;
- 21/05/2005: Intensificação do índice AE (entre ~22 e 24 UT) no momento em B_z esta para norte. Essa intensificação possivelmente aconteceu devido à reconexão magnética ocorrida na região da cúspide polar. Coincidente com a intensificação da atividade auroral, logo após a velocidade apresentar valores negativos em relação aos dias calmos (~2130 UT), a camada apresenta uma subida atingindo uma velocidade de ~100m/s. Isso pode ter ocorrido devido à transmissão de um campo elétrico que apresenta polaridade para leste vindo da região polar para a região equatorial;
- 22/05/2005: velocidade intensificada às 22 UT simultâneo com uma pequena intensificação de AE.

7.4.1 Duração do *spread-F* durante a tempestade magnética de 18 a 24 de janeiro de 2005

Durante essa tempestade magnética, dois dias apresentaram um atraso entre a ocorrência do V_{zp} e o início do *spread-F*. Na Figura 7.18, nota-se que à medida que a tempestade está na sua fase de recuperação, a duração do *spread-F* aumenta e não apresenta o mesmo atraso visto nos outros dois dias. No dia 18/01/2005, o *spread-F* ocorreu imediatamente após a ocorrência do V_{zp} , no entanto sua duração foi ~ 2 horas. Já no dia 19/01/2005, a duração do *spread-F* foi de ~5 horas e ocorreu com ~ 2 horas de atraso em relação ao V_{zp} . Esse atraso pode ter sido causado pelo efeito dos ventos termosféricos perturbados que além de adiantar a ocorrência do V_{zp} em até 1 hora em relação aos dias calmos, fez com que o *spread-F* tenha se desenvolvido mais tarde.

No dia 21/01/2005, dia em ocorreu uma grande compressão da magnetosfera em virtude de uma variação rápida na velocidade do vento solar (Figura 7.16), observa-se que o *spread-F* apresentou um atraso de ~ 8 horas em relação ao V_{zp} e com apenas ~2,5 horas de duração. A partir deste dia, a tempestade começa a se recuperar e assim o *spread-F* apresenta maior duração.

Os valores do Vzp apresentados na Figura 7.18 são confiáveis uma vez que em todos esses dias a camada esteve acima de 300 km de altura.

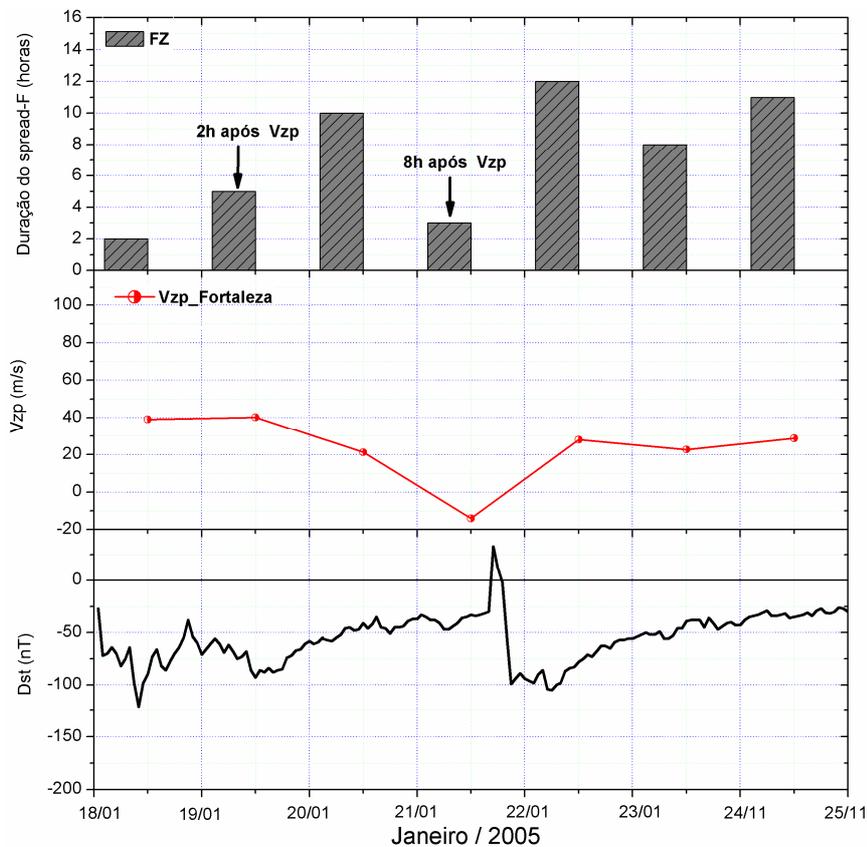


Figura 7.18 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma e índice Dst para o período de 18 a 24 de janeiro de 2005.

7.5 Comportamento geral do Vzp para todas as tempestades magnéticas estudadas

Embora apenas 4 tempestades magnéticas tenham sido apresentadas neste capítulo, outras tempestades também foram estudadas. Os casos não apresentados aqui podem ser vistos no apêndice A desta dissertação, onde está apresentadas de forma resumida os principais efeitos observados na velocidade.

De maneira a sumarizar os efeitos observados em todas elas, construiu-se a Tabela 7.1. Nela estão apresentadas a data e a hora em que a tempestade teve início, bem como o valor do Dst mínimo observado e a hora em que este ocorre. O dia em que a tempestade tem início e os três dias sucessivos a ela foram denominados por noite 1, noite 2, noite 3 e noite 4.

Quando o valor do Dst_m estiver denotado pela letra de cor vermelha, quer dizer que esse valor foi observado somente no dia seguinte ao início da tempestade. Como a tempestade magnética que teve início no dia 01/10/2002 apresentou uma longa fase de recuperação, o dia 05/10/2002 representa a noite 5, o dia 06/10/2002 a noite 6 e assim sucessivamente até o dia 14/10/2002.

As características observadas no Vzp sobre São Luís em relação à média dos dias calmos durante essas tempestades foram às seguintes:

Noite 1

- somente intensificado: 1 casos (durante fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 0;
- intensificado e atrasado: 1 caso (fase de recuperação);
- somente inibido: 2 casos (1 durante a fase principal e 1 na fase de recuperação);
- somente adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- inibido e adiantado: 3 casos (1 durante a fase principal e 2 na fase de recuperação);
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 0;

Noite 2

- somente intensificado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e atrasado: 0;
- somente inibido: 1 caso (fase de recuperação);
- inibido e adiantado: 0;
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 5 casos (fase de recuperação).

Noite 3

- somente intensificado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e atrasado: 1 caso (fase de recuperação);
- somente inibido: 0;
- inibido e adiantado: 1 caso (fase de recuperação) ;
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 5 casos (fase de recuperação).

Noite 4

- somente intensificado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 0;
- intensificado e atrasado: 0;
- somente inibido: 0;
- inibido e adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 7 casos (fase de recuperação)

Como a tempestade magnética do dia 01/10/2002 teve uma longa fase de recuperação e como durante esta fase foram observadas modificações no Vzp, os efeitos observados na noite 5, 6 foram apresentados na Tabela como noite 1 e 2 sucessivamente. Sendo assim temos:

Noite 5 : somente inibido;

Noite 6: nenhum;

Noite 7: inibido e adiantado;

Noite 8: intensificado;

Noite 9: intensificado;

Noite 10: inibido e adiantado;

Noite 11: inibido e adiantado;

Noite 12: intensificado e atrasado;

Noite 13: intensificado;

Noite 14: inibido.

Os efeitos observados noVzp sobre Fortaleza foram:

Noite 1

- somente intensificado: 1 caso (durante a fase principal da tempestade);
- intensificado e adiantado: 0 caso (fase principal);
- intensificado e atrasado: 1 caso (durante a fase principal da tempestade);
- somente inibido: 2 casos (1 durante a fase principal e 1 durante a fase de recuperação da tempestade);

- inibido e adiantado: 1 casos (fase de recuperação);
- inibido e atrasado: 0;
- somente adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- nenhum: 3 casos (1 durante a fase principal e 2 durante a fase de recuperação da tempestade).

Noite 2

- somente intensificado: 2 casos (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 1(fase de recuperação);
- intensificado e atrasado: 0;
- somente inibido: 1 caso (fase de recuperação);
- inibido e adiantado: 0;
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 5 casos (fase de recuperação).

Noite 3

- somente intensificado: 1 caso (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 0;
- intensificado e atrasado: 0;
- somente inibido: 0;
- inibido e adiantado: 1 caso (fase de recuperação);
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 7 casos (fase de recuperação).

Noite 4

- somente intensificado: 2 casos (fase de recuperação);
- intensificado e adiantado: 0;
- intensificado e atrasado: 0;
- somente inibido: 0;
- inibido e adiantado: 0 caso (fase de recuperação);
- inibido e atrasado: 0;
- nenhum: 7 casos (fase de recuperação)

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Esta dissertação teve dois objetivos principais, sendo eles: a) estudar a dependência do pico pré-reversão da velocidade de deriva vertical do plasma (V_{zp}) com o fluxo solar (F10.7), sobre a região equatorial brasileira de São Luís (44.2°W, 2.33°S) e Fortaleza (38.45°W, 3.9°S) e b) avaliar os diversos tipos de influências que o V_{zp} pode sofrer em virtude de uma tempestade magnética, bem como duração do *spread-F* durante a tempestade. Neste capítulo, serão apresentadas as principais conclusões desse trabalho em relação aos dois objetivos propostos.

8.1 Conclusões sobre a dependência do V_{zp} com o fluxo solar

Foram analisados os meses de outubro, novembro e dezembro dos anos de 2001 a 2009 (7 anos para São Luís e 8 anos para Fortaleza). O período estudado corresponde à fase descendente do ciclo de atividade solar. Para os dias em que a altura da camada esteve abaixo de 300 km, o V_{zp} foi corrigido, pois neste caso a camada F apresenta um movimento aparente devido aos fatores de perda por recombinação.

Os dias analisados foram separados entre calmos e perturbados. Fez-se um estudo comparativo entre a dependência do V_{zp} com o fluxo solar, somente para dias calmos para os meses de outubro, novembro e dezembro. Comparando os resultados obtidos entre esses meses, nota-se que em Fortaleza a maior dependência com o fluxo solar foi observada para o mês de novembro, depois outubro e por último dezembro. Isso pode estar ligado ao fato de que existe um melhor alinhamento entre o terminadouro solar e o meridiano magnético para o mês de novembro e menor para o mês de dezembro. Quanto maior for esse alinhamento, maior será a taxa de crescimento do V_{zp} . Em São Luís, observa-se o mesmo comportamento, só que as diferenças entre os meses são menores do que em relação a Fortaleza.

Os ajustes lineares feitos entre São Luís e Fortaleza para os meses estudados foram comparados entre si. Como já era esperada, a dependência do V_{zp} com o fluxo solar apresentou-se maior para São Luís (exceto para o mês de outubro e novembro na qual esta diferença diminui para altos valores de fluxo). Isto se deve a inclinação magnética praticamente nula dessa região, o que faz com que a deriva ocorrida seja puramente

devido a $\vec{E} \times \vec{B}$. Já a deriva sobre Fortaleza pode sofrer influências dos ventos termosféricos meridionais. Por outro lado, as derivas do tubo de fluxo tendem a aumentar em direção ao ápex da linha de força, pois ao longo de um dado tubo de fluxo as velocidades E/B se maximizam no ápex da linha de campo. O pico da ionosfera sobre São Luís está mais próximo ao ápex em comparação com Fortaleza, de modo que o argumento recém exposto favorece a ocorrência do Vz_p em São Luis maior que em Fortaleza.

A mesma análise feita para os dias calmos foi feita também para os dias perturbados. A comparação entre esses dois resultados mostrou comportamento similar entre São Luís e Fortaleza. De acordo com Fejer et al., 1991, em análise feita com dados de Jicamarca, a dependência do Vz_p com o fluxo solar diminui com a atividade magnética. Isso também pode ser visto nos resultados apresentados nesta dissertação, embora algumas discrepâncias tenham sido encontradas entre os valores obtidos no presente estudo e os valores obtidos pelos autores citados.

A comparação entre o comportamento dos dias calmos e perturbados em São Luís e Fortaleza mostrou uma menor diferença para o mês de dezembro, sendo que em São Luís essa diferença é ainda menor. Para o mês de outubro, os ajustes lineares mostraram que em Fortaleza, para baixos valores de fluxo (F10.7 < 100), a diferença entre o Vz_p entre os dias perturbados e os dias calmos é maior para o mês de outubro, fato observado também em São Luís. Já no mês de novembro, tanto em São Luís quanto em Fortaleza, a dependência do Vz_p com o fluxo solar é maior em toda a faixa de fluxo observada e isto evidencia novamente a importância do alinhamento entre as linhas do campo magnético terrestre e o terminadouro solar.

A fim de avaliar a importância dos dias perturbados na análise do Vz_p em função do fluxo solar e também da correção feita no Vz_p nos casos em a camada esteve abaixo dos 300 km de altura, fez-se a comparação entre as seguintes situações: Vz_p aparente e real incluindo dias calmos e perturbados e Vz_p real somente com dias calmos. Os resultados para outubro, novembro e dezembro foram os seguintes:

- **Outubro:** Em Fortaleza, observa-se que para valores de $F10.7 < 150$, praticamente nenhuma diferença foi encontrada entre as análises do Vzp real para dias calmos e perturbados e a do Vzp real somente para dias calmos. Em relação ao Vzp real e aparente envolvendo dias calmos e perturbados, nota-se uma diferença um pouco maior apenas para baixos valores de fluxo. Em São Luís, os resultados das três análises feitas mostram comportamentos similares aos resultados obtidos para Fortaleza.
- **Novembro:** neste mês observaram-se as maiores diferenças entre as análises feitas. Em Fortaleza, grandes diferenças são notadas quando os dias perturbados foram excluídos da análise do Vzp real e grandes diferenças também podem ser vistas entre a análise feita com o Vzp aparente. Em São Luís, observam-se variações similares só que a diferença encontrada é menor do que em Fortaleza. A comparação entre a análise do Vzp aparente (calmos e perturbados) e do Vzp real (calmos e perturbados) apresenta diferenças significativas em Fortaleza e isto evidenciou a importância da correção feita devido aos efeitos da recombinação. Novamente em São Luís o comportamento foi semelhante à Fortaleza, só que as diferenças observadas são menores.
- **Dezembro:** praticamente nenhuma diferença foi encontrada entre os resultados obtidos para as diferentes situações analisadas. Em Fortaleza, somente para baixos valores de fluxo o Vzp aparente (calmos e perturbados) apresentou alguma diferença entre o Vzp real (calmos e perturbados) e o Vzp real (calmos). Já em São Luís nenhuma diferença foi observada.

De maneira geral, observa-se que as maiores diferenças entre as análises feitas foram encontradas para o mês de novembro e em Fortaleza. Pode-se dizer que amplitude do Vzp nessa região pode ser influenciada por alguns fatores, tais como o ângulo de inclinação e declinação magnética e também pelos ventos termosféricos. A junção desses três fatores contribui para que o comportamento do Vzp sobre esta região seja mais sensível a diferentes situações. As maiores diferenças foram observadas justamente no mês em que ocorre o melhor alinhamento entre o terminadouro solar e as linhas do campo magnético terrestre, ou seja, novembro. Isto faz com que o pôr-do-sol ocorra simultaneamente entre as duas regiões E conjugadas e assim os circuitos dessas

duas regiões conjugadas são interrompidos simultaneamente, gerando assim uma taxa de crescimento maior na velocidade.

Em relação às variabilidades observadas no Vz_p, nota-se que a amplitude do Vz_p apresenta variabilidades em pequena e longa escala. Em todos os anos analisados, nota-se que as amplitudes do Vz_p apresentam variabilidades, sendo essas em curta ou longa escala. São maiores para São Luís. As diferenças observadas nas amplitudes do Vz_p entre os anos de alta e baixa atividade solar para Fortaleza e São Luís podem ser atribuídas aos efeitos que o fluxo solar gera no ambiente ionosférico e nos parâmetros que participam diretamente ou indiretamente na geração dos campos elétricos que são os responsáveis pela deriva vertical ionosférica.

Dos anos estudados nesta dissertação, 2001 e 2008 apresentaram o maior e o menor valor de fluxo médio para os meses de outubro, novembro e dezembro, respectivamente. Avaliando as diferenças observadas entre o Vz_p para esses dois anos, nota-se que em 2008 o Vz_p médio entre os meses de outubro, novembro e dezembro foi ~ 80% menor do que em 2001 sobre a região de Fortaleza. Quanto maior o fluxo de radiação provinda do sol, maior será a quantidade de elétrons livres na ionosfera, portanto mais intensos serão os campos elétricos formados nesta região e conseqüentemente as amplitudes do Vz_p serão maiores.

Forte correlação foi encontrada entre o comportamento médio de fluxo solar e o comportamento médio do Vz_p para todo período estudado tanto em São Luís quanto Fortaleza. O correspondente aumento ou diminuição do Vz_p com o fluxo solar é devido ao correspondente aumento dos ventos termosféricos zonais, que por sua vez ativam o dínamo da camada F no momento em que existe um gradiente longitudinal e com a hora local na condutividade da região E. Esse aumento se deve também a taxa de crescimento entre o campo magnético e a condutividade Pedersen entre as regiões E e F.

8.2 Conclusões sobre a os efeitos causados no Vzp devido à atividade magnética

O estudo feito em relação às atividades magnéticas mostrou que a mesma tem forte influência sobre o Vzp e conseqüentemente no desenvolvimento do *spread-F*. Essas influências podem ser causadas pela penetração de campos elétricos de origem magnetosférica e pelos campos elétricos originados devido ao dínamo perturbado.

Um ponto importante observado nas tempestades magnéticas no capítulo 7 foi o horário de ocorrência da mesma. Entre as tempestades apresentadas neste capítulo, às duas que ocorreram mais próximas ao horário em que acontece a intensificação do campo elétrico zonal influenciaram fortemente a velocidade de deriva do plasma.

Vários efeitos foram observados no Vzp durante a ocorrência das tempestades magnéticas estudadas. Houve casos em que o Vzp apresentou-se em relação aos dias calmos: intensificado, atrasado, inibido, e adiantado. Observou-se que em alguns dias esses efeitos foram combinados, como por exemplo, intensificado e adiantado ao mesmo tempo ou intensificado e atrasado.

Na maioria dos casos em que ocorreu a intensificação do Vzp, acredita-se que isto tenha acontecido em virtude da penetração para latitudes equatoriais de um campo elétrico de polaridade para leste. Para os casos em que o Vzp foi inibido, atribui-se esse fato ou a penetração de um campo elétrico de polaridade para oeste ou devido ao campo elétrico do dínamo perturbado. Nesses casos, o campo elétrico tem polaridade oposta ao campo elétrico devido ao dínamo normal da camada F e isso faz com que a velocidade de subida da camada seja menos intensa. Nos casos de variações de campos elétricos na fase avançada de uma tempestade magnética, fica difícil discernir os efeitos observados na velocidade devido a campos elétricos de origem diferentes.

A tempestade observada no dia 21/01/2005 fez com que a ionosfera não apresentasse um comportamento muito comum. Neste dia, observou-se que o índice AE sofreu uma intensificação no mesmo instante em que o campo magnético interplanetário se encontrava para norte ~ 2 horas. A fim de explicar essa intensificação da atividade auroral com Bz para norte, acredita-se que a reconexão (processo na qual permite a entrada de partículas de origem interplanetária na região auroral) tenha ocorrido na

região da cúspide polar. Nesta região, as linhas do campo magnético terrestre encontram-se em sentido oposto ao campo magnético interplanetário e poderá ocorrer a reconexão magnética. Em tal caso, um campo elétrico com para polaridade leste poderá se transmitir da região polar para a região equatorial. Acredita-se que este campo elétrico tenha causado a intensificação na subida da camada F para o dia 21/01/2005. Infelizmente não havia dados disponíveis para São Luís ficando esta análise restrita a Fortaleza. Já em Jicarmarca, uma forte intensificação foi observada na altura da camada ~ às 18UT, no mesmo instante em que a velocidade do vento solar apresentou uma variação de 600 para 1000 km/s.

Apresentou-se uma tabela resumindo os efeitos observados no Vz_p devido à tempestade magnética. A maior variabilidade observada no Vz_p pode ser vista no primeiro dia em que a tempestade acontece. Os efeitos observados foram classificados da seguinte maneira: Vz_p somente intensificado, Vz_p intensificado e atrasado, Vz_p somente inibido, Vz_p inibido e adiantado, Vz_p inibido e atrasado ou nenhuma anormalidade observada.

Em relação à ocorrência e o tempo de duração do *spread-F* durante o período de atividade magnética, notou-se que o mesmo pode estar ligado aos fenômenos que causam as variabilidades na intensificação do campo elétrico zonal, que pode ser representado pela velocidade de deriva vertical do plasma. Nos casos em que o Vz_p está intensificado e a camada apresenta uma rápida subida, o *spread-F* geralmente apresenta maior duração e ocorre logo após o Vz_p. Quando o Vz_p é inibido, observa-se que se o *spread-F* não apresentar total inibição, o mesmo apresenta um atraso em relação ao Vz_p. O desenvolvimento ou não desse tipo de instabilidade depende de alguns fatores, tais como a intensidade do campo elétrico zonal/deriva vertical do plasma, o campo elétrico de polarização possivelmente induzido pela propagação de ondas planetárias, a amplitude da densidade inicial perturbada e condutividade integrada à linha de campo. No presente trabalho, avaliou-se o primeiro caso, na qual se levou em consideração a intensidade do campo elétrico zonal, ou seja, a deriva vertical do plasma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A. ; BITTENCOURT, J. A. ; BATISTA, I. S. . magnetic declination control of the equatorial f region dynamo field development and spread-F. **Journal of Geophysical Research.**, v. 86, p.11443-11446, 1981.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; WALKER, G. O.; SOBRAL, J. H. A.; TRIVEDI, N. B.; DE PAULA, E. R. Equatorial Ionospheric Electric Fields During Magnetospheric Disturbances: Local Time/Longitude Dependences from Recent EITS Campaigns. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n. 10, p. 1065-1083, 1995.

ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 13, p. 1505-1519, 1997.

ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere – thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 869-884, 2001.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n.5, p.771-787, 2005.

ABDU, M. A.; BATISTA, P. P.; BATISTA I. S.; BRUM, C. G. M.; CARRASCO, A. J.; REINISCH, B. W. Planetary wave oscillations in mesospheric winds, equatorial evening prereversal electric field and spread F. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 7, p. 1-4, 2006a.

ABDU, M. A.; RAMKUMARB, T. K.; BATISTA, I. S.; BRUM, C. G. M.; TAKAHASHIA, H. REINISCH, B. W.; SOBRAL, J. H. A. Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere ionosphere system, and mesosphere- E- and F-region coupling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n.3-5, p. 509-522, 2006b

ABDU, M. A.; DE SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I.S. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere. In: TSURUTANI, B. et al. **Recurrent magnetic storms: corotating solar wind Streams** . Washington, DC: American Geophysical Union, p. 283-304. ISBN 0-87590-432-7, AGU Code GM1674327. Geophysical Monograph Series v. 167, 2006c

ABDU, M.; KHERANI, A. E. A., BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. Equatorial Evening Prereversal Vertical Drift and Spread F Suppression by Disturbance Penetration Electric Fields. **Geophysical Research Letters**, v. 36, L19103, 5 PP., doi:10.1029/2009GL039919, 2009a.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; BRUM, C. G. M.; MACDOUGALL, J. W.; SANTOS A. M.; DE SOUZA, J. R; SOBRAL, J. H. A. Solar Flux Effects on the Equatorial Evening Vertical Drift and Meridional Winds over Brazil: A Comparison between Observational Data and the IRI Model and the HWM Representations. **Advances in Space Research** in press, 2010.

ANDERSON, O. N. AND RUSCH, D. W. Composition of the nighttime ionospheric F1 region near the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. A2, p. 569-574, 1980.

BATISTA, I. S. **Dínamo da região F equatorial: Assimetrias sazonais e longitudinais no setor Americano.** 1985. 169p. (INPE-3760-TDL/206). Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 1986a.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A. Equatorial F-region vertical plasma drifts: Seasonal and Longitudinal Asymmetries in the American Sector. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A11, p. 12055-12064, 1986b.

BATISTA, I.S.; DE MEDEIROS, R.T.; ABDU, M.A.; DE SOUSA, J.R.; BAILEY, G.J. AND DE PAULA, E.R. Equatorial Ionosphere Vertical Plasma Drift Model Over the Brazilian Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p. 10887-10892, 1996.

BERTONI, F. C. P. **Estudos de derivas ionosféricas por meio de ionosondas digitais.** 1998. 135 p. (INPE-7169-TDI/675). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose Campos. 1998.

BITTENCOURT, J. A. AND ABDU, M. A. Theoretical Comparison between Apparent and Real Vertical Ionization Drift Velocities in the Equatorial F-Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A4, p. 2451-55, 1981.

BLANC, M. AND RICHMOND, A. D. The ionospheric disturbance dynamo, **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. A4, p. 1669-1686, 1980.

CARRASCO, A. J. **O pico pré-inversão na deriva vertical de plasma e a camada E esporádica.** 2005. 154 p. (INPE-13054-TDI/1022). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

DAVIES, K. **Ionospheric radio.** London: Peter Peregrinus, 1990. IEE Elettromagnetic Waves Series 31.

FARLEY, D. T.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A12, p. 13723-13728, 1986.

FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C. Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle, **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. A10, p. 5792-5796, 1979.

FEJER, B. G.; LARSEN, M. F.; FARLEY, D. T. Equatorial disturbance dynamo electric field. **Geophysical Research Letters**, v. 10, n. 7, p. 537-540, 1983.

FEJER, B. G.; DE PAULA, E. R.; BATISTA, I. S.; BONELLI E.; WOODMAN R. F. Equatorial F Region Vertical Plasma Drifts During Solar Maxima. **Journal of Geophysical Research** v. 94, n. A9, p. 12,049-12,054, 1989.

- FEJER, B. G.; SPIRO, R. W.; WOLF, R. A.; FOSTER, J. C. Latitudinal variation of perturbation electric fields during magnetically disturbed periods: 1986 SUNDIAL observation and model results, **Annales Geophysicae**, v. 8, n. 6, p. 441-454, 1990.
- FEJER, B. G.; GONZALEZ, S. A.; WOODMAN, R. F. Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca, **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A8, p. 13,901-13,906, 1991.
- FEJER, B. G., Low latitude electrodynamic plasma drifts: A review, **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, 53, n.8, p. 677-693, 1991a.
- FEJER, B. G. AND SCHERLIESS, L. Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances, **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 7, p. 851-854, 1995.
- FEJER, B. G. AND SCHERLIESS, L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields, **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A11, p. 24047-24056, 1997.
- FEJER, B.G.; Scherliess, L.; de Paula, E.R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A9, p. 19,854-19,869, 1999.
- FEJER, B. G.; JENSEN, J.W.; SU, S.Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts **Geophysical Research Letters**, v. 35, L20106, doi:10.1029/2008GL035584, 2008.
- GOEL, M. K.; SINGH, S. S.; RAO, B. C. N. Postsunset Rise of F Layer Height in the Equatorial Region and its Relation to the F Layer Dynamo Polarization Fields, **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. A5, p. 6237-6246, 1990.
- GONZALEZ, W.D.; Joselyn, J.A.; KAmide, Y.; Kroehl, H.W.; Rostoker, G.; TsurutanI, B.T.; Vasyliunas, V.M. What is a magnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994.
- HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- HEDIN, A. E.; Biondi, M. A.; Burnside, R. G.; Hernadez, G.; Johson, R. M.; Killen, T. L.; Mazaudier, C.; Meriwether, J. W.; Salah, J. E.; Sica, R. J.; Smith, R. W.; Spencer, N. W.; Wickwar, V. B.; Viridi, T. S. Revised global model of thermosphere winds using a satellite and ground-based observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A5, p. 7657-7688, 1991.
- HEELIS, R. A.; KENDALL, P. C.; MOFFET, R. J.; WINDLE, D. W.; RISHBETH, H. Electrical coupling of the E- and F- region and its effects on the F-region drifts and winds, **Planetary Space Science**, v. 22, n. 5, p. 743-756, 1974.
- KELLEY, M.C. **The Earth's ionosphere**. London: Academic Press, 487 p. ISBN (0-12-404012-8), Second Edition 2008.

KIKUCHI, T.; Araki, T.; Maeda, H.; Maekawa, K. Transmission of polar electric fields to the equator, **Nature**, v. 273, p. 650, 1978.

KIKUCHI, T. Evidence of transmission of polar cup electric fields to the low latitude at times of geomagnetic sudden commencements, **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A3, p. 3101-3105, 1986.

MUELLA, M. T. A. H. **Ventos termosféricos meridionais inferidos por meio de sondagens ionosféricas**. 2004. 215 p. (INPE-14201-TDI/1102). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

PEYMIRAT, C.; RICHMOND, A. D.; KOBEA, A. T. Electrodynamic coupling of high and low latitudes: Simulations of shielding/overshielding effects, **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A10, p. 22,991-23,003, 2000,

RATICLIFFE, J.A. **The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere**. Cambridge: University Press, 1962.

REINISCH, B.W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. **Radio Science**, v. 21, n. 3, p. 331-341, 1986.

REINISCH, B. W.; BIBL, K.; KITROSSER, D. F.; SALES, G. S.; TANG, J. S.; ZHANG, Z.M.; BULLETT, T. W.; RALLS, J. A. The Digisonde 256 Ionospheric Sounder, World Ionosphere/ Thermosphere Study. **WITS Handbook**, v. 2, Dec. 1989. C.H. Liu (ed).

REINISCH, B. W. Modern ionosondes. In: KOHL, H.; RUSTER, R.; SCHLEGEL, K. (eds). **Modern ionospheric science.**, p. 440-458, Katlenburg-Lindau: European Geophysical Society, 1996.

RICHMOND A. D; PEYMIRAT C; ROBLE R. G. Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A3, 1118, doi:10.1029/2002JA009758, 2003.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York; London: Academic Press, ISBN (0125889402), 1969.

RISHBETH H., Polarization fields produced by winds in the equatorial F region, **Planet. Space Science**, v. 19, n. 3, p. 357-369, 1971.

RISHBETH, H. Dynamics of the equatorial F-region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 39, n. 9-10, p. 1159-1168, 1977.

SASTRI, J. H.; RAO, J. V. S. V.; RAMESH, K. B. Penetration of polar electric field to the nightside dip equator at times of geomagnetic sudden commencements, **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A10, p. 17517-17523, 1993.

SASTRI, J. H.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. Onset conditions of equatorial (range) spread F at Fortaleza, Brazil, during the June solstice. **Journal of Geophysical Research**, v. 102 n. A11, p. 24013-24021, 1997.

SAUNDERS, M. The polar cusp ionosphere: a window on solar wind-magnetosphere coupling. **Antarctic Science**, v. 1, n. 3, p. 193-203, 1989.

SENIOR, C. AND BLANC, M. On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities, **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. A1, p. 261-284, 1984.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; BATISTA, I. S.; GONZALEZ, A. L. C. Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A7, p. 14,305-14,313, 1997.

Space Physics Data Facility. Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb). Disponível em: < <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>> Acesso em: 06 de Julho de 2010.

SPIRO, R. W.; WOLF, R. A.; FEJER, B. G. Penetration of high-latitude electric fields effects to low latitudes during SUNDIAL 1984, **Annales Geophysicae**, v. 6, n. 1, p. 39-50, 1988.

SUBBARAO, K. S. V. AND KRISHNAMURTHY, B. V. F-region vertical velocity and its fluctuations at the magnetic equator. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, v.12, p. 94-96, 1983.

TAPPING K.F. 'Recent solar radio astronomy at centimeter wavelengths: the temporal variability of the 10.7-cm flux. **J. Geophys. Res.**, pag 829-838, 1987.

University Massachusetts Lowell. Antenna Array Configuration for DDA software. Massachusetts: ULCAR, 2009. Disponível em: < <http://ulcar.uml.edu/dda>> Acesso em: 22 de Junho de 2010.

WOODMAN, R. F. East-west ionospheric drifts at the magnetic equator. **Space Research**, v. 12, p. 969-974, 1972.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 2000. 75 p. (INPE-7516-TDI/729). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.

APÊNDICE A

OUTROS CASOS DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS

A1. Tempestade magnética de 28 a 31 de outubro de 2001

Principais características observadas (Figura A1):

- período analisado: 25-31 de outubro de 2001;
- início da tempestade : 28/10/2001 às 0319 UT e 31/10/2001 às 1348UT;
- $dst_m = \sim -157$ nT às 11UT do dia 28/10/2001;
- 26/10/2001 e 30/10/2001: Vzp intensificado sobre Fortaleza. Isto pode ser devido à influência dos ventos termosféricos sobre esta região;
- 30/10/2001: Vzp intensificado sobre Fortaleza possivelmente devido ação dos ventos termosféricos;
- 31/10/2001: Vzp intensificado sobre São Luís e Fortaleza em virtude de um campo elétrico para leste (B_z para sul e intensificação da atividade auroral). O pico de velocidade sobre São Luís e Fortaleza atinge 80 m/s o que corresponde a um campo elétrico perturbado de ~ 2 mV/m.

Obs: A altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para todos os dias analisados na Figura A1.

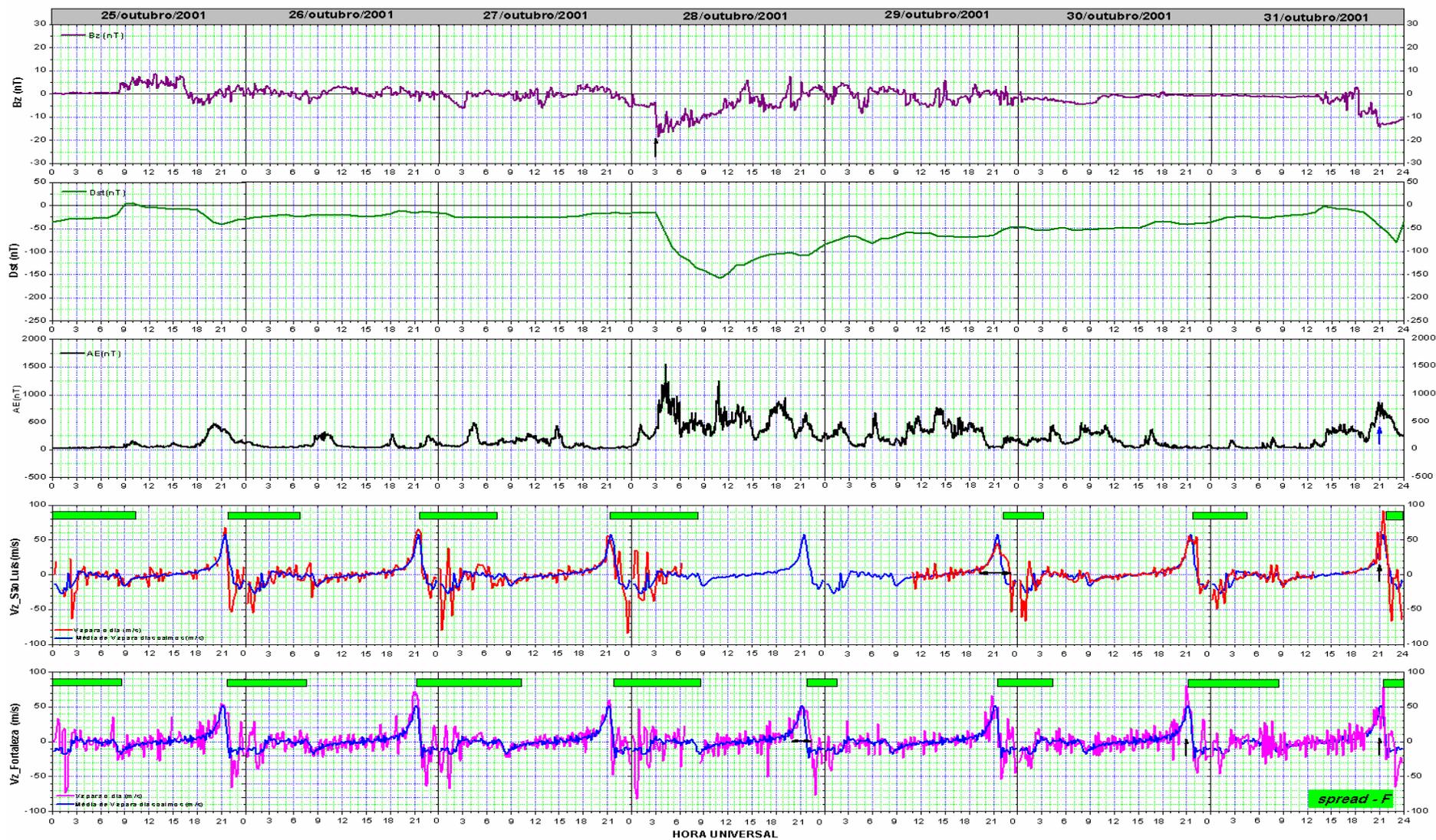


Figura A1 - Tempestade magnética de 28 a 31 de outubro de 2001

A1.1 Duração do *spread-F* durante período de 25 a 31 de outubro de 2001

Durante o período de 25/10 à 31/10/2001 (Figura A2), observou-se que o *spread-F* teve início logo após o pico de pré-reversão da velocidade. Antes do início da tempestade, (25-27 de outubro) sua duração para São Luís e Fortaleza foi superior a 8 horas. No dia em que o índice Dst apresentou uma queda, marcando assim o início da tempestade, a duração do *spread-F* sobre Fortaleza diminuiu em relação aos dias anteriores. Durante a fase de recuperação da tempestade a duração do *spread-F* foi se restabelecendo, apresentando o mesmo comportamento dos dias anteriores a tempestade.

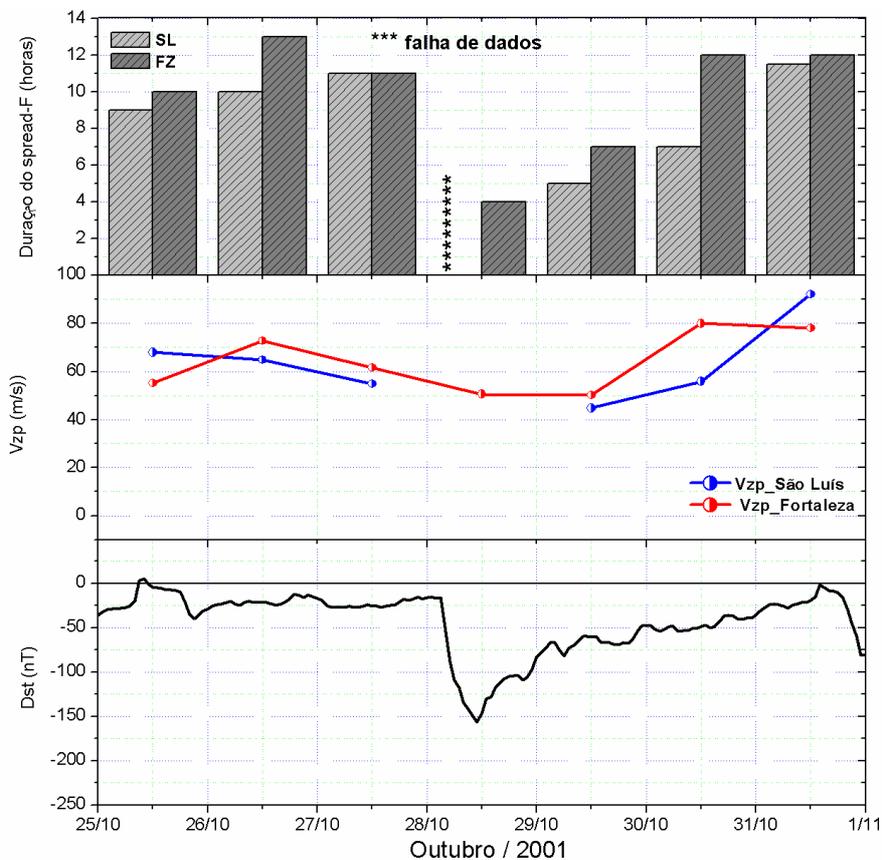


Figura A2 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 25 a 31 de outubro de 2001.

A2. Tempestade Magnética de 05 a 09 de novembro de 2001

Principais características observadas (Figura A3):

- período analisado: 03 - 09 de novembro de 2001;
- início da tempestade: 05/11/2001 às 18UT;

- $dst_m = \sim -292$ nT às 06UT do dia 06/11/2001;
- 06/11/2001: entre 00 e 06 UT nota-se intensa atividade auroral. Durante este período, a velocidade sobre São Luís e Fortaleza apresenta-se com grandes oscilações, que podem se resultado da penetração de campos elétricos. O pico de velocidade para este dia e para as duas localidades (São Luís e Fortaleza) apresenta-se adiantado e intensificado em relação aos dias calmos ($V_{zp} \sim 80$ m/s o que corresponde a um campo elétrico de ~ 2 mV/m observado às 21 UT). No momento em que a velocidade se intensifica, o índice AE também apresenta uma intensificação (de 750nT para 1000nT).

Obs: A altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para todos os dias analisados na Figura A3.

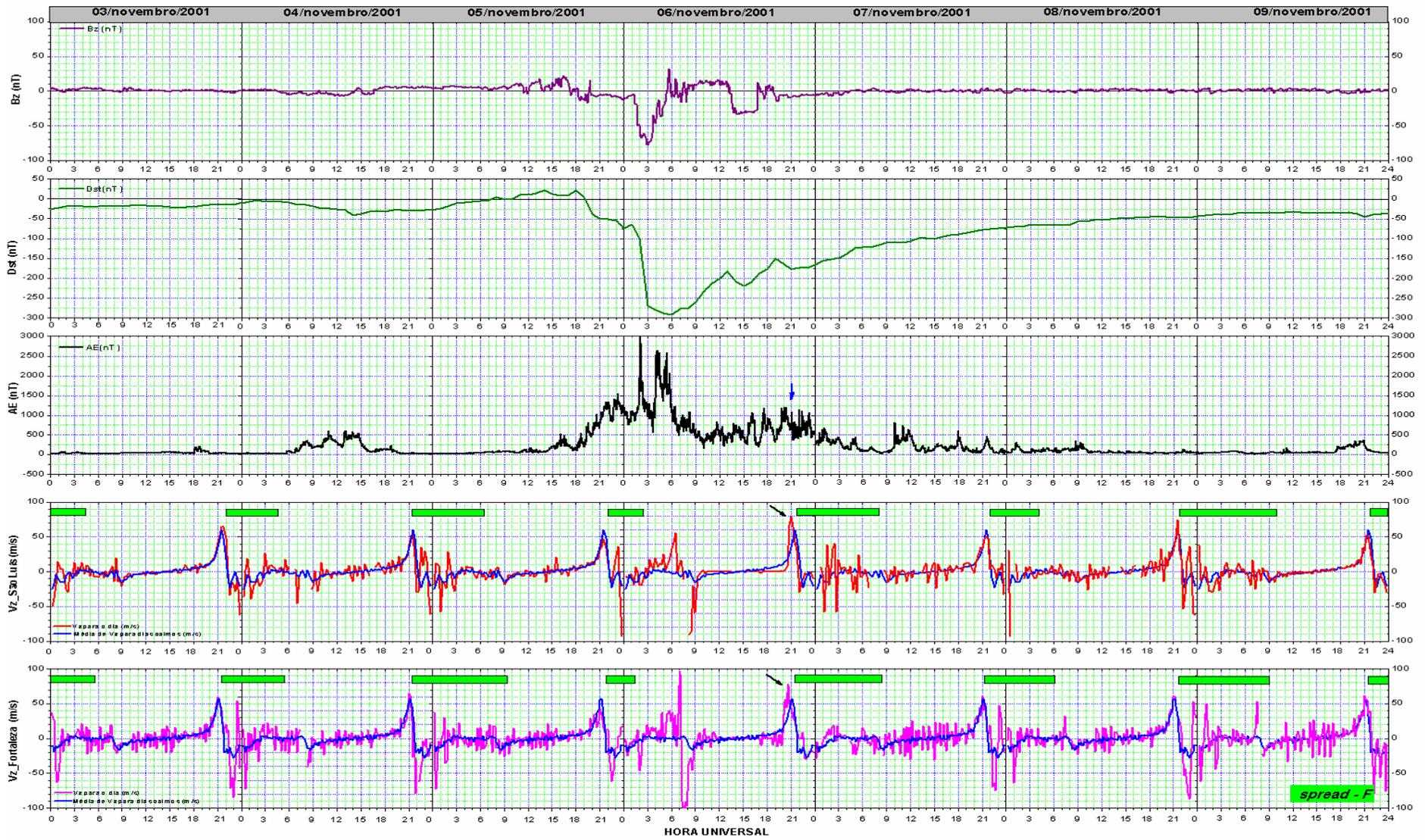


Figura A3 - Tempestade magnética de 06 a 09 de novembro de 2001.

A2.1 Duração do *spread-F* durante período de 03 a 09 de novembro de 2001

Durante o período de 03/11 à 09/11/2001 (Figura A4), similar a tempestade que se iniciou no dia 28/10/2001, observa-se que o *spread-F* teve início logo após o pico de pré-reversão da velocidade. No dia em que a tempestade se iniciou, às 18 UT do dia 05/11/2001, o *spread-F* apresentou em decréscimo na sua duração em relação aos dois dias anteriores (03 e 04 de novembro).

No dia 06/11, com o pico de velocidade atingindo ~ 80 m/s às 21 UT em São Luís e Fortaleza, o *spread-F* tem início logo em seguida a essa intensificação (duração de ~10 horas em São Luís e 12 horas em Fortaleza). No dia 07/11, com a diminuição do pico de velocidade em relação ao dia anterior o *spread – F* apresentou 6 horas de duração em São Luís e 9 horas em Fortaleza. No dia seguinte, com a diminuição do Vz_p em relação do dia 07/11, o *spread-F* apresentou duração de 6 horas em São Luís e 9 horas em Fortaleza.

Nos dias 08 e 09/11, com a tempestade em sua fase de recuperação, o *spread-F* volta a apresentar uma duração maior.

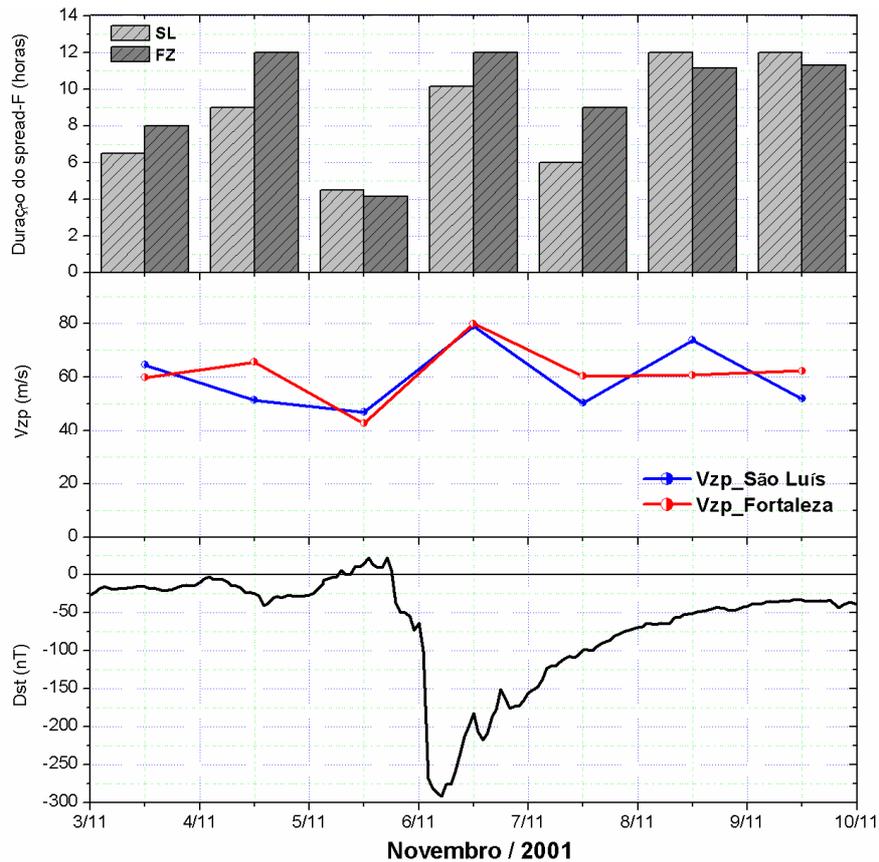


Figura A4 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 03 a 09 de novembro de 2001.

A3. Tempestade Magnética de 24 a 27 de novembro de 2001

Principais características observadas (Figura A5):

- período analisado: 21-27 de novembro de 2001;
- início da tempestade: 24/11/2001 às 0556UT;
- $dst_m = \sim -216$ nT às 17UT do dia 24/11/2001;
- 24/11/2001: Vzp inibido e adiantado em São Luís. Isso ocorre ~ 4 horas depois de período de intensa atividade auroral. Com Bz invertendo-se para norte e permanecendo nesta situação por um longo tempo, acredita-se que o efeito de inibição observado na velocidade sobre São Luís e Fortaleza tenha ocorrido em virtude da ação de um campo elétrico com direção para oeste que contrabalanceou o campo elétrico para leste devido ao dínamo da camada F. Ao contrário do geralmente após o pico de pré-reversão, a velocidade não apresentou uma queda brusca. O mesmo fato também pode ser vista em Fortaleza.

- Nos dias 25, 26 e 27/11, com a tempestade em sua fase de recuperação, nenhuma anormalidade foi observada no pico de velocidade tanto em São Luís quanto em Fortaleza.

Obs: A altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para todos os dias analisados na Figura A5.

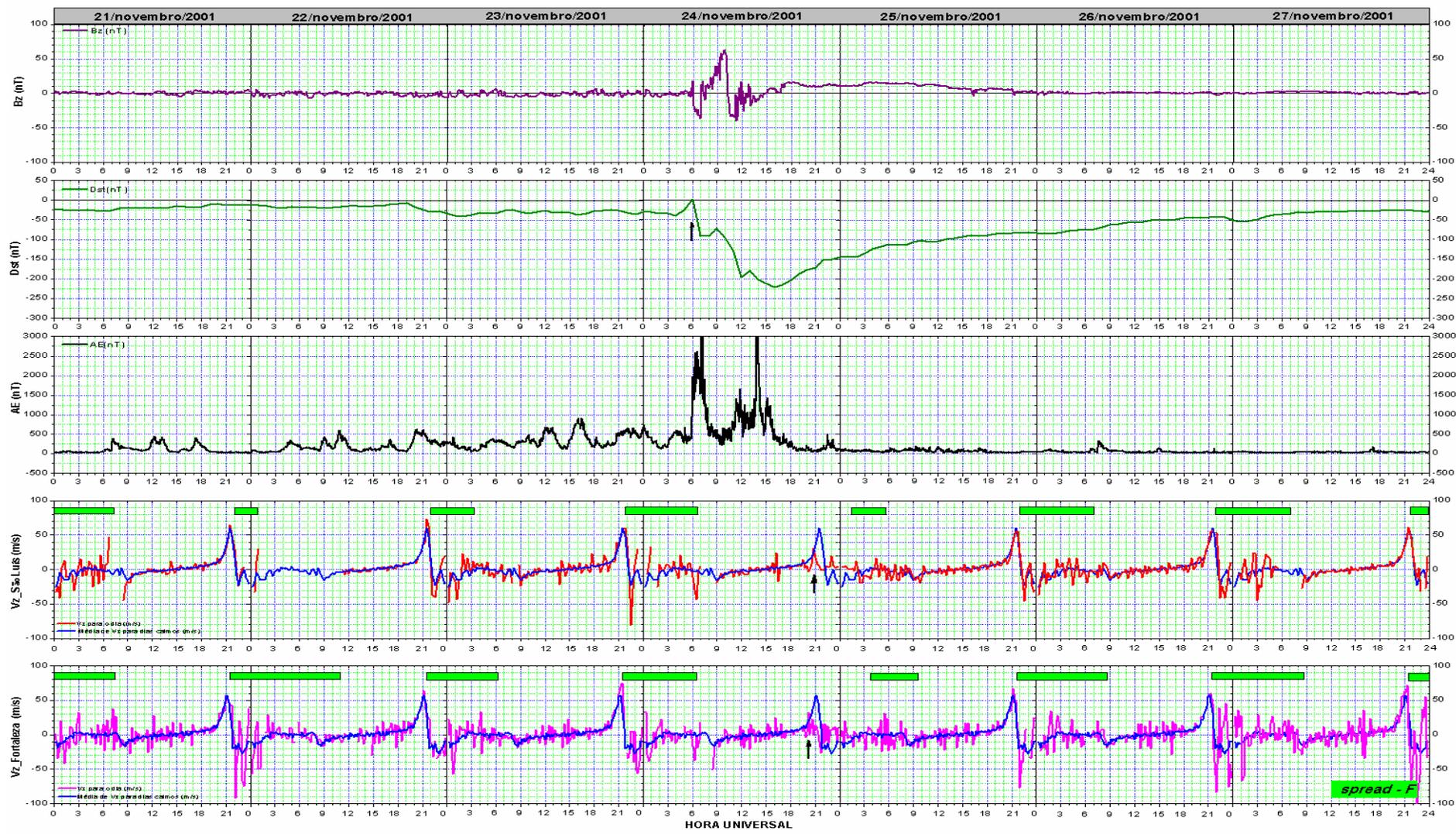


Figura A5 - Tempestade magnética de 24 a 27 de novembro de 2001

A3.1 Duração do *spread-F* durante período de 21 a 27 de novembro de 2001

Antes do início da tempestade, a duração do *spread-F* observada através dos ionogramas, mostrou que no dia 21/11 o *spread-F* durou ~ 13 horas em Fortaleza, enquanto em São Luís foi observado apenas 3 horas por falta de dados. Na Figura A6, nota-se que no dia em que a tempestade teve início, em virtude de uma campo elétrico para oeste nos horário de ocorrência do pico de velocidade, o *spread-F* apresentou duração de ~ 5 horas em São Luís e ~ 6 horas em Fortaleza. Observa-se que este campo elétrico, além de diminuir a duração do *spread-F*, fez com que o mesmo apresenta-se com um certo atraso em relação aos dias calmos (~ 4,5 horas em São Luís e 5,5 horas em Fortaleza).

Nos dias 25, 26 e 27/11, nenhuma anormalidade foi observada em Vzp e em relação à duração do *spread-F* que por sua vez, se apresentou imediatamente a ocorrência da intensificação da velocidade ao entardecer.

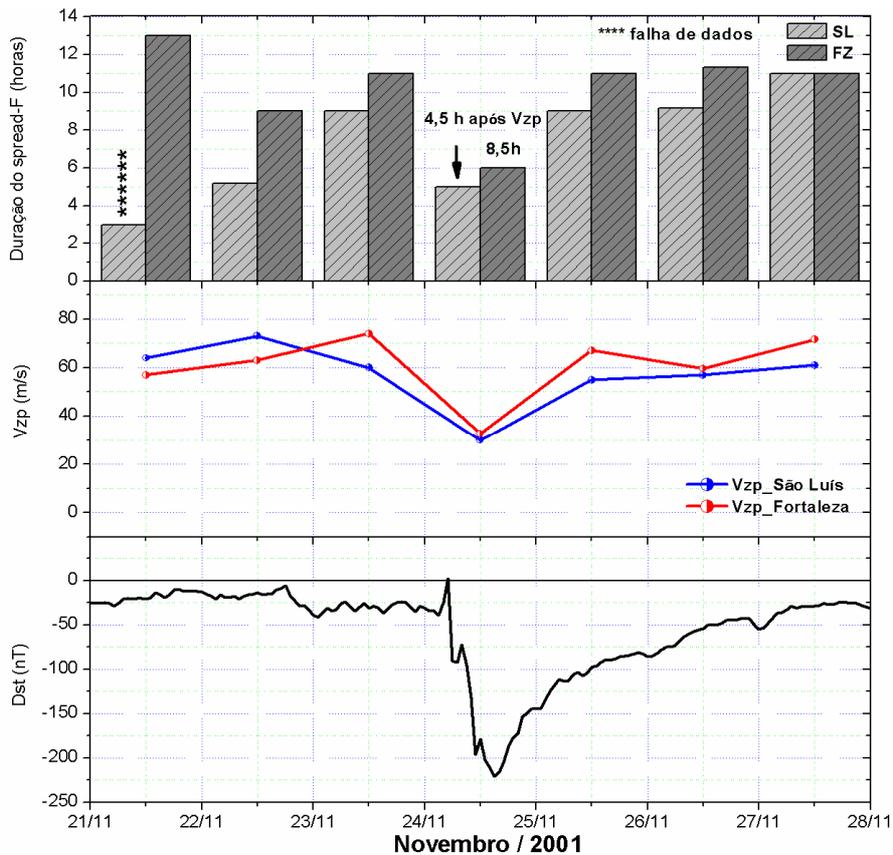


Figura A6 - Duração do *spread-F*, pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 21 a 27 de novembro de 2001.

A4. Tempestade Magnética de 08-14 de outubro de 2002

Os efeitos observados na velocidade do dia 01-07 de outubro de 2001 já foram apresentados no capítulo 7. A tempestade iniciada em 01 de outubro apresentou uma duradoura fase de recuperação e os efeitos observados durante esta fase serão descritos neste momento. Por falta de dados sobre Fortaleza, foram analisados somente os dados de São Luís.

Principais características observadas (Figura A6):

- período analisado: 08-14 de outubro de 2002;
- início da tempestade: 01/10/2002 às 09 UT;
- $dst_m = \sim -176$ nT às 17UT do dia 01/10/2002;
- 09/10/2002: Vzp intensificado em São Luís e um correspondente aumento na atividade auroal.
- 10/10/2002: Vzp um pouco inibido e adiantado em relação aos dias calmos, Neste caso, o índice AE apresenta um período de recuperação de ~ 9 horas. Isto se deve a ação de um campo elétrico com direção para oeste devido ao dínamo perturbado;
- 11/10/2002: similar ao dia 10/10/2002;
- 12/10/2002 e 13/10/2002: Vzp intensificado devido ao forte campo elétrico para leste;
- 14/10/2002: neste dia uma nova tempestade parece se iniciar. O índice Dst atinge um valor mínimo ~ -100 nT às 13 UT. O índice AE começa a se intensificar às 06 UT e depois de ~ 9 horas apresenta uma tendência de recuperação. O pico de velocidade apresenta menor intensidade em relação aos dias calmos e isso pode ser novamente devido a um campo elétrico para oeste devido ao dínamo perturbado.

Obs: A altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km em São Luís para todos os dias analisados na Figura A7.

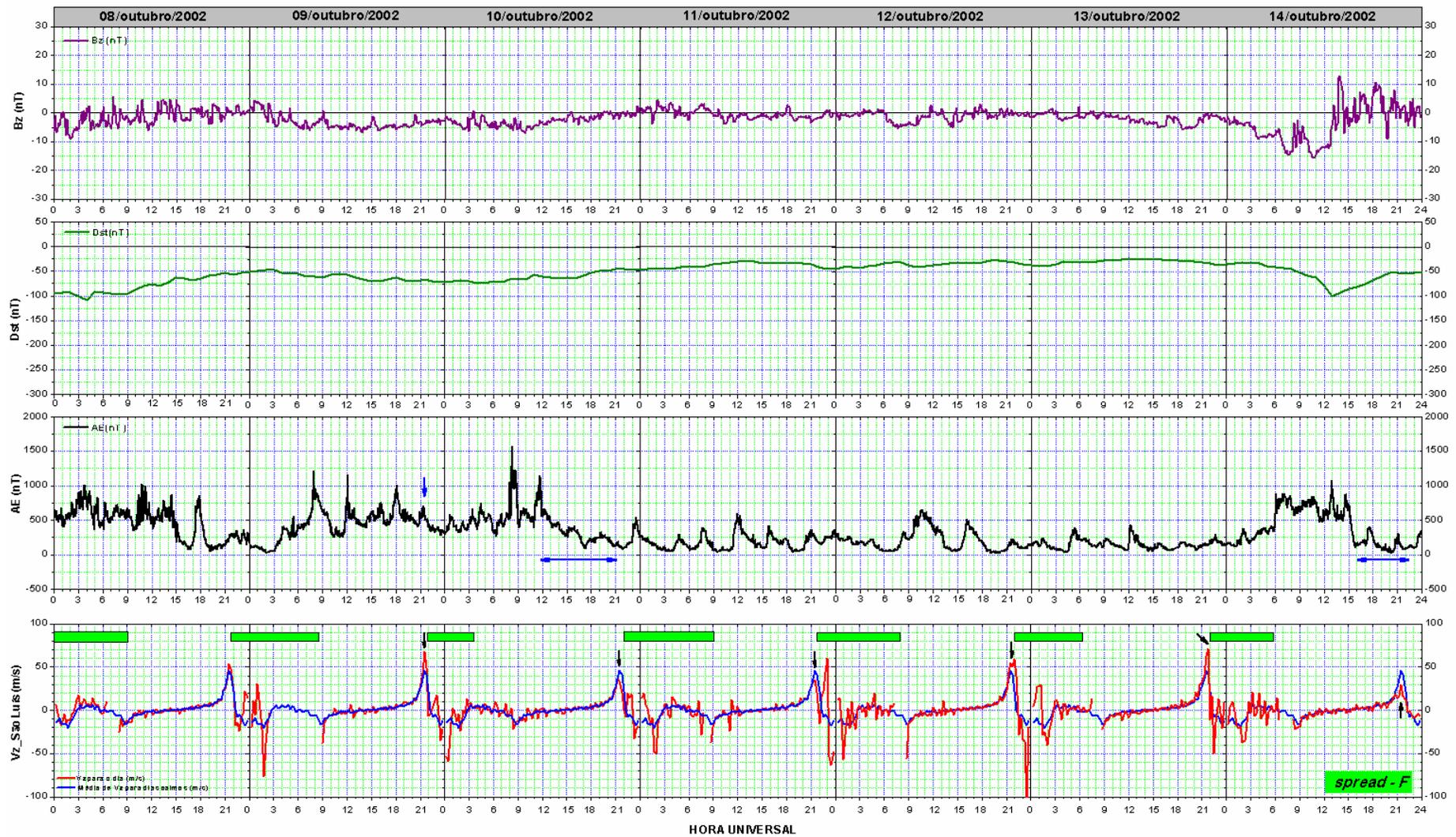


Figura A7 - Tempestade magnética de 08 a 14 de outubro de 2002.

A4.1 Duração do *spread-F* durante período de 08 a 14 de outubro de 2002

Com a falta de dados sobre Fortaleza, analisou-se a duração do *spread-F* somente para a região de São Luís. O período apresentado aqui corresponde à fase de recuperação de uma tempestade que teve início no dia 01/10/2001 e que já foi parcialmente apresentada no capítulo 7 deste trabalho. No período de 08-14 de outubro de 2002 (Figura A8), os valores do Vz_p mostraram-se ainda influenciados pela tempestade, sendo inibido ou intensificado em relação dos dias calmos, no entanto de uma maneira geral, nenhum atraso foi observado em relação ao início do *spread-F*, ou seja, em todos os dias ele teve início logo após a ocorrência do Vz_p. Em relação à duração do mesmo, somente no dia 09/10/2002 o *spread-F* foi inferior a 6 horas. No dia 15/10, nota-se através do índice Dst que uma nova tempestade se inicia e isso faz com que o Vz_p seja inibido bem como o desenvolvimento do *spread-F*.

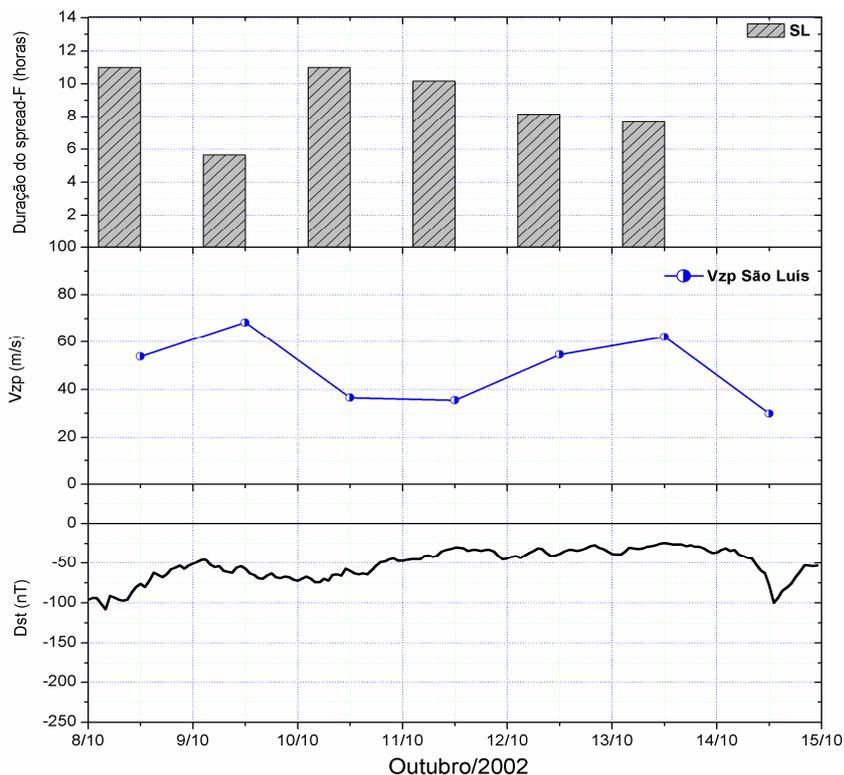


Figura A8 - Duração do *spread-F*, pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 08 à 14 de outubro de 2002.

A5. Tempestade Magnética de 17- 22 de abril de 2002

Principais características observadas (Figura A9):

- período analisado: 16-17 de abril de 2002;
- início da tempestade: 17/04/2002 às 1107 UT;
- $dst_m = \sim -100$ nT às 18UT do dia 17/04/2002;
- 17/04/2002: Vz_p atrasado em relação aos dias calmos em São Luís e Fortaleza. O índice AE apresenta um início de recuperação (20UT) após 11 horas de atividade auroral. Um campo elétrico para oeste pode ter sido o responsável pelo que se observa no Vz_p nesse dia. O mesmo comportamento de AE e o Vz_p pode ser visto no dia 18/04/2002 em São Luís.

Obs: A altura da camada F no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para todos os dias analisados na Figura A9.

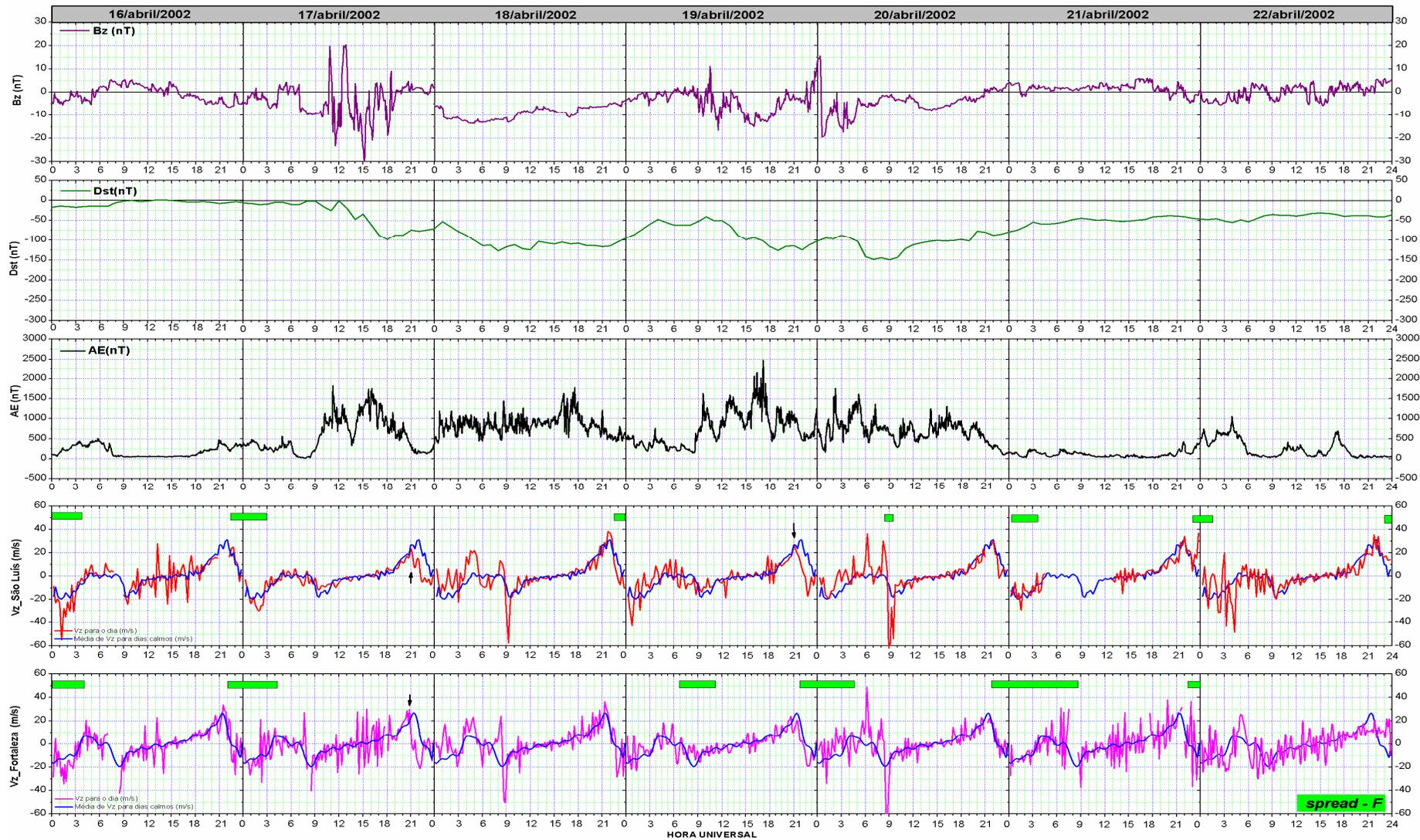


Figura A9 - Tempestade magnética de 17 a 22 de abril de 2002

A5.1 Duração do *spread-F* durante período de 16-22 de abril de 2002

Durante o período analisado, observa-se na Figura A10 que a duração do *spread-F* em São Luís foi bem inferior a Fortaleza. No dia 17/04/2002 com o Vzp adiantado em ~ 1 hora em relação aos dias calmos, observa-se a total inibição do *spread-F*. No dia seguinte, 18/04/2002, nota-se que o mesmo tem início logo em seguida a Vzp sobre São Luís, no entanto isto não ocorre em Fortaleza, na qual o *spread-F* foi ter início somente 11 horas após a ocorrência do Vzp. Similar ao que ocorreu no dia 17/04/2002 em São Luís, observa-se que Vzp apresentou-se ~ 1 hora adiantado em relação aos dias calmos e o *spread-F* foi se desenvolver somente 11 horas após o Vzp.

No dia 20/04/2002, o índice Dst apresenta uma nova queda e isso faz com que o *spread-F* tenha um atraso em seu início de 2,5 horas em São Luís.

No dia 21/04/2002, após praticamente um dia sem atividade auroral, a duração do *spread-F* sobre São Luís e Fortaleza apresenta-se breve, com ~ 3 horas de duração.

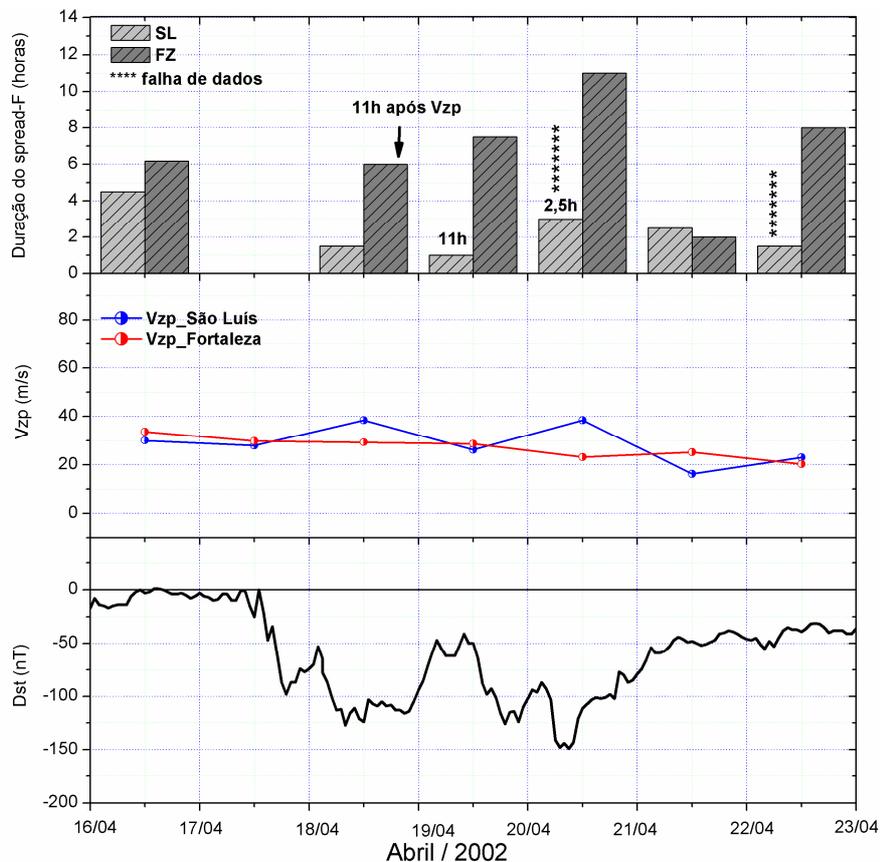


Figura A10 - Duração do *spread-F*, pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 16 à 22 de abril de 2002.

A6. Tempestade Magnética de 07 a 11 de setembro de 2002

Principais características observadas (Figura A11):

- período analisado: 05-11 de setembro de 2002;
- início da tempestade: 07/09/2002 às 1636 UT;
- $dst_m = \sim -177$ nT às 24UT do dia 07/09/2002;
- 11/09/2002: Vzp um pouco adiantado sobre São Luís;
- 09/11/2002: Com a tempestade em sua fase de recuperação e o índice AE apresentando um longo período sem atividade auroral (~34 horas), a velocidade sobre São Luís apresenta-se intensificada. Essa intensificação teve início com às 19 UT atingindo um máximo de ~60m/s às 22 UT. Sobre Fortaleza essa intensificação não é evidente e observa-se que a velocidade atinge um máximo as 21 UT. Entre 18 e 24 UT deste mesmo dia, o índice AE apresenta-se um pouco intensificado. Com Bz para sul, acredita-se que a intensificação tenha ocorrido em virtude de um campo elétrico para leste adicionalmente ao campo elétrico zonal responsável pelo dínamo da camada F.

Obs: A altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para todos os dias analisados na Figura A11.

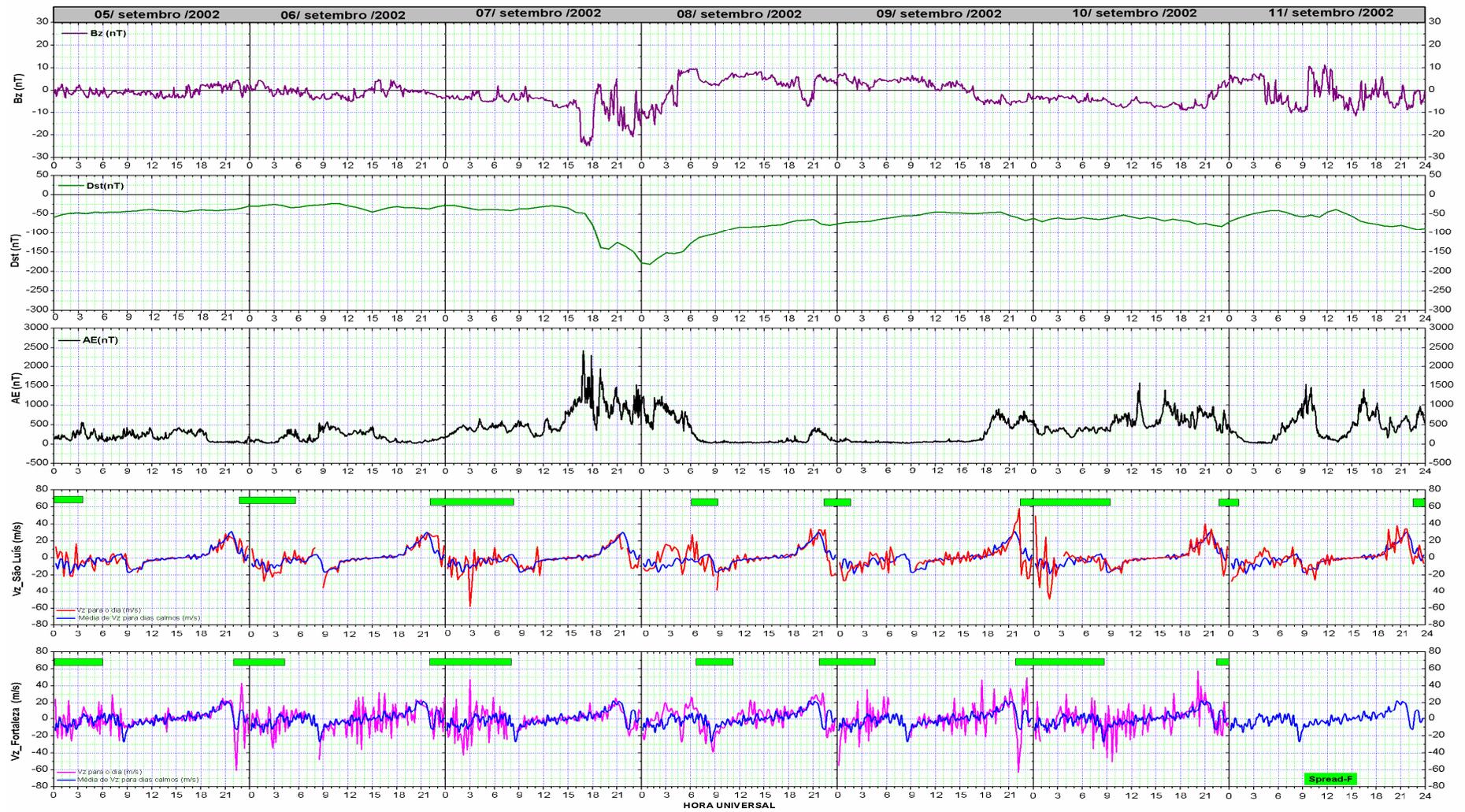


Figura A11 - Tempestade magnética de 07 a 11 de setembro de 2002.

A6.1 Duração do *spread-F* durante período de 05-11 de setembro de 2002

Durante a fase principal e o início da fase de recuperação da tempestade magnética que teve início no dia 07/11/2002, observa-se que a duração do *spread-F* foi menor do que os dois dias anteriores ao início da tempestade (Figura A12).

No dia 07/11/2002 o *spread-F* apresenta um atraso em seu início de ~ 9 horas em São Luís e 12 horas em Fortaleza. Já no dia 09/11/2002, a duração do *spread-F* apresenta-se longa nas duas regiões e isto se deve a uma rápida subida da camada F. Por fim o dia 10/11/2002 o *spread-F* mostrou-se com pouca duração em São Luís e para Fortaleza não há dados o suficiente para afirmar quantas horas o mesmo durou.

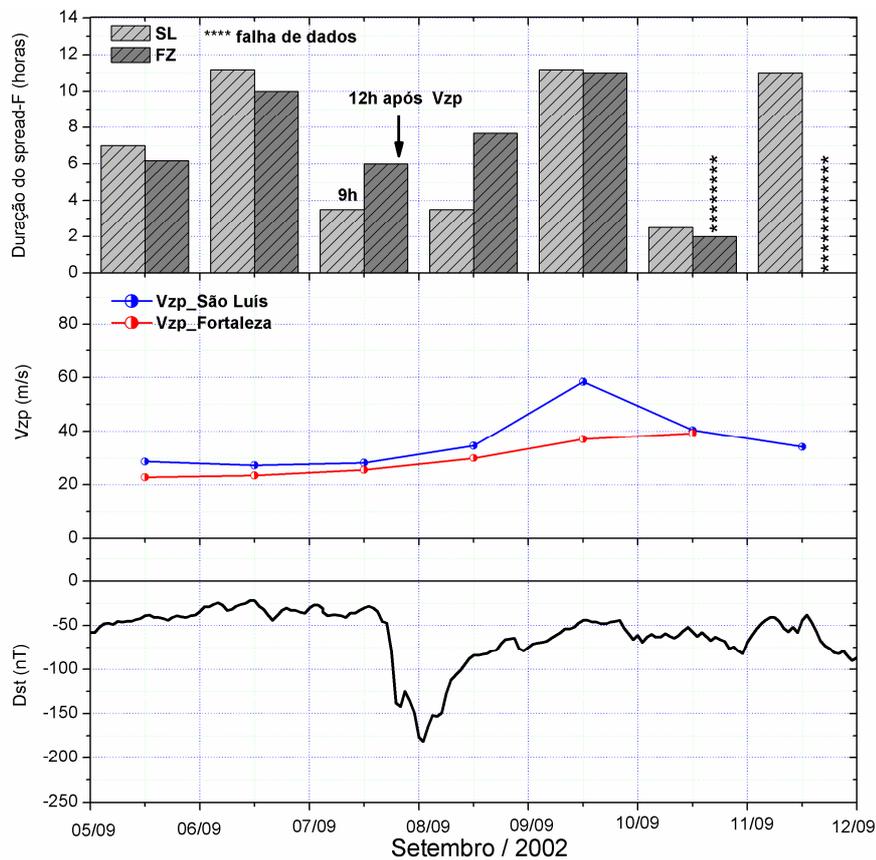


Figura A12 - Duração do *spread-F*, pico de pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 05 a 11 de novembro de 2002.

A7. Tempestade Magnética de 20 a 23 de novembro de 2003

Principais características observadas (Figura A13):

- período analisado: 17-23 de novembro de 2003;
- início da tempestade: 20/11/2003 às 0803 UT;
- $dst_m = \sim -422$ nT às 21UT do dia 20/11/2003;
- 20/11/2003 e 21/11/2003: V_{zp} inibido em São Luís e Fortaleza e no início do dia seguinte (21/11/2003) a camada F apresenta velocidade superior aos dias calmos até ~ 05 UT. Devido à inibição do pico de velocidade e logo após a subida da camada, atribui-se este efeito a um campo elétrico devido ao dínamo perturbado.

Obs: Com exceção do dia 20/11/2003, a altura da camada no horário em que ocorre a intensificação do campo elétrico zonal estava acima de 300 km tanto para São Luís quanto Fortaleza, para os dias analisados na Figura A13. Sendo assim, a velocidade apresentada na figura A13 e A14 para o dia 20/11/2003, na qual a velocidade foi inibida devido à ação do campo elétrico do dínamo perturbado, não corresponde à velocidade real do plasma e precisa ser corrigida devido aos efeitos de recombinação.

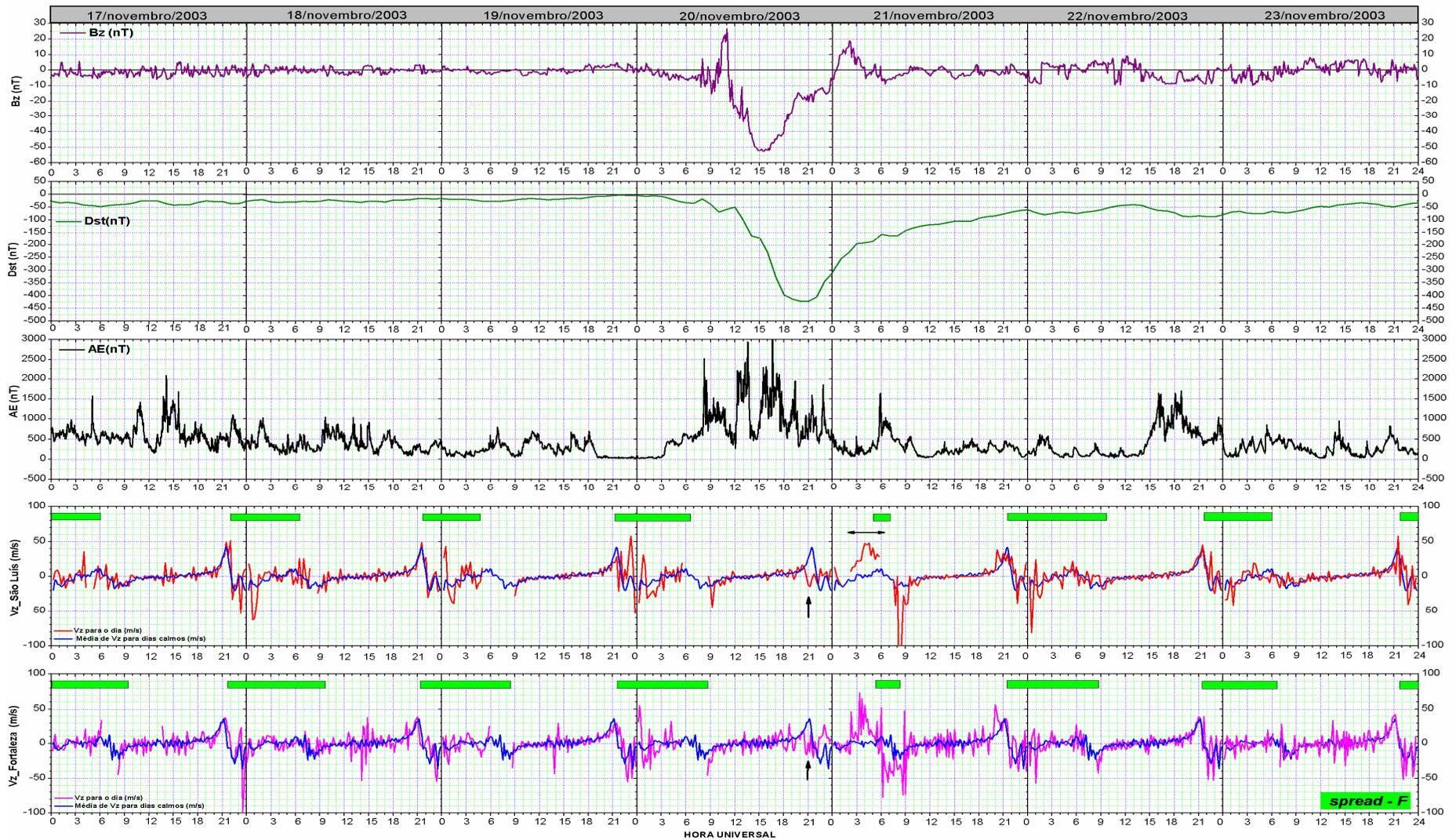


Figura A13 - Tempestade magnética de 20 a 23 de novembro de 2003.

A7.1 Duração do *spread-F* durante período de 17 a 23 de novembro de 2003

Durante o período analisado na Figura A14, nota-se que a duração do *spread-F* para os três dias antes e depois da tempestade, foi superior a 8 horas. No dia 20/11/2003, com a inibição do Vzp tanto em São Luís quanto em Fortaleza, o *spread-F* tem início com um atraso de ~ 8 horas em relação ao Vzp e só começou após a subida da camada devido ao dínamo perturbado.

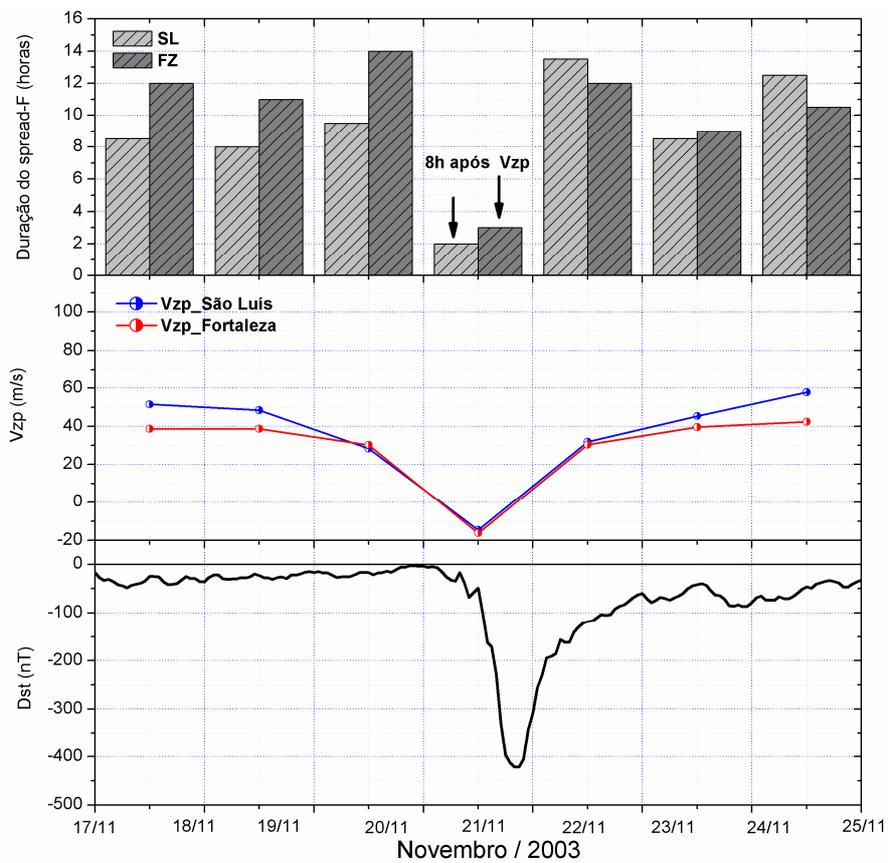
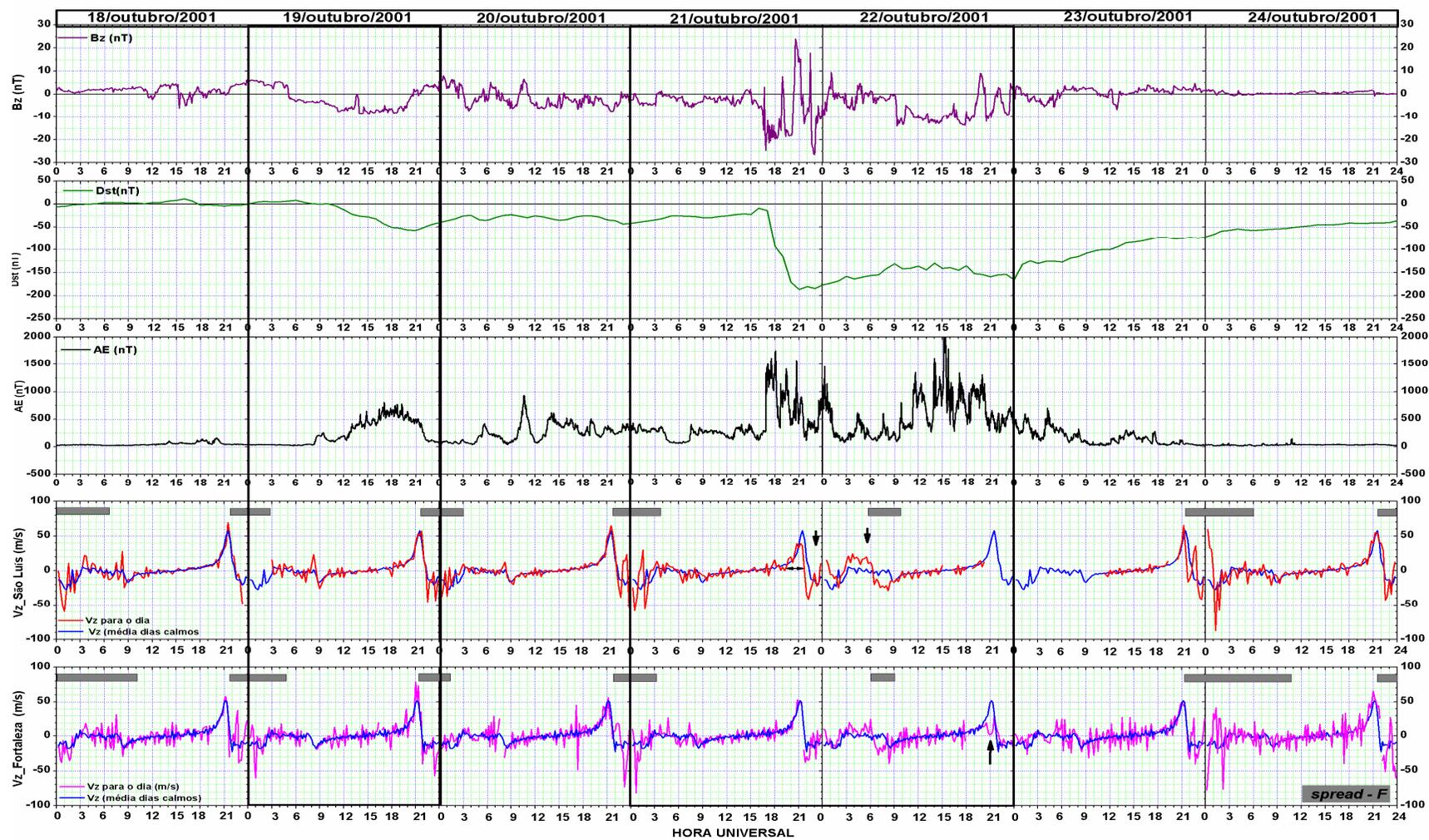


Figura A14 - Duração do *spread-F*, pico pré-reversão da velocidade de deriva e índice Dst para o período de 17 a 24 de novembro de 2003.



FiguraA15 - Tempestade magnética de 21 a 24 de outubro de 2001.

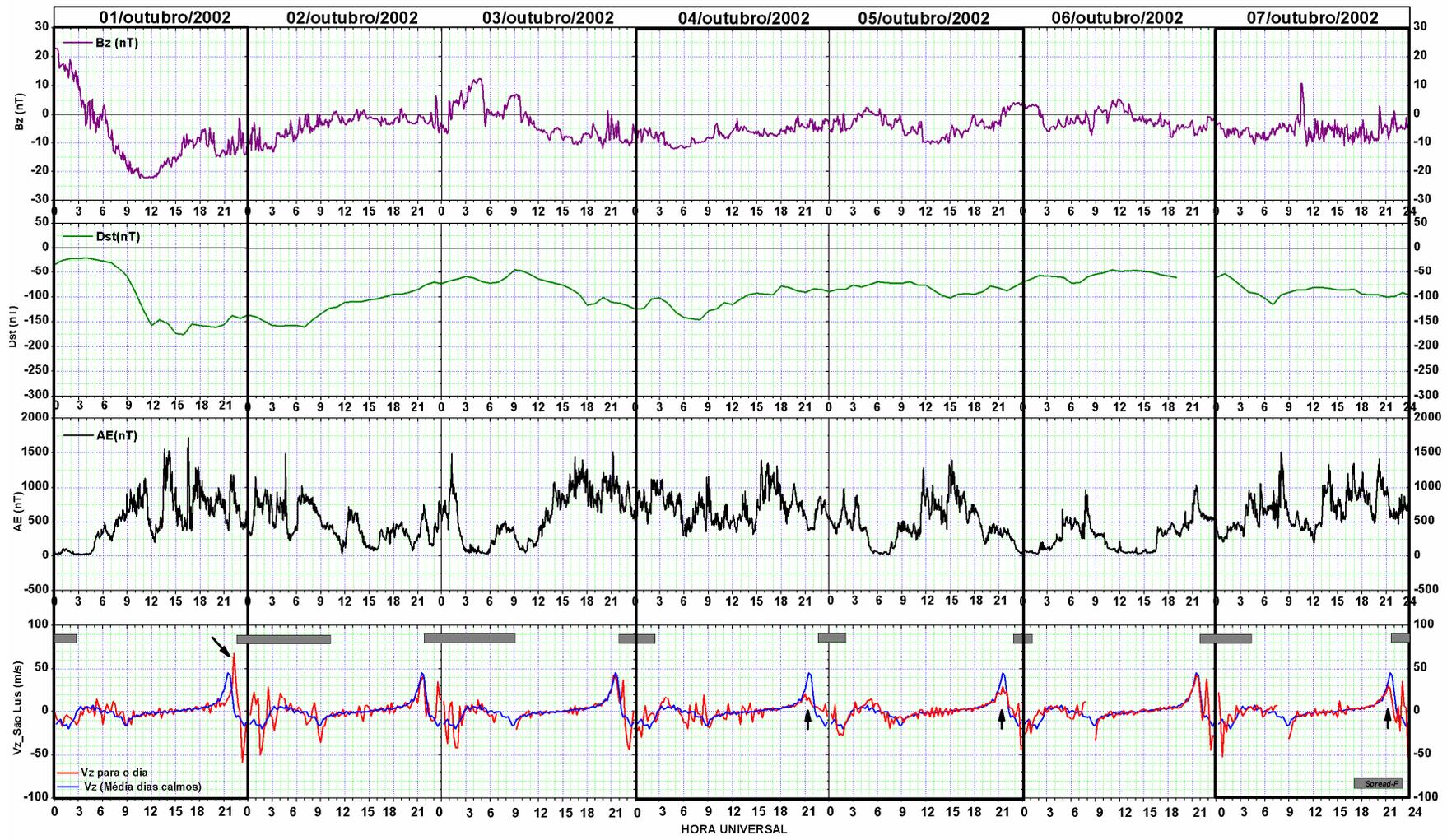


Figura A16 - Tempestade magnética de 01 a 07 de outubro de 2002.

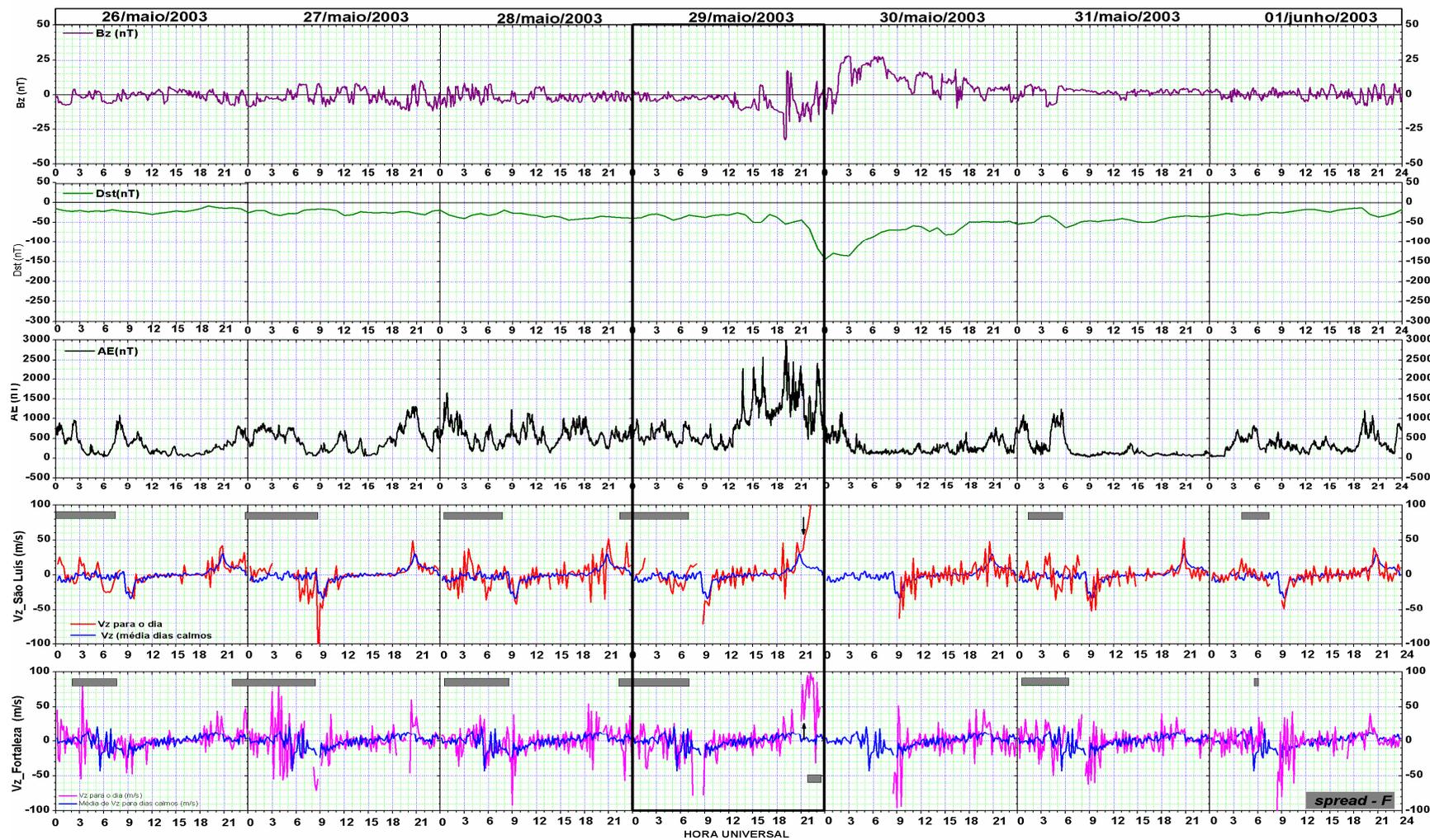


Figura A17 - Tempestade magnética de 29 de maio a 01 de junho de 2003.

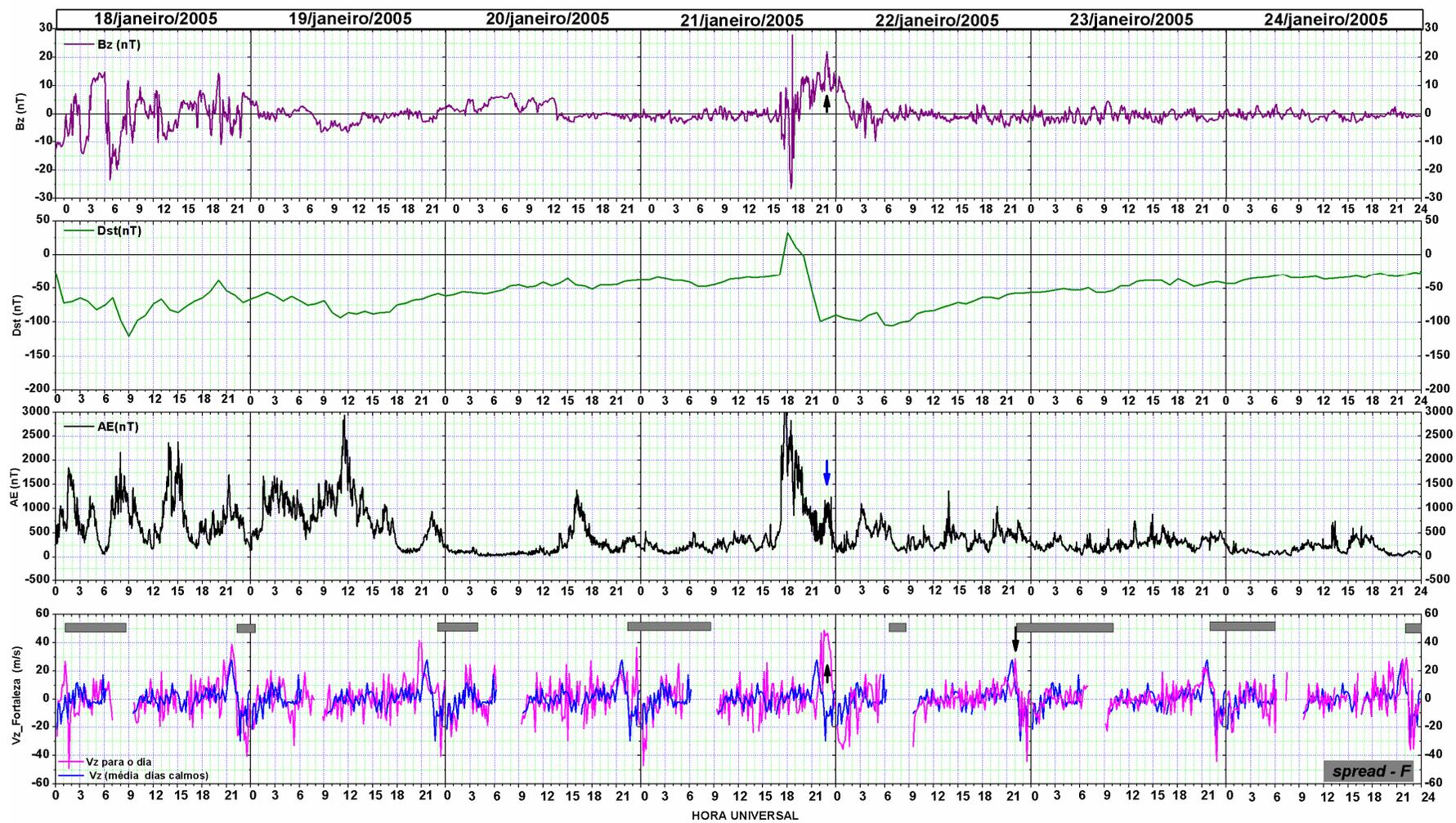


Figura A18 - Tempestade magnética de 21 a 24 de janeiro de 2005..