

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

ALESSANDRO JOSÉ DE ABREU

**EFEITOS DE SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NA
CAMADA F IONOSFÉRICA SOBRE O SETOR BRASILEIRO
ESTUDADOS POR GPS**

São José dos Campos, SP
2007

ALESSANRO JOSÉ DE ABREU

**EFEITOS DE SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NA
CAMADA F IONOSFÉRICA SOBRE O SETOR BRASILEIRO
ESTUDADOS POR GPS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientadores: *Prof. Dr. Yogeshwar Sahai*
Prof. Dr. Fábio Becker Guedes

São José dos Campos, SP
2007

A145e

Abreu, Alessandro José de

Efeitos de supertempestades geomagnéticas na camada F ionosférica sobre o setor brasileiro estudados por GPS / São José dos Campos: Univap, 2007.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento-Universidade do Vale do Paraíba, 2007.

1. Ionosfera 2. Regiões equatorial 3. Regiões tropicais 4. Sistema de posicionamento global - GPS I. Sahai, Yogeshwar, Orientador II. Becker-Guedes, Fábio, Co-orientador III. Título

CDU:52-853

Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação por processo fotocopiadores ou transmissão eletrônica.

Assinatura do aluno:



Data:

16/04/2007

**“EFEITOS DE SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NA CAMADA F IONOSFÉRICA
SOBRE O SETOR BRASILEIRO ESTUDADOS POR GPS”**

Alessandro José de Abreu

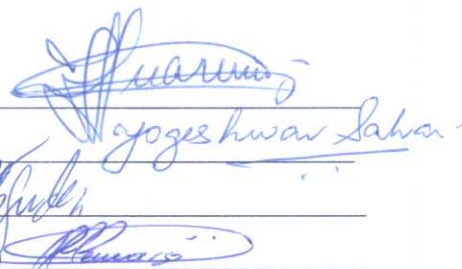
Banca Examinadora:

Prof. Dr. **FERNANDO LUIS GUARNIERI** (UNIVAP)

Prof. Dr. **YOGESHWAR SAHAI** (UNIVAP)

Prof. Dr. **FÁBIO BECKER GUEDES** (UNIVAP)

Prof. Dr. **PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO** (UNESP)



Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco

Diretor do IP&D – UniVap

Dedicatória

Aos meus pais,
José S. de Abreu e Maria J. de Abreu
e a minha noiva,
Geslaine Ereno

Agradecimentos

A Deus...

Aos orientadores Dr. Yogeshwar Sahai e Dr. Fábio Becker Guedes pelos conhecimentos que me foram passados e o empenho com que dedicaram seu tempo na orientação desta pesquisa.

À Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, por ter me possibilitado ingressar no programa de mestrado em Física e Astronomia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, pela cooperação com o fornecimento dos dados das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS, RBMC.

Ao Dr. Paulo Roberto Fagundes pelas valiosas “críticas” ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas Valdir Gil Pillat pelo suporte computacional e Rodolfo de Jesus pelas relevantes discussões ao longo desta pesquisa.

A todos os professores e pesquisadores do grupo de Física e Astronomia da UNIVAP, que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

E também aos meus colegas de curso e a todos aqueles que me apoiaram e me acompanharam por estes anos.

EFEITOS DE SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NA CAMADA F IONOSFÉRICA SOBRE O SETOR BRASILEIRO ESTUDADOS POR GPS

Resumo

Esta pesquisa tem por objetivo estudar o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante eventos com intensos distúrbios geomagnéticos que inclui supertempestades (considerando como critério o $|Dst| > 250$ nT) no período descendente do ciclo solar 23 entre os anos de 2000 e 2005, sendo este um dos assuntos relevantes relacionados ao Tempo Espacial (“Space Weather”). Foram analisados nove eventos com intensos distúrbios geomagnéticos durante este período. Pode-se mencionar que o evento de maio de 2005 é considerado como “High Intensity, Long Duration Continuous AE Activity (HILDCAA)”, que é uma intensa e contínua atividade do índice AE. Para estudar os efeitos dessas supertempestades geomagnéticas sobre a camada F ionosférica no setor brasileiro, foram analisados os dados do sistema de posicionamento global (GPS) de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) e da rede “International GNSS Service (IGS)” com latitude dip cobrindo $1,2^\circ$ N (perto do equador geomagnético) a $20,7^\circ$ S (mais afastadas do equador geomagnético) estando aproximadamente alinhadas ao longo do campo geomagnético, a fim de se obter medidas do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT). Pode-se mencionar que os efeitos observados durante esses eventos foram muito variados nas regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro. Os efeitos observados incluem penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude, TIDs devido ao aquecimento “Joule”, incomum formação de anomalia equatorial ionosférica e geração e supressão de irregularidades ionosféricas equatorial na camada F.

Palavras-chave: Camada F, Tempestade Geomagnética, Tempo Espacial, GPS.

EFFECTS OF THE SUPER GEOMAGNETIC STORMS ON THE IONOSPHERIC F-REGION IN THE BRAZILIAN SECTOR STUDIED BY GPS

Abstract

The objective of this research is to study the behavior of ionospheric F-region in the equatorial and low latitude regions in the Brazilian sector during events with intense geomagnetic disturbances including superstorms (considering the criteria of $|Dst| > 250$ nT indicate superstorms) in the descending period of solar cycle 23 between the years of 2000 and 2005. This is one of the relevant subjects related to Space Weather studies. Nine events were analyzed with intense geomagnetic disturbances including superstorms during this period. It should be mentioned that the event in May 2005 could be considered as a “High Intensity, Long Duration Continuous AE Activity (HILDCAA).” To study the effects of these super geomagnetic storms on the ionospheric F-region in the Brazilian sector, observations from global positioning system (GPS) stations in the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC) and International GNSS Service (IGS), with dip latitudes covering 1.2° N (close to geomagnetic equator) 20.7° S (far from the geomagnetic equator), were analyzed. The stations selected are approximately aligned along the geomagnetic field line. For the present study, we calculated the vertical total electron content (VTEC) and phase fluctuations or rate of change TEC (ROT) during different events. The effects observed during these events were much varied, e.g., prompt penetration the field electric magnetospheric of high latitude, TIDs due to Joule heating in the auroral zone, unusual formation of the equatorial ionospheric anomaly during early morning hours and generation and suppression of the equatorial ionospheric irregularities in F- region.

Keywords: F-Region, Geomagnetic Storm, Space Weather, GPS.

Lista de Figuras

2.1 – Distribuição vertical do número de partículas em relação à altura da composição química atmosférica.....	06
2.2 – Estrutura da atmosfera terrestre.....	09
2.3 – Espectro eletromagnético solar.....	10
2.4 – Radiação sendo absorvida pelo átomo neutro e após ser absorvida é produzido um íon de oxigênio e um elétron livre.....	11
2.5 – Camadas da atmosfera neutra de acordo com suas temperaturas e camadas ionizadas de acordo com suas concentrações de elétrons cm^{-3}	12
3.1 – Ilustração do efeito fonte.....	17
3.2 – Ilustração da teoria linear da instabilidade gravitacional tipo Rayleigh-Taylor.....	19
3.3 – Evolução das bolhas ionosféricas em direção ao leste acompanhando a linha do equador geomagnético.....	20
3.4 – Grupo de manchas solares observadas no Sol.....	22
3.5 – Evolução da atividade solar dentro do ciclo de 11 anos.....	23
3.6 – Campo magnético interplanetário.....	24
3.7 – Ilustração do acoplamento do Sol com o meio interplanetário e a magnetosfera terrestre.....	26
3.8 – Fases características de uma tempestade geomagnética.....	28
3.9 – Rede de observatórios do índice Dst.....	29
4.1 – Ilustração da constelação de 24 satélites do sistema GPS.....	35

4.2 – Mapa com as localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS. O triângulo indica a antena em Terra, o quadrado indica a estação central (MESTRE) e o círculo indica as estações de monitoramento.....	36
4.3 – Esquema mostrando a utilização de receptores GPS em aviões, veículos terrestres e navios.....	37
4.4 – Estrutura básica dos sinais GPS.....	38
4.5 – Ilustração dos principais erros envolvidos no sistema GPS ocasionando a diferença entre o caminho direto (distância geométrica) e o caminho real.....	46
4.6 – Geometria para o atraso do caminho ionosférico.....	53
5.1 – Distribuição geográfica das estações IGS.....	56
5.2 – Distribuição geográfica das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) com destaque em vermelho para as estações utilizadas.....	58
5.3 – Ilustração do satélite ACE.....	62
6.1 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 5 e 8 de abril de 2000.....	68
6.2 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	69
6.3 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	69
6.4 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 14 e 17 de julho de 2000.....	71
6.5 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 14 e 17 de julho de 2000 para as estações de BRAZ, UEPP e PARA.....	72
6.6 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 14 e 17 de julho	

de 2000 para as estações de BRAZ, UEPP e PARA.....	72
6.7 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001.....	74
6.8 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001 para as estações de FORT, BRAZ, UEPP e POAL.....	75
6.9 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001 para as estações de FORT, BRAZ, UEPP e POAL.....	75
6.10 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 10 e 14 de abril de 2001.....	77
6.11 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) para o dia 3 de abril de 2001 para a estação de IMPZ e entre os dias 10 e 14 de abril de 2001 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	78
6.12 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) para o dia 3 de abril de 2001 para a estação de IMPZ e entre os dias 10 e 14 de abril de 2001 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	78
6.13 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001.....	80
6.14 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001 para as estações de CRAT, BRAZ e PARA.....	81
6.15 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001 para as estações de CRAT, BRAZ e PARA.....	81
6.16 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003.....	83
6.17 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 27 e 31 de outubro de	

2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	84
6.18 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	84
6.19 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003.....	86
6.20 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	87
6.21 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.....	87
6.22 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004.....	89
6.23 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.....	90
6.24 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.....	90
6.25 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 14 e 17 de maio de 2005.....	92
6.26 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 14 e 17 de maio de 2005 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.....	93
6.27 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 14 e 17 de maio de 2005 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.....	93

Lista de Tabelas

3.1 – Medida da intensidade da tempestade geomagnética pelo índice Dst.....	30
3.2 – Medida da intensidade da tempestade geomagnética pelo índice Kp.....	32
4.1 – Fontes e principais erros envolvidos nas observáveis GPS.....	45
5.1 – Cidade, Sigla, Latitude e Longitude Geográfica e Latitude dip referente a cada estação utilizada na pesquisa.....	59
5.2 – Histórico de supertempestades geomagnéticas ($ Dst > 250$ nT) para os ciclos solares 21, 22 e 23 e o número de supertempestades em cada ciclo.....	63
6.1 – Média mensal de manchas solares, estações de GPS da rede RBMC/IGS, dias analisados e dia considerado geomagneticamente calmo para cada evento estudado. Também são incluídas as ocorrências de SSC/GSC (dia e hora).....	66
6.2 – Aspectos importantes observados durante as ocorrências de supertempestades geomagnéticas durante os nove eventos analisados.....	94

Lista de abreviaturas e siglas

ACE	Advanced Composition Explorer
AE	Electrojet auroral index
AL	Camadas mais baixas da zona auroral
AS	Anti-spoofing
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AU	Camadas mais altas da zona auroral
BELE	Estação de Belém
BRAZ	Estação de Brasília
C/A code	Código de fácil aquisição
CIGNET	Cooperative International GPS Network
CMEs	Coronal mass ejection
CRAT	Estação de Crato
DGPS	Diferencial GPS
DoD	Department of Defense
Dst	Disturbance storm time index
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EUV	Extremo ultravioleta
ESF	Equatorial spread F
FNMA	Fundo Nacional do Meio Ambiente
FORT	Estação de Fortaleza
GPS	Global Positioning System
GSC	Gradual storm commencement
IAG	International Association of Geodesy
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	International GNSS Service
IMPZ	Estação de Imperatriz
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LT	Tempo local

Kp	Planetary index
NAVSTAR-GPS	Navigation Satellite with time and ranging
NGS	National Geodetic Survey
P code	Código preciso
PARA	Estação de Curitiba
POAL	Estação de Porto Alegre
PPS	Serviços de posicionamento preciso
PRN	Pseudo-random noise
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sinais GPS
RINEX	Receiver Independent Exchange
ROEN	Rádio Observatório Espacial do Nordeste
ROT	Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC
S/A	Selective availability
SPS	Serviços de posicionamento padrão
SP3	Standard Product # 3
SSC	Sudden storm commencement
TEC	Total electron content
TECU	Total electron content unit
TIDs	Travelling Ionospheric Disturbances
UEPP	Estação de Presidente Prudente
UT	Tempo universal
VHF	Very high frequency
VTEC	Vertical total electron content

Lista de símbolos

Latinos

B	Campo magnético interplanetário total, nT
B _Z	Componente do campo magnético interplanetário, nT
B	Vetor campo geomagnético
c	Velocidade da luz, $3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
E	Vetor campo elétrico
e _l	Ângulo de elevação do satélite
f	Frequência nominal, Hz
f^S	Frequência do sinal gerado pelo oscilador do satélite
f_R	Frequência do sinal gerado pelo oscilador do receptor
f ₁	Frequência do sinal na portadora L ₁
f ₂	Frequência do sinal na portadora L ₂
g	Aceleração da gravidade terrestre, m s^{-2}
g	Vetor força de aceleração gravitacional
G2	Tipo espectral do Sol
H	Componente horizontal do campo geomagnético
H _m	Altura média da ionosfera
I	Ângulo de inclinação magnética
I_{fR}^S	Refração ionosférica para a fase da onda portadora
I_{gR}^S	Refração ionosférica para o grupo
k	Constante de Boltzmann, $1,381 \times 10^{-23} \text{ Joule} \cdot \text{s}$
L1	Ponto Lagrangeano
L ₁	Onda portadora do sinal GPS, MHz
L ₂	Onda portadora do sinal GPS, MHz
m	Massa molecular, kg
n	Densidade numérica dos constituintes atmosféricos, m^{-3}

N	Vetor densidade eletrônica
N	Ambigüidade na observável fase da onda portadora
n_e	Densidade eletrônica, el m^{-3}
n_f	Índice de refração para velocidade de fase
n_g	Índice de refração para velocidade de grupo
N_p	Densidade de prótons do vento solar, prótons cm^{-3}
p	Pressão atmosférica, Kg m^{-2}
R	Antena receptora
R_m	Raio médio da Terra
S	Satélite
T	Temperatura absoluta, K
t	Tempo, s
t^S	Instante de emissão do sinal
t_R	Instante de recepção do sinal
U_m	Componente meridional do total dos ventos no meridiano geomagnético
U_n	Vetor do vento neutro
U_v	Componente vertical do total dos ventos no meridiano geomagnético
V_p	Velocidade do vento solar, km s^{-1}
z'	Ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico

Gregos

g_{RT}	Taxa de crescimento da instabilidade ionosférica
d^S	Desvios do relógio do satélite em relação ao tempo GPS
d_R	Desvios do relógio do receptor em relação ao tempo GPS
e_f	Ruído do receptor para a fase da onda portadora
$e_{\mathfrak{R}}$	Ruído do receptor para pseudodistância
l	Comprimento de onda
n_{in}	Frequência de colisões entre íons e partículas neutras
$?$	Densidade de massa da atmosfera neutra

r	Distância geométrica entre satélite e receptor
f	Fase da onda portadora
f_0^S	Fase inicial que contém os desvios do relógio em relação ao tempo GPS
f_{0R}	Fase inicial que contém os desvios do receptor em relação ao tempo GPS
f_R^S	Fase da onda portadora em ciclos
$f^S(t)$	Diferença entre a fase do sinal recebido do satélite
$f_R(t)$	Diferença entre a fase do sinal gerado no receptor
d_f	Soma do erro sistemático interfrequência do satélite e do receptor para a fase
d_f^S	Atrasos das portadoras no hardware do satélite para a fase
d_f^R	Atrasos das portadoras no hardware do receptor para a fase
$d_{\mathfrak{R}}$	Soma do erro sistemático interfrequência do satélite e do receptor para a pseudodistância
$d_{\mathfrak{R}}^S$	Atrasos das portadoras no hardware do satélite para a pseudodistância
$d_{\mathfrak{R}}^R$	Atrasos das portadoras no hardware do receptor para a pseudodistância
m_f	Efeito do multicaminhamento para a fase da onda portadora
$m_{\mathfrak{R}}$	Efeito do multicaminhamento para pseudodistância
Δ^{iono}	Efeitos da refração ionosférica para pseudodistância \mathfrak{R} e para a fase f
Δ^{trop}	Efeitos da refração troposférica para a pseudodistância \mathfrak{R} e para a fase f

Símbolos Especiais

∇	Operador nabla
\sum	Somatório
\mathfrak{R}	Pseudodistância
\mathfrak{R}_1	Pseudodistância para L_1 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC
\mathfrak{R}_2	Pseudodistância para L_2 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC
\mathfrak{S}_1	Fase da onda portadora para L_1 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC
\mathfrak{S}_2	Fase da onda portadora para L_2 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 2 – ATMOSFERA TERRESTRE.....	05
2.1 – Formação da Atmosfera Terrestre.....	05
2.2 – Atmosfera Neutra.....	06
2.3 – Atmosfera Ionizada.....	09
CAPÍTULO 3 – A IONOSFERA EQUATORIAL E DE BAIXA LATITUDE E AS SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS.....	15
3.1 – Ionosfera Equatorial e de Baixa Latitude.....	15
3.1.1 – Irregularidades Ionosféricas.....	17
3.2 – Tempo Espacial (“Space Weather”).....	21
3.3 – O Tempo Espacial e as Tempestades Geomagnéticas.....	21
3.3.1 – Características das Tempestades Geomagnéticas.....	26
3.4 – Índice Dst.....	28
3.5 – Índice Kp.....	30
3.6 – Índice AE.....	31
3.7 – Efeitos das Tempestades Geomagnéticas sobre Regiões Equatorial e de Baixa Latitude.....	32
3.8 – Efeitos das Tempestades Geomagnéticas sobre a Terra e Espaço.....	33
CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (“GLOBAL POSITIONING SYSTEM – GPS”).....	34
4.1 – Introdução ao GPS.....	34
4.1.1 – Segmento Espacial.....	35
4.1.2 – Segmento de Controle.....	36

4.1.3 – Segmento de Usuário.....	37
4.2 – Características dos Sinais emitidos pelos Satélites GPS.....	38
4.3 – Aplicações do GPS.....	40
4.4 – Observáveis GPS.....	40
4.4.1 – Pseudodistância.....	41
4.4.2 – Fase da Onda Portadora.....	42
4.5 – Erros Envolvidos nas Observáveis.....	45
4.5.1 – Refração Ionosférica.....	46
4.6 – Cálculo do “Total Electron Content (TEC)” – Conteúdo Total de Elétrons.....	48
4.7 – Cálculo do “Vertical Total Electron Content (VTEC)” – Conteúdo Total de Elétrons na Vertical.....	52
4.8 – Flutuações de Fase ou Taxas de Variações do TEC (ROT).....	53
CAPÍTULO 5 – DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	55
5.1 – Rede Global IGS.....	55
5.2 – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC).....	56
5.3 – Formato RINEX.....	59
5.4 – Formato SP3.....	60
5.5 – Satélite ACE.....	61
5.6 – Período de Dados Analisados.....	62
5.7 – Ferramentas Computacionais Utilizadas.....	63
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
6.1 – Definição dos Padrões de Dados Utilizados.....	65
6.2 – Supertempestade ocorrida em Abril de 2000 (evento 1).....	68
6.3 – Supertempestade ocorrida em Julho de 2000 (evento 2).....	71
6.4 – Supertempestade ocorrida em Março de 2001 (evento 3).....	74
6.5 – Supertempestade ocorrida em Abril de 2001 (evento 4).....	77
6.6 – Supertempestade ocorrida em Novembro de 2001 (evento 5).....	80

6.7 – Supertempestade ocorrida em Outubro de 2003 (evento 6).....	82
6.8 – Supertempestade ocorrida em Novembro de 2003 (evento 7).....	86
6.9 – Supertempestade ocorrida em Novembro de 2004 (evento 8).....	88
6.10 – Supertempestade ocorrida em Maio de 2005 (evento 9).....	92
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
ANEXO A – ARQUIVOS DE DADOS NOS FORMATOS RINEX E SP3.....	107
A.1 – Formato RINEX.....	107
A.2 – Formato SP3.....	109

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, estudos relacionados ao Tempo Espacial (“Space Weather”) atraiu muito os interesses de investigadores da área de física espacial. A fonte primária para os eventos do Tempo Espacial são as explosões solares ou tempestades solares (ex., erupções solares (“solar flares”), ejeções de massa coronal (“coronal mass ejection – CMEs”), etc.). Como foi apontado por Kamide (2006), o objetivo principal da pesquisa do Tempo Espacial é traçar o caminho da energia do Sol (perturbado) até a alta atmosfera terrestre. Jansen e Pirjola (2004) mencionaram que este caminho começando no Sol e resultando em tempestades geomagnéticas (intensas ou fracas dependendo da componente norte-sul do campo magnético interplanetário) observadas na superfície da Terra inclui processos complexos e seu entendimento será de grande valor para a humanidade. As perturbações ionosféricas ou tempestades ionosféricas na camada F estão relacionadas às tempestades geomagnéticas. Como é citado em Buonsanto (1999), os eventos relacionados ao Tempo Espacial causam diversos efeitos significativos em sistemas tecnológicos na Terra e espaço incluindo os efeitos sobre a rede de transmissão de energia elétrica gerando os “black-out” (ex., intenso “black-out” em Quebec, no Canadá, durante forte tempestade geomagnética em março de 1989), indução de correntes elétricas sobre gasodutos e oleodutos, danos em satélites causados por partículas de alta energia, aumento no risco de exposição por radiação aos humanos no espaço, mudanças nos arrastos atmosféricos em satélites, erros nos sistemas de posicionamento global (GPS), perdas de comunicação em alta frequência, etc. Buonsanto (1999) cita também que a ionosfera terrestre, um componente ionizado da alta atmosfera terrestre, é influenciada fortemente pela variação solar e entrada de energia na magnetosfera. A densidade eletrônica n_e

na camada F da ionosfera a uma determinada altitude depende do fluxo de radiação solar na faixa do extremo ultravioleta (EUV), da composição neutra e dos efeitos dinâmicos dos ventos neutros e campos elétricos. Durante as tempestades geomagnéticas, o distúrbio do vento solar comprime a magnetosfera terrestre e intensos campos elétricos são traçados ao longo das linhas do campo geomagnético para a alta latitude ionosférica (BUONSANTO, 1999). Como foi mencionado por Abdu (1997) e Tsurutani et al., (2004), durante tempestades geomagnéticas o transporte de energia da alta latitude ionosférica para regiões equatorial e de baixa latitude é realizado pela penetração pontual de campos elétricos perturbados de origem magnetosférica oriundos da região de alta latitude e pelo aquecimento da alta atmosfera em alta latitude em consequência a precipitação de partículas energéticas (aquecimento “Joule”).

O principal objetivo desta pesquisa consiste em estudar o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante as ocorrências de supertempestades geomagnéticas utilizando os dados do sistema de posicionamento global (“Global Positioning System – GPS”). Foi considerado como critério o índice de atividade geomagnética $|Dst| > 250$ nT para ocorrências de supertempestades. Entre o período de 1976 e 2006 (ciclos solares 21, 22 e 23) verificou-se no período descendente do ciclo solar 23 (2000-2006) o maior número de supertempestades nos anos de 2000 a 2005. Também durante os anos de 2000 a 2005 a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC), operada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a rede “International GNSS Service (IGS)”, estavam em pleno funcionamento fornecendo bons conjuntos de dados para esta pesquisa. Espera-se assim, estudar os efeitos das supertempestades sobre a camada F durante este período no setor brasileiro. Para esta análise foram obtidos os parâmetros interplanetários (campo magnético interplanetário total (B),

componente vertical do campo magnético interplanetário (B_z), densidade de prótons do vento solar (N_p) e velocidade do vento solar (V_p) do satélite ACE (“Advanced Composition Explorer”). Através de dados de GPS no formato RINEX (“Receiver Independent Exchange”) fornecidos pelo IBGE de várias estações da RBMC/IGS, foram calculados o conteúdo total de elétrons na vertical (“Vertical Total Electron Content – VTEC”) e as flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (“Phase Fluctuation” ou “Rate of Change TEC – ROT”) (AARONS et al., 1996; MENDILLO et al., 2000). As fortes variações em ROT indicam a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala na camada F.

O GPS é um sistema de radionavegação baseado em conjuntos de satélites e faz com que qualquer usuário em qualquer lugar da superfície terrestre consiga determinar suas posições tridimensionais (latitude, longitude e altitude). Os sinais transmitidos pelos satélites são gerados a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz e transmitidos nas frequências de 1575,42 MHz e 1227,60 MHz e a combinação destes sinais permitem obter a medida do TEC. O TEC no qual se derivam o VTEC e o ROT, é um parâmetro utilizado para estudo da ionosfera por ser altamente influenciado pelo ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética (MATSUOKA et al., 2004).

O Capítulo 2 apresenta uma breve descrição sobre a atmosfera terrestre (distribuição vertical da composição química e gradiente vertical de temperatura). Descreve também a parte ionizada da alta atmosfera denominada ionosfera. São descritos também os processos de formação da camada ionizada e suas principais características físicas.

O Capítulo 3 apresenta uma breve descrição da ionosfera equatorial e de baixa latitude abrangendo as formações da anomalia equatorial ionosférica e as irregularidades ionosféricas de grande escala (bolhas ionosféricas). Apresenta a importância do estudo do Tempo Espacial (“Space Weather”) e os fenômenos do Sol como origens das tempestades

geomagnéticas, incluindo suas fases e respectivos comportamentos. Apresenta também os índices de variações geomagnéticas (Dst, Kp e AE) e os principais efeitos causados por tempestades geomagnéticas.

O Capítulo 4 aborda aspectos essenciais relacionados ao sistema GPS. São discutidas as características dos sinais transmitidos, aplicações e principais observáveis. São citados as fontes e os principais erros envolvidos nas observáveis GPS. É mostrado também o cálculo para determinar o TEC, VTEC e o ROT.

O Capítulo 5 descreve a Rede Global de GPS (“International GNSS Service – IGS”) e a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) de onde foram obtidos os dados desta pesquisa. Também são descritos o formato do arquivo de dados RINEX e arquivo de órbita SP3. A resolução temporal e o sistema de coordenadas dos parâmetros interplanetários obtidos do satélite ACE também é apresentado. E por último é explicado o porquê da seleção dos dados no período compreendido entre os anos de 2000 e 2005 e as ferramentas computacionais utilizadas para a análise.

O Capítulo 6 apresenta a variação temporal dos parâmetros interplanetários, VTEC e ROT durante os vários eventos de supertempestades geomagnéticas pesquisados. São discutidos os resultados referentes a cada supertempestade.

O Capítulo 7 apresenta as principais conclusões desta pesquisa.

Por fim, o Anexo A apresenta um trecho dos arquivos de dados no formato RINEX (arquivo de observações) e SP3 (arquivo IGR).

CAPÍTULO 2 - ATMOSFERA TERRESTRE

Este capítulo apresenta uma breve descrição sobre a atmosfera terrestre (distribuição vertical da composição química e gradiente vertical de temperatura). Descreve também a parte ionizada da alta atmosfera denominada ionosfera. São descritos também os processos de formação da camada ionizada e suas principais características físicas.

2.1 Formação da Atmosfera Terrestre

A Terra formou-se há cerca de cinco bilhões de anos e acredita-se que teve origem pela liberação de gases de seu interior, sendo os mais abundantes, o gás carbônico CO₂, água H₂O e hidrogênio H₂ liberados fartamente por erupções vulcânicas. Na pré-existência da atmosfera terrestre, o oxigênio era produzido pela dissociação do vapor d'água pela radiação solar. A produção de oxigênio só ficou constante com o surgimento das algas, em que pequenos organismos sintetizam suas moléculas orgânicas usando CO₂ e H₂O no processo da fotossíntese, que libera oxigênio (KIRCHHOFF, 1991).

O perfil da atmosfera pode ser descrito utilizando a equação de estado para gases ideais 2.1:

$$p = \frac{\mathbf{r}}{m} kT = nkT \quad (2.1)$$

onde p , \mathbf{r} , m e n são usados para denotar pressão, densidade, massa e concentração (densidade numérica) respectivamente. T denota a temperatura absoluta e k é a constante de

Boltzmann. Pode-se mencionar que a baixa e média atmosfera terrestre é neutra e a alta atmosfera terrestre é constituída por uma parte ionizada denominada ionosfera.

2.2 Atmosfera Neutra

Em relação à atmosfera neutra podemos descrever seu estado em distribuição vertical da composição química e no gradiente vertical de temperatura. A distribuição vertical da composição química está dividida nas seguintes regiões: homosfera, heterosfera e exosfera como mostra a Figura 2.1.

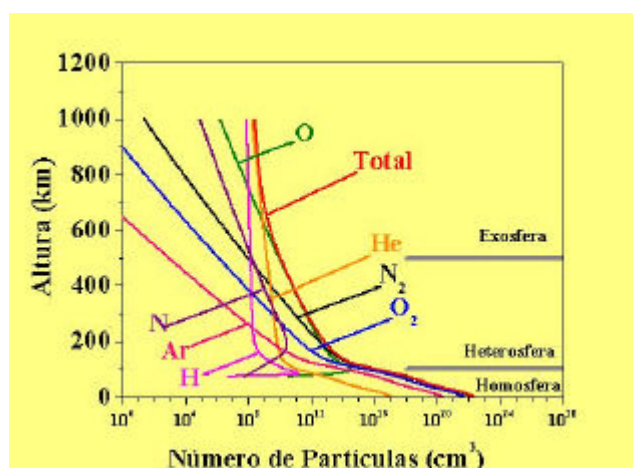


Figura 2.1 – Distribuição vertical do número de partículas em relação à altura da composição química atmosférica.

FONTE: MSIS-E-90 (1990).

A homosfera é uma região que se estende até uma altura de aproximadamente 100 km, a proporção volumétrica é de 78% de nitrogênio N₂, 21% de oxigênio O₂, sendo o restante argônio Ar, gás carbônico CO₂, gases nobres e outros, em proporções ainda menores.

Até esta altura a mistura dos gases é praticamente constante, isto é, a cada altura a proporção de mistura de certo gás em relação ao todo se mantém (KIRCHHOFF, 1991).

A heterosfera é a região compreendida entre 100 km a aproximadamente 500 km de altitude. Os maiores constituintes da heterosfera são o hidrogênio atômico H(1), hélio He(4), oxigênio atômico O(16), nitrogênio N₂(28), oxigênio O₂(32) e argônio Ar(39) distribuídos e ordenados conforme seu peso molecular. Os gases mais pesados (Ar, O₂, N₂) são dominantes nas altitudes inferiores da heterosfera, enquanto que nos níveis de altitudes superiores, os gases mais leves predominam, em especial o H (TASCIONE, 1994).

A exosfera estende-se acima de 500 km até aproximadamente 1000 km de altitude, região onde é improvável a ocorrência de colisões entre moléculas ou átomos por estes se movimentarem em trajetórias balísticas sob a influência da gravidade. É a região onde há uma perda constante de partículas para o meio interplanetário.

Em relação ao gradiente vertical de temperatura, a atmosfera neutra está dividida em troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera.

A troposfera é a camada atmosférica que se estende da superfície da Terra até a base da estratosfera, sua temperatura diminui com a altitude e varia, aproximadamente, 280 K por km até um mínimo de 230 K na tropopausa (camada intermediária entre a troposfera e a estratosfera onde a temperatura é mínima). Esta camada responde por 80% do peso atmosférico, sua espessura média é de aproximadamente 12 km, atingindo uma altitude de pouco mais de 15 km no equador e reduzindo-se para 7 km nos pólos.

Na estratosfera, ao contrário da troposfera, ocorre um aumento da temperatura com a altitude podendo chegar a aproximadamente 263 K e caracteriza-se pelos movimentos de ar em sentido horizontal e por concentrar a maior parte de ozônio da atmosfera terrestre, sua altura máxima está compreendida entre 40 km e 50 km aproximadamente. Apresenta

pequena concentração de vapor d'água e temperatura constante até a região limite, denominada estratopausa (limite entre estratosfera e mesosfera).

A mesosfera possui uma temperatura que tende a diminuir com a altitude em aproximadamente 276 K por km podendo chegar até 180 K em seu topo. Esse resfriamento é devido à relaxação vibracional das moléculas CO_2 . A mesosfera esfria por emissão espontânea de fótons em seu estado vibracional de CO_2 (TASCIONE, 1994). Está situada entre a estratopausa em sua parte inferior e mesopausa (região da atmosfera terrestre que determina o limite entre atmosfera com massa molecular constante de outra onde predomina a difusão molecular) em sua parte superior, podendo atingir até a 80 km de altitude.

A termosfera está localizada acima da mesopausa, camada da atmosfera que vai desde 95 km até aproximadamente 500 km de altitude em relação à superfície do planeta Terra, sua temperatura aumenta com a altitude atingindo aproximadamente 1000 K (SCHUNK e NAGY, 2000). A densidade das moléculas é pequena e se movem em trajetórias aleatórias, tal que, raramente se chocam. O aquecimento é devido à absorção de radiação solar no extremo ultravioleta (EUV). A radiação solar no EUV é particularmente eficiente para a fotodissociação do oxigênio O_2 em oxigênio atômico O. O oxigênio atômico O recombina muito lentamente acima de 90 km, o que torna a parte superior da termosfera rica deste gás (TASCIONE, 1994). A formação das camadas ionizadas se dá através de átomos de O_2 e N_2 reagindo e dissociando-se em íons. Estas camadas ionizadas podem variar conforme alguns parâmetros importantes como hora do dia, variação sazonal e ventos termosféricos.

De forma simplificada, é apresentada na Figura 2.2 uma representação da estrutura da atmosfera terrestre e a variação da temperatura em função das condições solares mínimas e máximas.

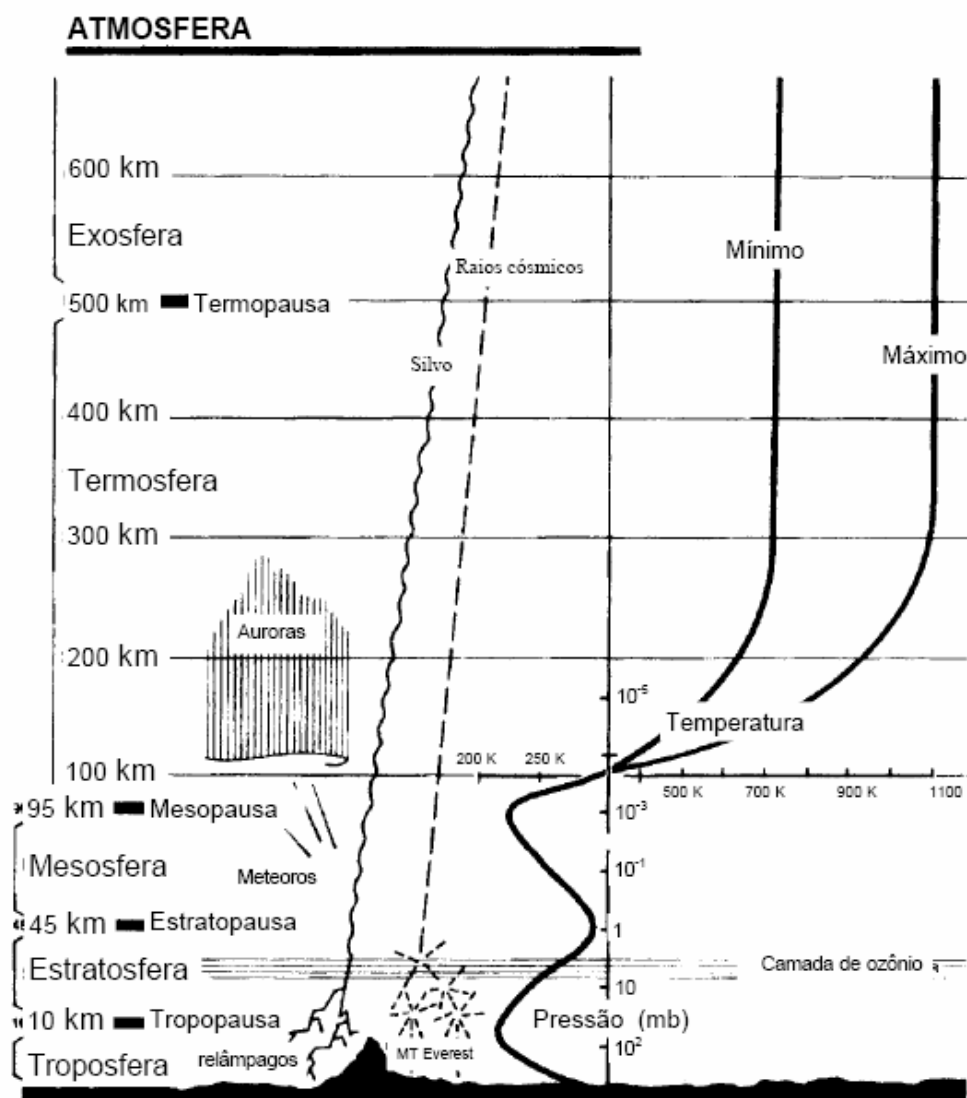


Figura 2.2 – Estrutura da atmosfera terrestre.
FONTE: adaptada de Schunk e Nagy (2000).

2.3 Atmosfera Ionizada

A parte ionizada da atmosfera terrestre está dividida em ionosfera e magnetosfera, sendo esta última, uma região em que o campo geomagnético domina o movimento do plasma, constituído principalmente de prótons e elétrons (KIRCHHOFF, 1991).

O termo ionosfera foi proposto por R. A. Watson-Watt em uma carta enviada ao “United Kingdom Radio Research Board” em 8 de novembro de 1926 (RISHBETH; GARRIOT, 1969). A ionosfera está situada a partir de aproximadamente 50 km de altitude e se estende até uma altitude de aproximadamente 1000 km da superfície da Terra, sendo formada por partículas livres carregadas, ou seja, por partículas ionizadas. As camadas de partículas ionizadas são resultantes da ação da radiação solar, devido à absorção da radiação na faixa do extremo ultravioleta (EUV) e raios X do espectro eletromagnético (Figura 2.3) pelas partículas neutras. Esse processo de formação das camadas ionizadas se dá através de dois importantes fatores: a fotoionização e a recombinação. O processo de absorção da radiação solar pela partícula neutra (oxigênio) pode ser mais bem compreendido pela Figura 2.4.

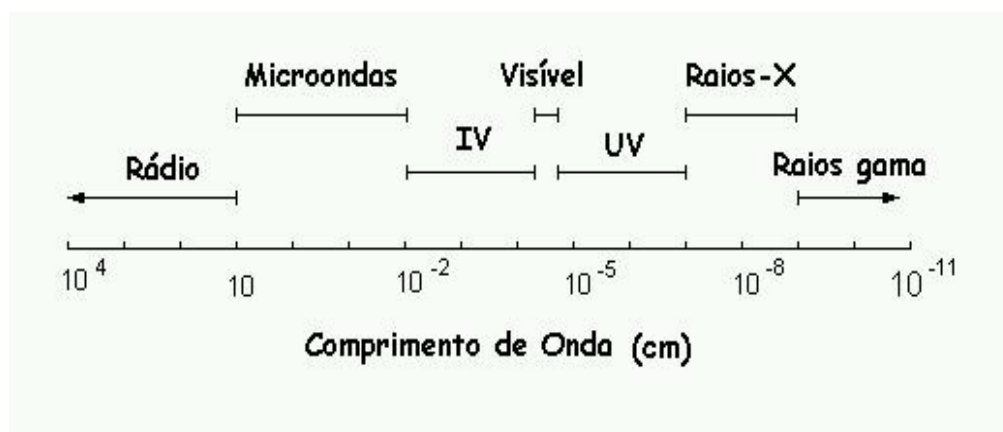


Figura 2.3 – Espectro eletromagnético solar.

FONTE: Masco (2001).



Figura 2.4 – Radiação sendo absorvida pelo átomo neutro e após ser absorvida é produzido um íon de oxigênio e um elétron livre.

FONTE: adaptada de Haarp (2006).

A fotoionização consiste na liberação de íons carregados positivamente e elétrons livres. O processo inverso consiste no reagrupamento de íons e elétrons formando átomos e moléculas. No processo de recombinação ocorre o efeito denominado junção eletrônica, em que os elétrons livres podem se combinar com átomos neutros produzindo íons carregados negativamente (McNAMARA, 1991).

A ionosfera pode ser classificada conforme a variação vertical da densidade eletrônica n_e em unidades de el m^{-3} e de acordo com esses níveis de densidade eletrônica, pode ser dividida em várias camadas ou regiões como mostra a Figura 2.5, que são denominadas por camadas D, E e F, cujas divisões não são tão distintas, ou seja, cada região contém frequentemente diversas camadas. A camada F, durante o dia, pode se dividir em duas ou mais camadas, sendo as duas de interesse denominadas F_1 e F_2 .

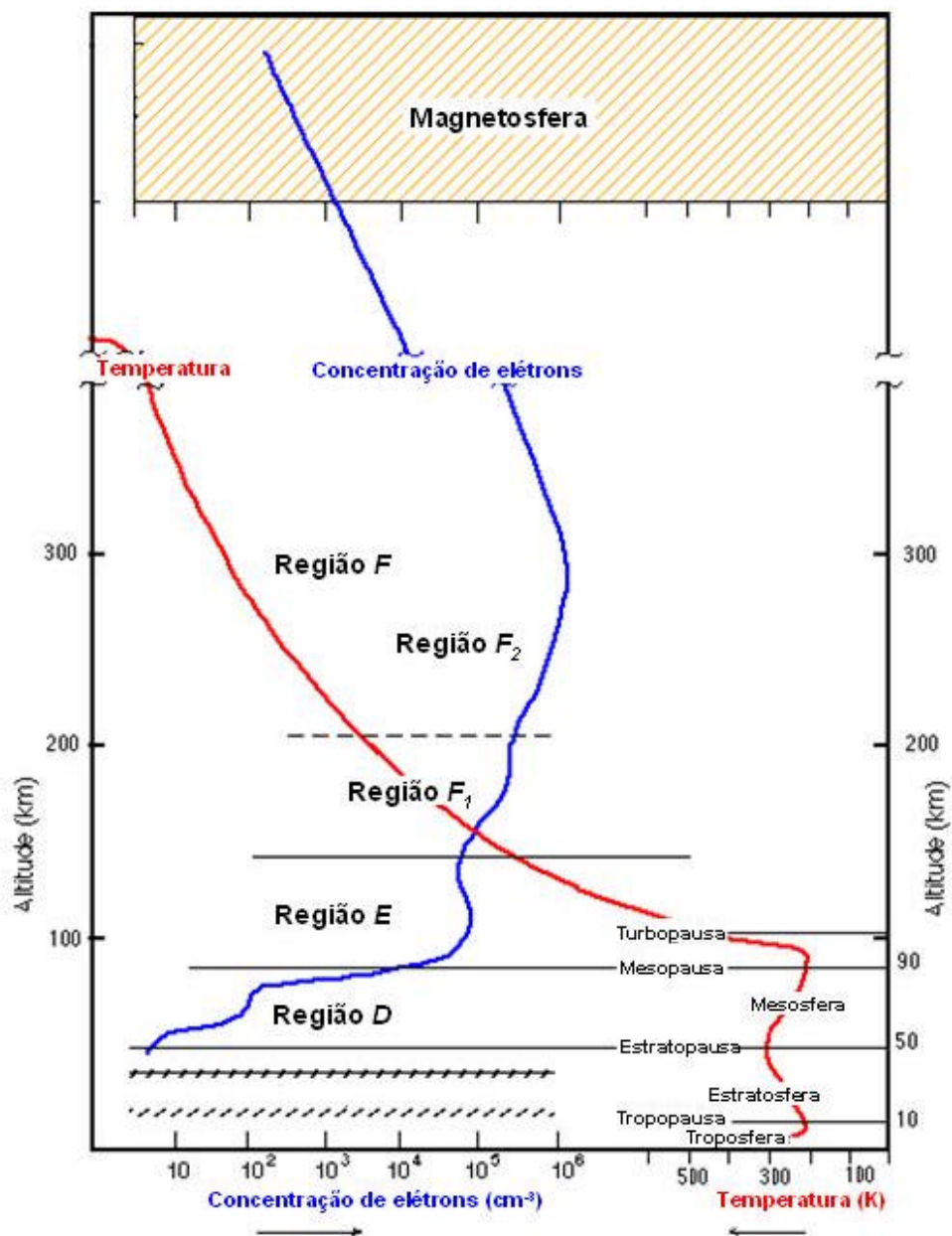


Figura 2.5 – Camadas da atmosfera neutra de acordo com suas temperaturas e camadas ionizadas de acordo com suas concentrações de elétrons cm^{-3} .

FONTE: adaptada de Ionospheric Physics (2006).

A camada D está presente entre aproximadamente 50 km e 90 km de altitude. Esta camada é formada pela radiação na faixa de raio X, Lyman α (linha de hidrogênio) e raios cósmicos (ionização inferior a 60 km). Os raios cósmicos predominam no período de atividade

mínima solar. A camada D é afetada pelos raios cósmicos independente de ser dia ou noite. Durante a noite os elétrons podem se acoplar aos átomos e moléculas formando íons negativos que reagem causando o desaparecimento da camada. Em consequência disto, entre 70 km e 90 km de altitude os elétrons não estão presentes durante a noite, porém, durante o dia sua presença causa uma variação distinta na densidade de elétrons. O valor típico na densidade de elétrons ao meio dia local, em médias latitudes, varia entre $6,1 \times 10^8$ el m^{-3} e $13,1 \times 10^8$ el m^{-3} em função da atividade solar (KOMJANTHY, 1997 apud FONSECA JR., 2002).

A camada E apresenta uma máxima concentração de elétrons de aproximadamente 10^5 el cm^{-3} e encontra-se em uma região compreendida entre as altitudes de 90 km e 150 km. Devido a perturbações decorrentes da magnetosfera e outros fenômenos físicos surge uma fina camada, com espessura de poucos quilômetros, denominada de esporádica E, oriunda de variações na densidade de elétrons próxima a região compreendida entre 90 km e 120 km. No que diz respeito à propagação de ondas, a camada esporádica reflete ondas de rádio, com frequência acima de aproximadamente 100 MHz (DAVIES, 1990).

A camada F_1 está compreendida entre aproximadamente 150 km e 200 km de altitude, tem como principal fonte de ionização a radiação solar no EUV. Esta camada possui variação na densidade de elétrons de $2,5 \times 10^5$ el cm^{-3} a $4,5 \times 10^5$ el cm^{-3} durante o período de atividade solar mínima e máxima respectivamente, porém, esta região desaparece à noite.

A camada F_2 engloba toda a região superior da ionosfera, inclusive a região do pico. Acima deste, a ionosfera encontra-se em equilíbrio difusivo, isto é, o plasma se distribui com sua própria escala de altura. Esta camada é dominada por processos dinâmicos, havendo uma grande interação entre a ionosfera superior com os ventos termosféricos. A presença do campo geomagnético também exerce grande influência na distribuição de ionização (KIRCHHOFF, 1991).

Na camada F (F_1 e F_2) ocorre também um acréscimo na densidade de elétrons de acordo com o aumento da altitude. Após a concentração máxima de elétrons que ocorre nesta camada, a densidade de elétrons decresce, até fundir-se com o vento solar (CAMARGO, 1999).

CAPÍTULO 3 - A IONOSFERA EQUATORIAL E DE BAIXA LATITUDE E AS SUPERTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Este capítulo apresenta uma breve descrição da ionosfera equatorial e de baixa latitude abrangendo a anomalia equatorial ionosférica e as irregularidades ionosféricas de grande escala (bolhas ionosféricas). Apresenta a importância do estudo do Tempo Espacial (“Space Weather”) e os fenômenos do Sol como origens das tempestades geomagnéticas, incluindo suas fases e respectivos comportamentos. Apresenta também os índices de variações geomagnéticas (Dst, Kp e AE) e os principais efeitos causados por tempestades geomagnéticas.

3.1 Ionosfera Equatorial e de Baixa Latitude

A ionosfera equatorial e de baixa latitude possui características exclusivas quando comparadas com outras regiões da Terra devido às linhas do campo geomagnético serem quase horizontais e devido à absorção da maior fração de energia solar incidente (ABDU, 2000; 2005). É constituída por processos eletrodinâmicos complexos provenientes das interações dinâmicas entre a atmosfera neutra e o plasma ionosférico. Tais processos são controlados pelos ventos neutros da atmosfera superior que interagem com as camadas condutoras e magnetizadas da ionosfera e produzem, por efeito dínamo, campos elétricos nas camadas E e F. Os campos elétricos, ventos neutros e as ondas atmosféricas são responsáveis por diversas oscilações tais como o efeito fonte (anomalia equatorial ionosférica) e as irregularidades ionosféricas. As irregularidades ionosféricas na camada F são observadas após

o pôr-do-sol e durante a noite as de grande escala são denominadas bolhas ionosféricas. Tais irregularidades ionosféricas influenciam fortemente as transmissões trans-ionosféricas no território brasileiro devido a grande extensão territorial distribuída ao norte e ao sul do equador geomagnético.

Os campos elétricos dínamo são gerados na camada E equatorial pelos ventos termosféricos originados por gradientes horizontais de pressão existentes na atmosfera devido à variação da absorção da radiação solar. Estes campos elétricos são conduzidos ao longo das linhas do campo geomagnético para elevadas altitudes da camada F devido à alta condutividade paralela (SCHUNK; NAGY, 2000). Durante o dia, os campos elétricos dínamo E são direcionados para leste e o campo geomagnético B é direcionado para norte resultando em uma deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$ para cima, elevando o plasma para altas altitudes na região equatorial. O plasma que foi elevado para cima difunde-se para baixo ao longo das linhas de campo devido à força de gravidade g e gradientes de pressão ∇p . Tal movimento é denominado efeito fonte, ilustrado na Figura 3.1 (KELLEY et al., 2006). Um resultado desse movimento é a formação de dois picos de ionização em regiões subtropicais em ambos os lados do equador geomagnético (entre 15° e 20° de latitude geomagnética aproximadamente). Esta distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial ionosférica, conhecida antigamente por anomalia de Appleton, e caracteriza-se por uma máxima concentração na sua densidade, em contrapartida, apresenta um mínimo de ionização centrada no equador geomagnético (ABDU, 2005).

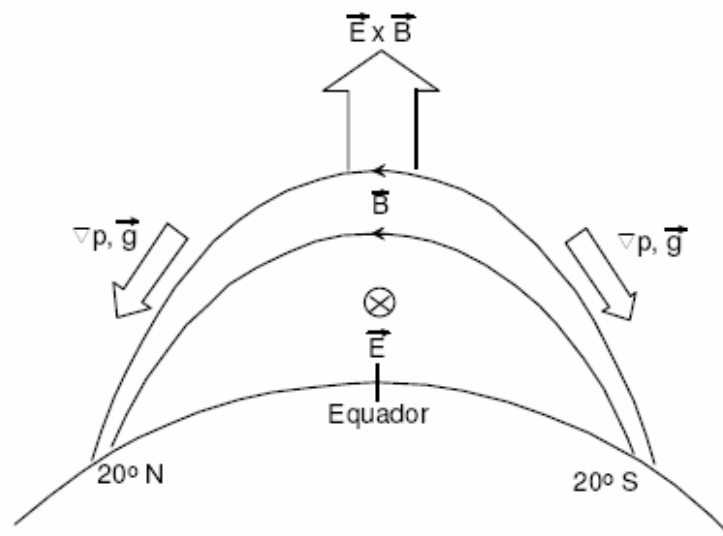


Figura 3.1 – Ilustração do efeito fonte.
FONTE: adaptada de Kelley (1989).

3.1.1 Irregularidades Ionosféricas

Irregularidades na camada F em regiões equatorial foram observadas pela primeira vez por Booker e Wells (1938). Essas irregularidades são causadas por instabilidades de plasma e manifestam-se como espalhamento na camada F (“equatorial spread F – ESF”) com a dimensão da escala da densidade variando de poucos centímetros a centenas de quilômetros (SCHUNK; SOJKA, 1996; SCHUNK ; NAGY, 2000). Durante o dia, os ventos termosféricos produzem campos elétricos dínamo na camada E direcionados a leste. Estes campos elétricos são traçados para as altas latitudes da camada F ao longo do campo geomagnético. O campo elétrico E na direção leste em combinação com o campo geomagnético B na direção norte produz uma deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$ para cima, elevando o plasma ionosférico na região equatorial. A ionosfera tem co-rotação com a Terra na direção do anoitecer e neste horário a

deriva eletromagnética sofre um aumento abrupto de velocidade devido a maior intensidade do campo elétrico na direção leste denominado campo pré-reverso. O campo elétrico é produzido por aumento dos ventos termosféricos zonal (do lado dia para o lado noite) em combinação com o forte gradiente de condutividade da camada F devido à diminuição desta condutividade na camada E após o pôr-do-sol. Este campo pré-reverso causa a subida da camada F após o pôr-do-sol (SCHUNK; SOJKA, 1996). Como é discutido em Bittencourt et al., (1997), a rápida subida da camada F após o pôr-do-sol é condição importante e talvez atue como mecanismo semeador para geração de irregularidades ionosféricas equatorial assim como as ondas de gravidade, ventos termosféricos e outras perturbações na camada F. Recentes estudos de Whalen (2002), indicam três estágios para a geração das irregularidades ionosféricas equatorial: espalhamento e forte espalhamento, observados na parte inferior da camada F na região equatorial geomagnética e evolução de forte espalhamento na camada F em regiões afastadas do equador geomagnético (como regiões de anomalia equatorial), condição esta denominada irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas ionosféricas. Esta evolução das irregularidades ionosféricas equatorial tem extensão em ambos os lados do equador geomagnético.

A geração das irregularidades ionosféricas é explicada pela teoria linear da instabilidade gravitacional tipo Rayleigh-Taylor (KELLEY, 1989) em que uma pequena instabilidade na parte inferior da camada F faz com que sejam geradas essas irregularidades. Essa teoria considera um meio mais denso sendo sustentado por um menos denso, que sob a ação da gravidade, resulta em um meio instável. Quando um evento ocorre gerando uma pequena instabilidade, a mesma intensifica-se podendo se desenvolver gerando irregularidades. A Figura 3.2 ilustra este processo.

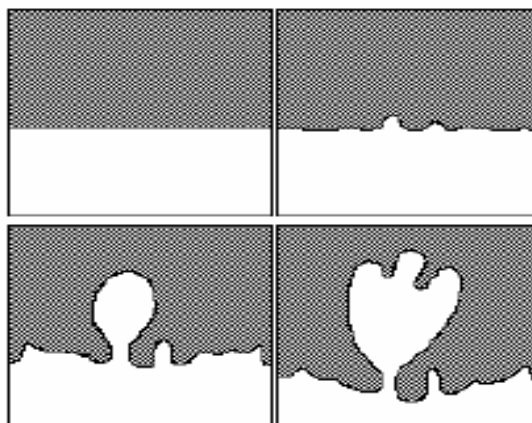


Figura 3.2 – Ilustração da teoria linear da instabilidade gravitacional tipo Rayleigh-Taylor.
FONTE: Kelley (1989).

Como é explicado por Martinis et al., (2005), a taxa de crescimento g_{RT} desta instabilidade (desprezando as recombinações químicas) pode ser expressada pela equação 3.1, que inclui cinco fatores (**a** a **e**):

$$g_{RT} = \frac{\sum_P^F}{\sum_P^E + \sum_P^F} \frac{\vec{\nabla} N}{N} \cdot \left[\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} - \frac{\vec{g}}{\mathbf{n}_{in}} - \vec{U}n \right] \quad (3.1)$$

(a)
(b)
(c)
(d)
(e)

Quando a taxa de crescimento g_{RT} é positiva, inicia-se o processo de instabilidade na parte inferior da camada F. As irregularidades ocorrem quando **(a)** a razão da condutividade Pedersen da camada F e camadas E e F aproximam-se de uma unidade, **(b)** a maiores gradientes de densidade eletrônica, $\vec{\nabla} N / N$, **(c)** a subida rápida da deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$, **(d)** a ionosfera está movimentada para altas altitudes, reduzindo assim

a frequência de colisões entre íons e partículas neutras n_{in} e (\mathbf{e}) ao termo vento neutro da componente perpendicular do campo geomagnético, $U_n = U_m \sin I + U_v \cos I$, onde U_m e U_v são componentes meridional e vertical do total dos ventos no meridiano geomagnético e I é o ângulo de inclinação magnética. Como é mencionado por Martinis et al., (2005), \mathbf{a} e \mathbf{b} são condições essenciais e \mathbf{c} até \mathbf{e} são condições para conduzir ou suprimir a geração de irregularidades ionosféricas.

As irregularidades ionosféricas de grande escala (bolhas ionosféricas) geralmente deslocam-se no sentido leste tomando dimensões transequatoriais ao longo das linhas de força do campo geomagnético (maior volubilidade dos íons e elétrons sobre tais linhas) podendo alcançar de centenas de quilômetros a milhares de quilômetros na direção perpendicular ao campo geomagnético (ABDU et al., 1991). A Figura 3.3 ilustra a evolução das bolhas ionosféricas em direção ao leste acompanhando a linha do equador geomagnético.

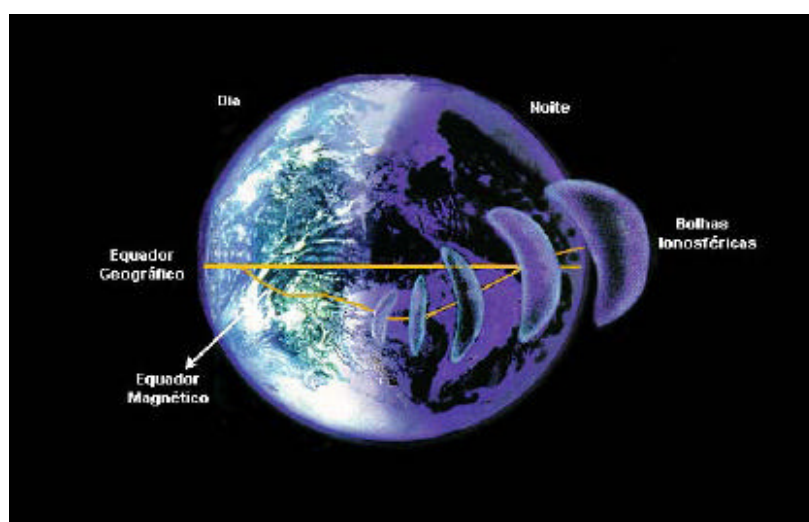


Figura 3.3 – Evolução das bolhas ionosféricas em direção ao leste acompanhando a linha do equador geomagnético.

FONTE: adaptada de Globo Ciência (1998).

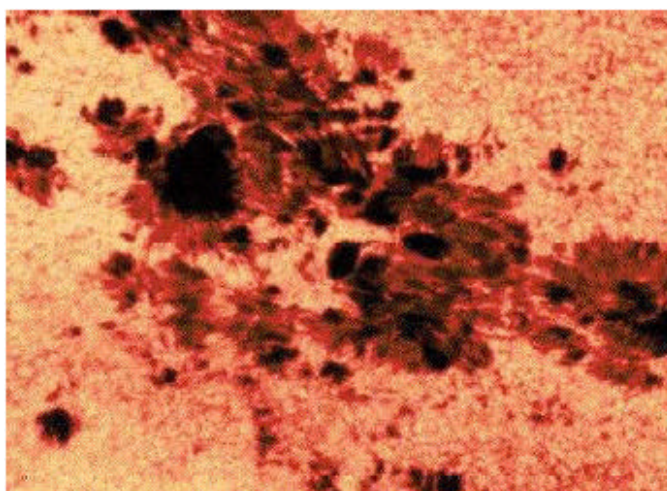
3.2 Tempo Espacial (“Space Weather”)

Há muitos anos o homem busca novos conhecimentos obtendo assim importantes avanços na área científica, tecnológica e espacial, fornecendo respostas importantes para muitos problemas da humanidade como a origem e evolução do universo, entender o ambiente ao redor da Terra, o conhecimento do Sol e as suas mudanças e efeitos que causam no nosso planeta. Recentemente, baseado em diversos fenômenos característicos do Sol e suas grandes variações, e as formas que estas variações afetam os componentes da magnetosfera, ionosfera e termosfera terrestre originou-se uma nova forma de estudo denominada Tempo Espacial (“Space Weather”). Espera-se brevemente que com tantos avanços será possível prever o Tempo Espacial assim como prevemos as chuvas, tempestades, etc. Os fenômenos do Tempo Espacial podem influenciar o desempenho e a confiabilidade de sistemas tecnológicos (comunicação, navegação, satélites, suprimento de energia, etc), que às vezes podem até colocar em risco a vida ou a saúde humana.

3.3 O Tempo Espacial e as Tempestades Geomagnéticas

O Sol é um dos astros de tipo espectral G2, emite radiação eletromagnética que cobre a faixa de raios gama até rádio e é fonte principal para vários fenômenos que ocorrem na Terra. O Sol é uma esfera formada por uma grande massa gasosa de temperatura extremamente elevada (aproximadamente $5,8 \times 10^2$ K na superfície e $1,5 \times 10^6$ K em seu centro) e tem rotação com duração média de 27 dias. É na camada visível do Sol, denominada fotosfera, que é produzida a maior parte da luz visível. Nesta camada podem ser observadas às

vezes manchas escuras que surgem e praticamente desaparecem por completo. Estas manchas ficaram conhecidas como manchas solares. As manchas solares são regiões de campo magnético extremamente forte na superfície do Sol (aproximadamente 5×10^4 vezes mais intensos que nos pólos geomagnéticos da Terra). A vida média de um grupo de manchas é de aproximadamente algumas rotações solares (FRIAÇA et al., 2003). A Figura 3.4 ilustra um grupo de manchas solares observadas no Sol.



Figuras 3.4 – Grupo de manchas solares observadas no Sol.
FONTE: Hamilton (1999).

O número de manchas solares que está relacionado à atividade solar apresenta uma variação em um ciclo de 11 anos, que também corresponde à inversão do campo magnético solar. A Figura 3.5 mostra a variação da atividade solar de regiões ativas ao longo de um ciclo de 11 anos, com a fase de mínimo ilustrada no lado direito e a fase de máximo ilustrada no lado esquerdo.

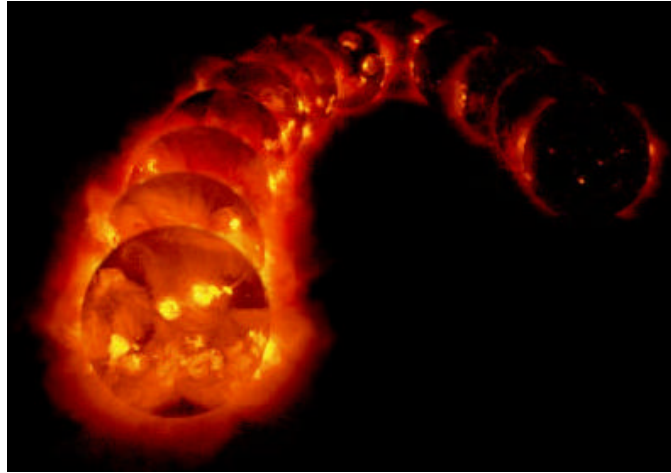


Figura 3.5 – Evolução da atividade solar dentro do ciclo de 11 anos.

FONTE: Yohkoh (1995).

Por definição, o campo magnético interplanetário se forma devido ao transporte do campo magnético do Sol pelo vento solar à longas distâncias e por consequência da rotação solar possui um formato em espiral sendo quase radial próximo ao Sol e quase perpendicular a maiores distâncias do Sol, como mostra a Figura 3.6.

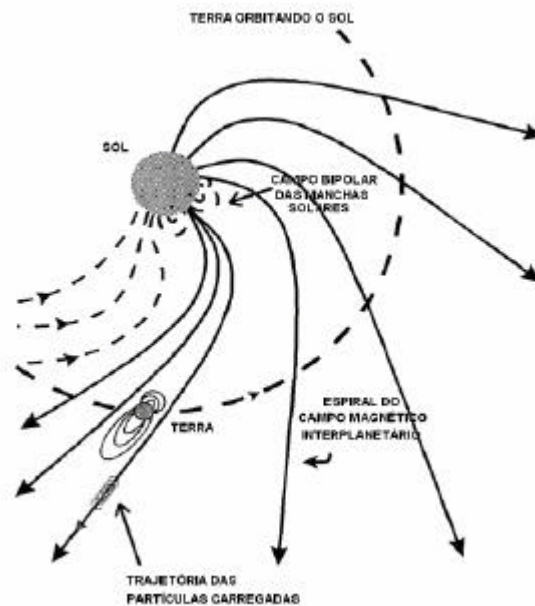


Figura 3.6 – Campo magnético interplanetário.

FONTE: adaptada de Observations of magnetic fields (2006).

O Sol além de ser fonte contínua de radiação, também é fonte contínua de partículas, ou seja, elétrons e íons positivos (maioria de prótons) propagando-se para o meio interplanetário. Os prótons têm aproximadamente velocidade de 400 km s^{-1} e densidade em torno de $5 \text{ partículas cm}^{-3}$ durante os períodos de Sol calmo. Durante os períodos de Sol ativo a velocidade aumenta para valores de 1000 km s^{-1} e a densidade aumenta para valores 20 a 40 partículas cm^{-3} . Em regiões ativas do Sol, às vezes ocorre um grande aumento de fenômenos energéticos (situadas no interior de configurações complexas de campos magnéticos solares) associados às manchas solares. Estes fenômenos são denominados de erupções solares (“solar flares”), que ocorrem devido às emissões de alta quantidade de energia, em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos para fenômenos fracos até poucas horas para os mais intensos. Estes distúrbios emitem radiação ultravioleta e raios X que

influenciam e aquecem as camadas superiores da atmosfera terrestre. A erupção solar pode estar associada às ejeções de massa coronal (“coronal mass ejection – CMEs”), que se caracteriza pela expulsão de grandes quantidades de matéria pelo Sol, a velocidades que variam de centenas até poucos milhares de km s^{-1} durante um período de várias horas. Essa quantidade de matéria pode aumentar o fluxo do vento solar e causar perturbações que atingem a Terra, designadas por tempestades geomagnéticas ou tempestades magnéticas (CECATTO, 2003).

De acordo com Tsurutani e Gonzalez (1997), essas perturbações denominadas de tempestades geomagnéticas, são devidas a entrada de energia do vento solar na magnetosfera pelo processo de reconexão, ou seja, as linhas do campo magnético interplanetário (direção sul) se interconectam com as linhas do campo geomagnético da Terra (direção norte) no lado diurno transportando a energia sobre a calota polar na direção da cauda da magnetosfera onde ocorre uma nova reconexão e a energia é injetada para dentro da magnetosfera. Gonzalez e Tsurutani (1987) e Gonzalez et al., (1994) mencionam que para ocorrer uma tempestade geomagnética intensa ($|\text{Dst}| > 100 \text{ nT}$) é necessário um campo magnético interplanetário B_z de no mínimo -10 nT mantido por um intervalo de 3 horas ou mais. A Figura 3.7 ilustra o acoplamento do Sol com o meio interplanetário e a magnetosfera terrestre.

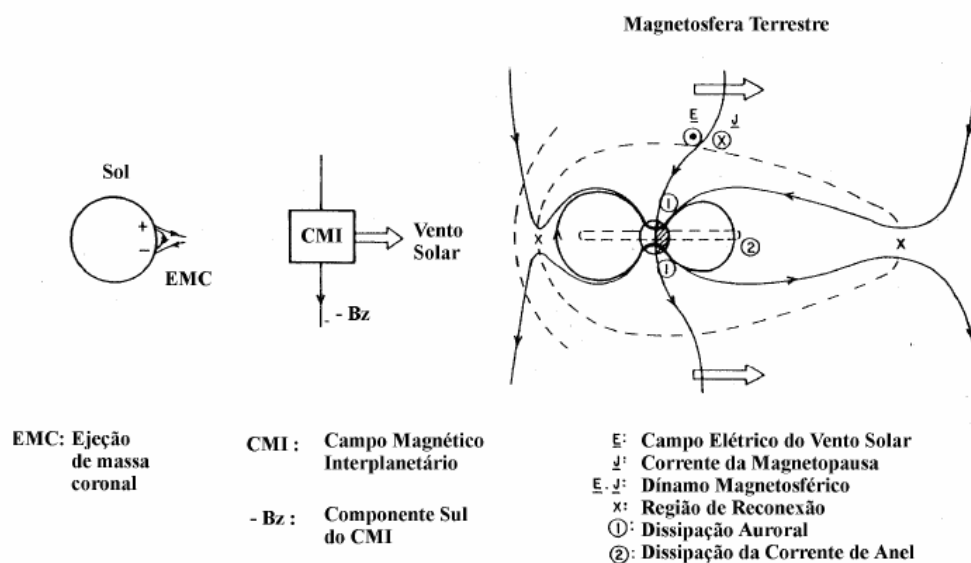


Figura 3.7– Ilustração do acoplamento do Sol com o meio interplanetário e a magnetosfera terrestre.

FONTE: adaptada de Tsurutani e Gonzalez (1998).

3.3.1 Características das Tempestades Geomagnéticas

A partir de erupções solares associadas às ejeções de massa coronal proveniente do Sol, ocorre um grande aumento da velocidade do vento solar seguido possivelmente pela passagem do campo magnético interplanetário na direção sul ocasionando em um início súbito da tempestade denominada “sudden storm commencement (SSC)”. O SSC ocorre a partir da compressão do vento solar na magnetosfera podendo variar de minutos a horas causando um aumento no índice de atividade geomagnética Dst caracterizando o início da fase inicial de uma tempestade geomagnética de grande intensidade (CAMPBELL, 1997), não ocorrendo em tempestades de menor intensidade. Além do SSC, há tempestades em que a compressão ocorre gradualmente dando um início gradual da tempestade denominada “gradual storm

commencement (GSC)” (MENDILLO, 2006). Acompanhando o SSC ou GSC, existe respectivamente uma fase principal e uma fase de recuperação da tempestade geomagnética. Os termos que definem as fases de uma tempestade foram introduzidos por Chapman (1951) e citados por Kumar et al., (2005).

A fase principal de uma tempestade geomagnética dura entre aproximadamente meia hora a várias horas e causa um decréscimo no índice Dst. Atribui-se este decréscimo a um grande aumento de partículas aprisionadas na magnetosfera que devido aos gradientes do campo geomagnético e sua curvatura, levam a derivas dessas partículas (íons de leste para oeste e elétrons de oeste para leste) dando origem a Corrente de Anel (GONZALEZ et al., 1994; KAMIDE et al., 1998). Durante esta fase, a entrada de energia na alta latitude da atmosfera é maximizada (SCHUNK; NAGY, 2000) devido a reconexão do campo geomagnético realizado pela nossa magnetosfera.

Por fim, a fase de recuperação caracteriza-se por uma normalização após um período variando entre dezenas de horas, ou seja, a atividade geomagnética e a entrada de energia são minimizadas (SCHUNK ; NAGY, 2000).

A Figura 3.8 mostra as fases características de uma tempestade geomagnética.

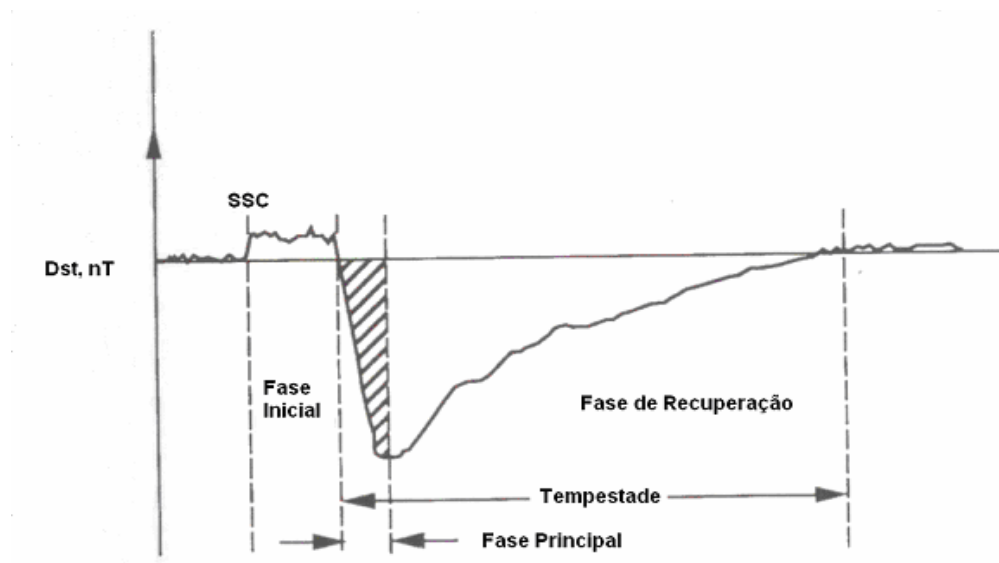


Figura 3.8 – Fases características de uma tempestade geomagnética.

FONTE: adaptada de Tsurutani e Gonzalez (1998).

3.4 Índice Dst

O índice Dst (“Disturbance Storm Time Index”) define o estado de atividade do campo geomagnético e é obtido a partir de magnetogramas de baixa latitude. É composto por quatro observatórios geomagnéticos localizados em baixas latitudes e distribuídos longitudinalmente. Sua denominação e localização são: Hermanus – África do Sul (lat. geog. - 34,40°), Kakiota – Japão (lat. geog. 36,23°), Honolulu – Hawaí (lat. geog. 21,32°) e San Juan – Porto Rico (lat. geog. 18,38°), como mostra a Figura 3.9.



Figura 3.9 – Rede de observatórios do índice Dst.

FONTE: Dst Index (1991).

O índice Dst é utilizado para verificar a intensidade da corrente de anel, sua unidade de medida é dada em nano Tesla (nT) e está baseado no valor médio da componente horizontal H do campo geomagnético medido de hora em hora (SUGIURA, 1964 apud FONSECA JR., 2002).

A Tabela 3.1 mostra o nível de intensidade da tempestade geomagnética medido pelo índice Dst.

Tabela 3.1 – Medida da intensidade da tempestade geomagnética pelo índice Dst.

Tempestade Geomagnética	Índice Dst
fraca	$ Dst > 30 \text{ nT}$
moderada	$50 \text{ nT} < Dst < 100 \text{ nT}$
intensa	$ Dst > 100 \text{ nT}$

FONTE: adaptada de Gonzalez et al., (1994).

Pode-se mencionar que a condição para a existência de supertempestade adotada nesta pesquisa foi utilizar como critério o índice $|Dst| > 250 \text{ nT}$.

3.5 Índice Kp

O índice Kp (“Planetary Index”), que mede a intensidade da tempestade geomagnética, é a representação da média do índice K, o qual consiste de valores numéricos que medem o nível de atividade geomagnética e variam de 0 (muito calma) a 9 (muito intensa) e é expresso em terços de unidades, representados, por exemplo, pelos valores 8^+ (8,3), 2^- (1,7) e 5 (5), para intervalos de 3 horas monitorados a partir de estações em Terra, instaladas em observatórios magnéticos. As estações são constituídas por 13 observatórios distribuídos entre 46° e 63° ao norte e -46° e -63° ao sul do equador geomagnético. A Tabela 3.2 mostra as variações do índice Kp conforme a intensidade da tempestade geomagnética.

Tabela 3.2 – Medida da intensidade da tempestade geomagnética pelo índice Kp.

Tempestade Geomagnética	Índice Kp
muito calma	0 a 1
calma	1 a 2 ⁻
normal	2 ⁻ a 3 ⁺
intensa	3 ⁺ a 4 ⁺
muito intensa	4 ⁺ a 9

FONTE: adaptada de Fedrizzi (1999).

3.6 Índice AE

O índice AE (“Electrojet Auroral”), que corresponde a um indicador do eletrojato auroral, mede as correntes que fluem da zona auroral e é derivado de dados obtidos em estações distribuídas longitudinalmente perto da zona auroral. Os dados apresentados foram obtidos diretamente de <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>. Diariamente, os magnetogramas da componente horizontal H do campo geomagnético das estações estão superpostos e as camadas mais altas e mais baixas envolvidas definem AU e AL respectivamente (DAVIES, 1990).

Conseqüentemente por definição:

$$AE = AU - AL \quad (3.2)$$

3.7 Efeitos das Tempestades Geomagnéticas sobre Regiões Equatorial e de Baixa Latitude

Como foi discutido em Abdu (1997) e Tsurutani et al., (2004), durante uma tempestade geomagnética (fases principal e recuperação), modificações ionosféricas em regiões equatorial e de baixa latitude foram observadas devido à penetração pontual dos campos elétricos perturbados de origem magnetosférica oriundos da região de alta latitude e ao aquecimento da alta atmosfera em alta latitude em consequência à precipitação de partículas energéticas conhecido como aquecimento “Joule”. O aquecimento “Joule” resulta em modificações da circulação termosférica global e perturbações dos ventos termosféricos (zonal e meridional), modificando a dinâmica da termosfera-ionosfera equatorial. Para longas tempestades, a densidade, composição e circulação do sistema termosfera-ionosfera podem ser sensivelmente modificadas podendo persistir por vários dias depois que a atividade geomagnética cessar. Se a densidade eletrônica na camada F aumentar, resultará em perturbações ionosféricas denominada tempestade ionosférica positiva, enquanto o decréscimo é denominado tempestade ionosférica negativa e representa uma extrema forma de Tempo Espacial (SCHUNK; SOJKA, 1996; BUONSANTO, 1999).

3.8 Efeitos das Tempestades Geomagnéticas sobre a Terra e Espaço

Muitos dos efeitos das atividades solares tendem a afetar o meio interplanetário por um curto ou longo prazo. A energia do vento solar conduzida pela magnetosfera tende a atingir a atmosfera terrestre produzindo efeitos evidentes na Terra e espaço, tais como:

- Efeitos sobre a rede de transmissão de energia elétrica gerando “black-out”.
- Danos em satélites causados por partículas de alta energia.
- Aumento no risco de exposição por radiação aos humanos no espaço.
- Mudanças nos arrastos atmosféricos em satélites.
- Transtorno nas comunicações de defesa, tal como o sistema de posicionamento global (GPS).
- Perdas de comunicação em alta frequência, etc.

Pode-se mencionar que o objetivo desta pesquisa é estudar os efeitos das supertempestades geomagnéticas sobre regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro utilizando os dados de GPS de várias estações da RBMC/IGS.

CAPÍTULO 4 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (“GLOBAL POSITIONING SYSTEM - GPS”)

Este capítulo aborda aspectos essenciais relacionados ao sistema GPS, que é um conjunto de vários satélites orbitando ao redor da Terra, transmitindo ondas eletromagnéticas na faixa de frequência ultra-alta (“Ultra High Frequency – UHF”) em torno de 1200 – 1500 MHz. São discutidas as características dos sinais transmitidos, aplicações e principais observáveis. São citados as fontes e os principais erros envolvidos nas observáveis GPS. É mostrado também o cálculo para determinar o TEC (“Total Electron Content” – Conteúdo Total de Elétrons), VTEC (“Vertical Total Electron Content” – Conteúdo Total de Elétrons na Vertical) e ROT (“Phase Fluctuation” ou “Rate of Change TEC” – flutuações de fase ou taxas de variações do TEC).

4.1 Introdução ao GPS

O sistema de posicionamento global (“Global Positioning System – GPS”) ou NAVSTAR-GPS é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América (“Department of Defense – DoD”), com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das forças armadas norte americanas (MONICO, 2000), com a finalidade de se obter em tempo real, a posição exata de alguma entidade (homem, veículo, aeronave, etc). A definição do serviço GPS é baseada em conjuntos de satélites e permite que um usuário em qualquer lugar da superfície terrestre consiga determinar as suas posições

tridimensionais (latitude, longitude e altitude), a sua velocidade e a hora, 24 horas por dia independente das condições atmosféricas (ROCHA, 2003).

O GPS é constituído de três segmentos: segmento espacial, segmento de controle e segmento de usuário.

4.1.1 Segmento Espacial

O segmento espacial consiste de 24 satélites operacionais (Figura 4.1), transmitindo ondas eletromagnéticas na frequência de UHF para a Terra, orbitando a aproximadamente 20.200 km de altitude (ROCHA, 2003) em 6 órbitas diferentes com quatro satélites em cada órbita. Cada órbita tem uma inclinação de 55° em relação à linha do equador geográfico, efetuando uma volta em torno da Terra a cada 12 horas aproximadamente.

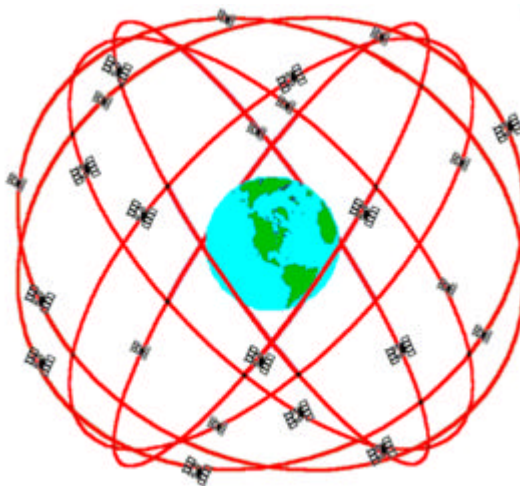


Figura 4.1 – Ilustração da constelação de 24 satélites do sistema GPS.
FONTE: Dana (2000).

4.1.2 Segmento de Controle

O segmento de controle é o responsável por controlar os 24 satélites. Este controle é feito por uma estação central (MESTRE), localizada no Colorado, nos Estados Unidos, e cinco estações de monitoramento espalhadas pela Terra (Hawaí, Kwajalein no Oceano Pacífico, Ilha Ascension no Atlântico Sul, Diego Garcia no Oceano Índico e Cabo Canaveral nos Estados Unidos), mostradas na Figura 4.2. O segmento de controle possui algumas funções específicas tais como: monitorar as órbitas dos satélites, corrigir posições, manter o tempo GPS (escala de tempo dada pelos relógios atômicos dos satélites), calcular as efemérides dos satélites e parâmetros do relógio e atualizar as mensagens de navegação.

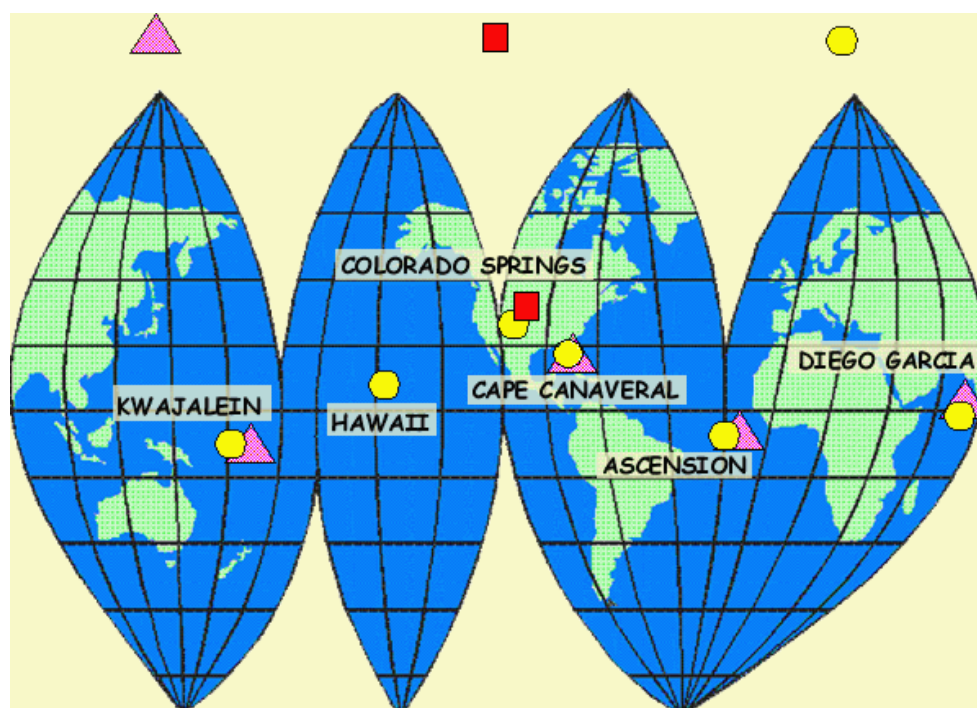


Figura 4.2 – Mapa com as localizações da estação central e das estações de monitoramento – GPS. O triângulo indica a antena em Terra, o quadrado indica a estação central (MESTRE) e o círculo indica as estações de monitoramento.

FONTE: adaptada de GPS Overview (2001).

4.1.3 Segmento de Usuário

O segmento de usuário é formado por receptores de uso civil e militar que recebem os sinais dos satélites da constelação GPS para calcular a posição em três dimensões, velocidade do usuário e o tempo GPS, que se destinam a propósitos específicos para uso em navegação, geodésia ou outra atividade qualquer (MONICO, 2000) (Figura 4.3).

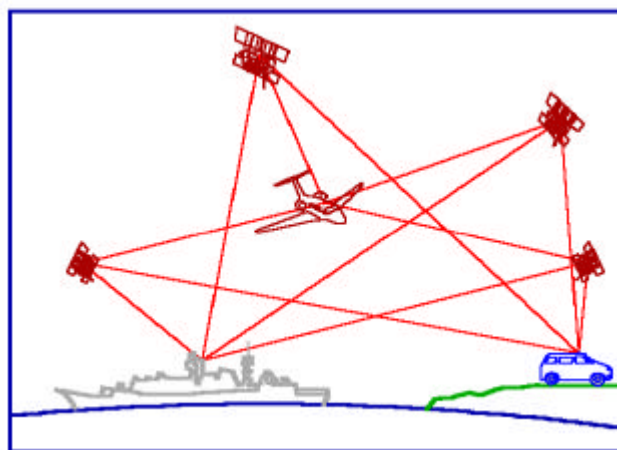


Figura 4.3 – Esquema mostrando a utilização de receptores GPS em aviões, veículos terrestres e navios.

FONTE: Dana (2000).

Para este segmento existem dois tipos de serviços: O SPS e o PPS.

O SPS (Serviços de Posicionamento Padrão) é um serviço de acesso civil, ao qual fornecem precisões de 100 metros no plano horizontal e 156 metros no plano vertical com probabilidade de 95% com a S/A ativada (KAPLAN; HEGARTY, 2006). A S/A (“Selective Availability” – Disponibilidade Seletiva) tem a função de gerar um erro proposital, elaborado pelo DoD.

O PPS (Serviços de Posicionamento Preciso) é utilizado pelos militares americanos e usuários autorizados, e fornecem precisões de 22 metros no plano horizontal e 27,7 metros no plano vertical com probabilidade de 95% (KAPLAN ; HEGARTY, 2006).

4.2 Características dos Sinais emitidos pelos Satélites GPS

Os sinais transmitidos pelos satélites GPS são gerados a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz e multiplicadas por 154 e 120 respectivamente, obtendo-se então as frequências em L_1 e L_2 referentes às ondas portadoras ao qual permitem operações sob quaisquer condições de tempo. A Figura 4.4 mostra a estrutura básica dos sinais GPS.

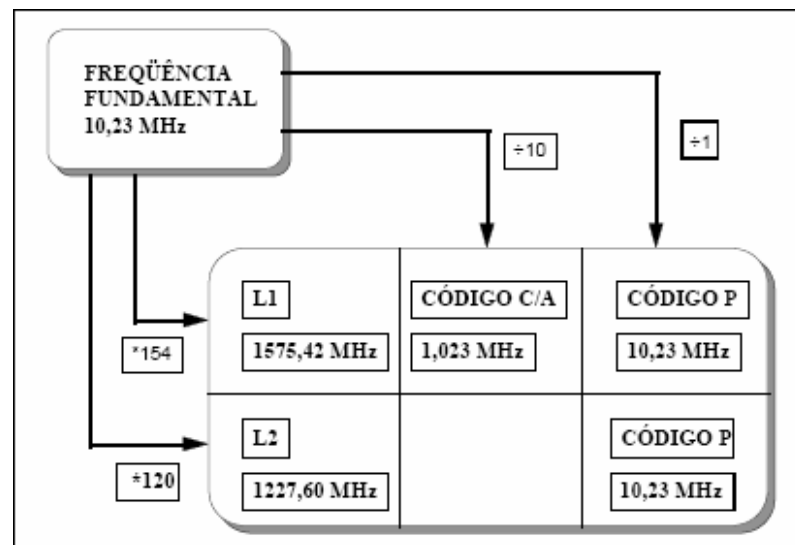


Figura 4.4 – Estrutura básica dos sinais GPS.

FONTE: Monico (2000).

As frequências em L_1 e L_2 e os comprimentos de onda λ são:

$$f_1 = 10,23 * 154 \rightarrow L_1 = 1575,42 \text{ MHz e } I \cong 19,03 \text{ cm} \quad (4.1)$$

e

$$f_2 = 10,23 * 120 \rightarrow L_2 = 1227,60 \text{ MHz e } I \cong 24,45 \text{ cm} \quad (4.2)$$

A portadora L_1 é modulada em fase pelos códigos C/A (“course-acquisition” – fácil aquisição) e P (“precise” – preciso) juntamente com as mensagens de navegação. A portadora L_2 é modulada apenas pelo código P e também com as mensagens de navegação (MATSUOKA, 2003). As mensagens de navegação contêm informações sobre os relógios, órbitas e funcionamento dos satélites (FEDRIZZI, 1999).

Os códigos C/A e P são definidos a partir dos códigos PRN (“pseudo-random-noise” – ruído falsamente aleatório) modulados sobre as portadoras e são gerados por algoritmo resultando em informação codificada em uma seqüência aleatória de (+1 e -1) ou (0 e 1) (MONICO, 2000).

O código C/A é para uso civil, possui comprimento de onda por volta de 300 m, é transmitido a uma razão de 1,023 MHz e é gerado apenas na portadora L_1 . O código P é para uso militar, possui comprimento de onda por volta de 30 m, é transmitido com freqüência de 10,23 MHz e é gerado nas portadoras L_1 e L_2 . Somente usuários autorizados têm acesso ao código P quando o AS (“anti-spoofing”) estiver ativado. O AS é um processo de criptografia do código P, resultando em um código Y protegido, visando protegê-lo de usuários não autorizados.

4.3 Aplicações do GPS

O GPS possui uma infinidade de aplicações, sendo utilizado em navegação aérea, marítima e terrestre por dispor de dados em tempo real de maneira quase ininterrupta e também por possuir excelente precisão. Entretanto, existem aplicações onde a precisão torna-se um fator primordial e a acurácia do sistema pode ser maximizada através da utilização do GPS Diferencial (“Differential GPS – DGPS”) (FEDRIZZI, 1999), empregado antes da desativação da S/A no dia 2 de maio de 2000. O DGPS consiste em um receptor GPS estacionário sobre um ponto de coordenadas conhecidas o qual determina os erros e envia uma mensagem de correção a outros receptores resultando em uma maior precisão. Dentre muitas aplicações podemos citar a navegação em rota, procedimentos de pouso e decolagem e aproximação de embarcações em portos e áreas restritas.

4.4 Observáveis GPS

De acordo com Seeber (1993), existem quatro tipos de observáveis: medidas de pseudodistâncias a partir do código, diferenças de pseudodistâncias a partir da contagem Doppler integrada, fase ou diferença de fase da onda portadora e diferenças do tempo de viagem do sinal a partir das medições interferométricas.

Dentre estes quatro tipos de observáveis GPS, a pseudodistância e a fase da onda portadora são as mais importantes, pois permitem determinar posição, velocidade e tempo. A seguir são descritas essas duas observáveis.

4.4.1 Pseudodistância

A pseudodistância corresponde à medida de distância entre satélite e receptor obtida pelos códigos C/A e P e caracteriza-se pelo não sincronismo entre os relógios dos satélites e dos receptores. É o resultado da multiplicação da velocidade da luz no vácuo pelo tempo de deslocamento necessário para a máxima correlação da seqüência do código emitido pelo satélite e a réplica gerada pelo receptor (CAMARGO, 1999). O tempo de deslocamento corresponde ao tempo de propagação do sinal enviado pelo satélite até a chegada ao receptor.

A pseudodistância pode ser representada por Hofmann-Wellenhof et al., (1994):

$$\Delta t = t_R - t^S \quad (4.3)$$

$$= [t_R(GPS) - \mathbf{d}_R] - [t^S(GPS) - \mathbf{d}^S] \quad (4.4)$$

$$= \Delta t(GPS) + \Delta \mathbf{d} \quad (4.5)$$

onde

$$\Delta t(GPS) = t_R(GPS) - t^S(GPS)$$

e

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}^S - \mathbf{d}_R$$

Assim, tem-se que:

t^S e t_R - instante da emissão e recepção do sinal respectivamente;

\mathbf{d}^S e \mathbf{d}_R - desvios dos relógios do satélite e do receptor respectivamente em relação

ao tempo GPS.

O intervalo de tempo Δt multiplicado pela velocidade da luz c , obtém-se a pseudodistância:

$$\mathfrak{R} = c\Delta t = c\Delta t(GPS) + c\Delta d = \mathbf{r} + c\Delta d \quad (4.6)$$

onde \mathbf{r} é a distância geométrica entre o satélite e o receptor.

4.4.2 Fase da Onda Portadora

A observável fase da onda portadora ou fase de batimento da onda portadora possui uma precisão maior que a pseudodistância. A observação de fase é à parte fracional de um ciclo. Na primeira medida não se sabe o número inteiro de ciclos denominado de ambigüidade N , entre o receptor e o satélite. A partir da primeira medida, o receptor realiza a contagem de ciclos inteiros até a próxima medida. Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua com relação a um número de ciclos inteiros envolvidos entre o receptor e os satélites na primeira época de observação (CAMARGO, 1999).

A fase da onda portadora \mathbf{f}_R^S em ciclos, pode ser obtida de acordo com Hofmann-Wellenhof et al., (1994), pelas equações 4.7 e 4.8, em que representam respectivamente a diferença entre a fase do sinal emitido pelo satélite e a recebida pelo receptor, decorrente do tempo de propagação da onda através da distância geométrica \mathbf{r} :

$$\mathbf{f}^S(t) = f^S t - f^S \frac{\mathbf{r}}{c} - \mathbf{f}_0^S \quad (4.7)$$

$$\mathbf{f}_R(t) = f_R t - \mathbf{f}_{0R} \quad (4.8)$$

onde

$$\mathbf{f}_0^S = f^S \mathbf{d}^S$$

e

$$\mathbf{f}_{0R} = f_R \mathbf{d}_R$$

Assim, tem-se que:

t - sistema de tempo GPS iniciado no instante $t_0 = 0$;

f^S e f_R - frequência do sinal gerado pelo oscilador do satélite e receptor respectivamente;

\mathbf{f}_0^S e \mathbf{f}_{0R} - fases iniciais que contêm os desvios dos relógios em relação ao tempo GPS.

Portanto, a fase da onda portadora é dada por:

$$\mathbf{f}_R^S(t) = \mathbf{f}^S(t) - \mathbf{f}_R(t) \quad (4.9)$$

onde $\mathbf{f}^S(t)$ e $\mathbf{f}_R(t)$ representam respectivamente, as diferenças entre a fase do sinal recebido do satélite e o gerado pelo receptor. Por substituição simples a equação 4.9 pode ser reescrita na forma:

$$\mathbf{f}_R^S(t) = -f^S \frac{\mathbf{r}}{c} - f^S \mathbf{d}^S + f_R \mathbf{d}_R + (f^S - f_R)t \quad (4.10)$$

A divergência das frequências f^S e f_R em relação à frequência nominal f é muito pequena, de forma que as frequências f^S e f_R são aproximadamente iguais a f . Assim, a equação 4.10 reduz-se à seguinte equação:

$$\mathbf{f}_R^S(t) = -f \frac{\mathbf{r}}{c} - f \Delta \mathbf{d} \quad (4.11)$$

Assim, a fase da portadora, considerando a ambigüidade N em um determinado instante t e $\Delta \mathbf{f}_R^S$ correspondendo à fração de ciclo de fase citada no início desta seção, é dada por:

$$\mathbf{f}_R^S(t) = \Delta \mathbf{f}_R^S |_{t_0}^t + N \quad (4.12)$$

Substituindo a equação 4.12 na equação 4.11 e considerando, por simplicidade, que $\Delta \mathbf{f}_R^S(t_0) = 0$, obtém-se a seguinte equação para a fase da portadora:

$$\mathbf{f} = \frac{1}{l} \mathbf{r} + \frac{c}{l} \Delta \mathbf{d} + N \quad (4.13)$$

onde

$$\mathbf{f} = -\Delta \mathbf{f}_R^S$$

e

$$I = \frac{c}{f}$$

4.5 Erros Envolvidos nas Observáveis

As observáveis GPS estão sujeitas a vários tipos de erros que podem ser divididos em sistemáticos, aleatórios e grosseiros. Erros sistemáticos podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou eliminados por técnicas apropriadas de observação. Erros aleatórios são inevitáveis sendo, portanto uma propriedade característica da observação. E os erros grosseiros são característicos das falhas humanas ou equipamentos. Para evitá-los, há a necessidade de conhecer os erros e fontes que estão envolvidos neste processo. Nesta seção será abordada a refração ionosférica, já os demais erros que envolvem o cálculo do conteúdo total de elétrons (TEC) serão citados na seção 4.6.

A Tabela 4.1 apresenta uma relação das fontes e dos principais erros que envolvem as observáveis, podendo ser melhores visualizadas na Figura 4.5.

Tabela 4.1 – Fontes e principais erros envolvidos nas observáveis GPS.

FONTES	ERROS
Satélite	Erro do relógio Erro da órbita Atraso das portadoras no hardware do satélite
Propagação do sinal	Refração ionosférica Refração troposférica Multicaminhamento ou Sinais refletidos
Receptor/Antena	Erro do relógio Atraso das portadoras no hardware do receptor Ruído do receptor

FONTE: adaptada de Monico (2000).

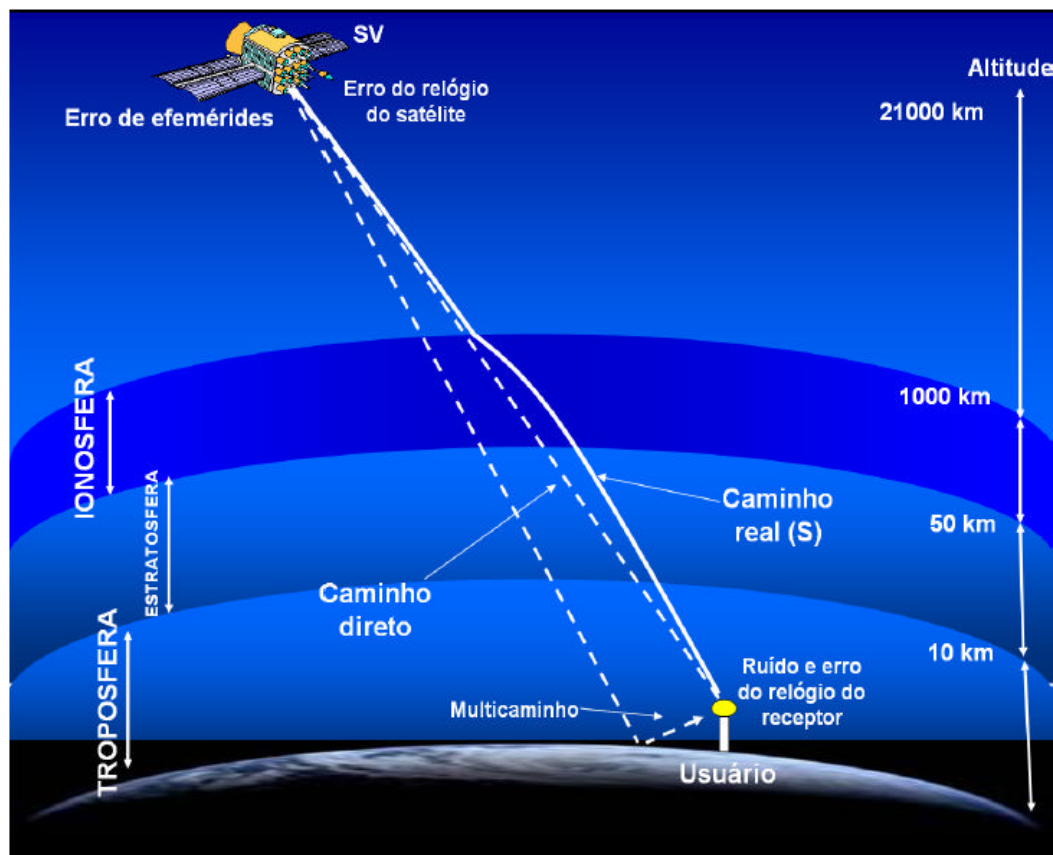


Figura 4.5 – Ilustração dos principais erros envolvidos no sistema GPS ocasionando a diferença entre o caminho direto (distância geométrica) e o caminho real.

FONTE: Oliveira (2003).

4.5.1 Refração Ionosférica

A ionosfera por se tratar de um meio dispersivo, tem total influência na propagação dos sinais de rádio. Assim sendo, a refração é dependente da frequência do sinal e proporcional ao TEC (“Total Electron Content” – Conteúdo Total de Elétrons).

Os índices de refração para a velocidade de fase n_f e para o grupo n_g são dados por Hofmann-Wellenhof et al., (1994):

$$n_f = 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (4.14)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} \quad (4.15)$$

onde a densidade de elétrons n_e e a constante $40,3$ pelo Sistema Internacional de medida são dadas respectivamente em el m^3 e $\text{mHz}^2(\text{el m}^2)^{-1}$. De acordo com as equações 4.14 e 4.15 para os índices de refração da fase e do grupo, ocorre um aumento da velocidade de fase e um retardo na velocidade de grupo. É conveniente observar nas equações 4.14 e 4.15 que o índice de refração para a fase é menor que para o grupo e quanto maior for a frequência, menor serão suas diferenças, obtendo um menor índice de refração.

A diferença entre a distância medida (real) e a distância geométrica r entre o satélite e o receptor, representa o erro sistemático devido a refração ionosférica. Por dedução matemática obtém-se as equações que proporcionam o erro devido a refração ionosférica para a fase da onda portadora I_{fR}^S e para o grupo I_{gR}^S como representado por Hofmann-Wellenhof et al., (1994):

$$I_{fR}^S = -\frac{40,3}{f^2} TEC \quad (4.16)$$

e

$$I_{gR}^S = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (4.17)$$

onde

TEC - conteúdo total de elétrons.

Para maiores detalhes sobre as fontes e erros envolvidos nas observáveis GPS e as técnicas de deduções das equações, consultar Hofmann-Wellenhof et al., (1994), Camargo (1999) e Monico (2000).

4.6 Cálculo do Conteúdo Total de Elétrons (TEC)

O conteúdo total de elétrons (TEC) é um parâmetro utilizado para o estudo da ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética (MATSUOKA et al., 2004). É definido pela integral da densidade eletrônica ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite *S* e o receptor *R*, numa coluna cilíndrica com seção transversal de área de 1 m^2 (KLOBUCHAR, 1991; HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994):

$$TEC = \int_R^S n_e ds \quad (4.18)$$

O TEC é medido em unidades de TEC (“TECU – Total Electron Content Unit”, que representa uma unidade de TEC) e corresponde a 10^{16} el m^{-2} . O seu cálculo pode ser obtido através das observáveis de pseudodistância e fase da onda portadora (SARDÓN; ZARRAOA, 1997).

Cálculo do TEC usando a Observável Pseudodistância

A observável de pseudodistância (equação 4.6), para as portadoras L_1 e L_2 é dada por:

$$\mathfrak{R}_1 = \mathbf{r} + c\Delta\mathbf{d} + \Delta_{\mathfrak{R}_1}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}_1}^{trop} + d_{\mathfrak{R}_1}^S + d_{\mathfrak{R}_1}^R + m_{\mathfrak{R}_1} + \mathbf{e}_{\mathfrak{R}_1} \quad (4.19)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \mathbf{r} + c\Delta\mathbf{d} + \Delta_{\mathfrak{R}_2}^{iono} + \Delta_{\mathfrak{R}_2}^{trop} + d_{\mathfrak{R}_2}^S + d_{\mathfrak{R}_2}^R + m_{\mathfrak{R}_2} + \mathbf{e}_{\mathfrak{R}_2} \quad (4.20)$$

onde

\mathfrak{R}_1 e \mathfrak{R}_2 - pseudodistância para L_1 e L_2 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC;

$\Delta_{\mathfrak{R}_1}^{iono}$ e $\Delta_{\mathfrak{R}_1}^{trop}$ - efeitos das refrações ionosférica e troposférica respectivamente nas portadoras L_1 e L_2 ;

$d_{\mathfrak{R}_1}^S$ e $d_{\mathfrak{R}_1}^R$ - atrasos das portadoras no hardware do satélite e receptor respectivamente, gerados pelos diferentes caminhos que as portadoras L_1 e L_2 percorrem dentro do hardware;

$m_{\mathfrak{R}_1}$ - efeito do multicaminhamento nas portadoras L_1 e L_2 ocorrido quando a antena do receptor recebe além do sinal direto do satélite, sinais refletidos por superfícies localizadas nas proximidades do receptor;

$\mathbf{e}_{\mathfrak{R}_1}$ - ruído do receptor nas portadoras L_1 e L_2 .

De acordo com Fedrizzi (1999) e Matsuoka e Camargo (2004), o erro entre a distância geométrica do satélite e receptor, o erro da refração troposférica e os erros referentes aos relógios do satélite e receptor afetam identicamente as observáveis nas portadoras L_1 e L_2 .

Sabendo que $\Delta_{\mathfrak{R}_1}^{iono}$ são os efeitos da refração ionosférica para o atraso de grupo de acordo com a equação 4.17, e subtraindo a equação 4.19 de 4.20 obtém-se:

$$\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1 = \Delta I_{gR}^S + d_{\mathfrak{R}}^S + d_{\mathfrak{R}}^R + m_{\mathfrak{R}} + \mathbf{e}_{\mathfrak{R}} \quad (4.21)$$

onde

$$\Delta I_{gR}^S = I_{gR_2}^S - I_{gR_1}^S = 40,3TEC \left(\frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2} \right) \quad (4.22)$$

e

$$d_{\mathfrak{R}}^S = d_{\mathfrak{R}_2}^S - d_{\mathfrak{R}_1}^S, \quad d_{\mathfrak{R}}^R = d_{\mathfrak{R}_2}^R - d_{\mathfrak{R}_1}^R, \quad m_{\mathfrak{R}} = m_{\mathfrak{R}_2} - m_{\mathfrak{R}_1} \text{ e } \mathbf{e}_{\mathfrak{R}} = \mathbf{e}_{\mathfrak{R}_2} - \mathbf{e}_{\mathfrak{R}_1}.$$

Substituindo a equação 4.22 na equação 4.21 e por manipulação matemática obtém-se o TEC para a pseudodistância:

$$TEC = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)} [(\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1) - d_{\mathfrak{R}} - m_{\mathfrak{R}} - \mathbf{e}_{\mathfrak{R}}] \quad (4.23)$$

onde $d_{\mathfrak{R}} = d_{\mathfrak{R}}^S + d_{\mathfrak{R}}^R$ e representa a soma do erro sistemático interfrequência do satélite $d_{\mathfrak{R}}^S$ e do receptor $d_{\mathfrak{R}}^R$.

Cálculo do TEC usando a Observável Fase da Onda Portadora

Para as medidas de fase, o TEC para as portadoras L_1 e L_2 é obtido pela equação 4.13 multiplicada por \mathbf{I} da seguinte forma:

$$\mathfrak{S}_l = \mathbf{I} \mathbf{f}_l = \mathbf{r} + c \mathbf{D} \mathbf{d} + \mathbf{D}_{f_l}^{iono} + \mathbf{D}_f^{rop} + \mathbf{I}_l N_l + d_{f_l}^S + d_{f_l}^R + m_{f_l} + \mathbf{e}_{f_l} \quad (4.24)$$

$$\mathfrak{S}_2 = \mathbf{l} \mathbf{f}_2 = \mathbf{r} + c \mathbf{D} \mathbf{d} + \mathbf{D}_{f_2}^{iono} + \mathbf{D}_f^{rop} + \mathbf{I}_2 N_2 + d_{f_2}^S + d_{f_2}^R + m_{f_2} + \mathbf{e}_{f_2} \quad (4.25)$$

onde

\mathfrak{S}_1 e \mathfrak{S}_2 - fase da onda portadora para L_1 e L_2 acrescida dos erros que interferem no cálculo do TEC;

Sabendo que Δ_f^{iono} representa os efeitos da refração ionosférica para a fase de acordo com a equação 4.16, e subtraindo a equação 4.25 da equação 4.24 obtém-se:

$$\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2 = \mathbf{D} \mathbf{I}_{fR}^S + \mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2 N_2 + d_f^S + d_f^R + m_f + \mathbf{e}_f \quad (4.26)$$

onde

$$\mathbf{D} \mathbf{I}_{fR}^S = \mathbf{I}_{fR_1}^S - \mathbf{I}_{fR_2}^S = 40,3 \text{TEC} \left(\frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2} \right) \quad (4.27)$$

e

$$d_f^S = d_{f_1}^S - d_{f_2}^S, \quad d_f^R = d_{f_1}^R - d_{f_2}^R, \quad m_f = m_{f_1} - m_{f_2} \quad \text{e} \quad \mathbf{e}_f = \mathbf{e}_{f_1} - \mathbf{e}_{f_2}$$

Substituindo a equação 4.27 na equação 4.26 e por manipulação matemática obtém-se o TEC para a fase da onda portadora:

$$\text{TEC} = \frac{f_{L_2}^2 f_{L_1}^2}{40,3(f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2)} \left[(\mathfrak{S}_1 - \mathfrak{S}_2) - (\mathbf{I}_1 N_1 - \mathbf{I}_2 N_2) - d_f - m_f - \mathbf{e}_f \right] \quad (4.28)$$

onde $d_f = d_f^S + d_f^R$ e representa a soma do erro sistemático interfrequência do satélite d_f^S e do receptor d_f^R .

4.7 Cálculo do Conteúdo Total de Elétrons na Vertical (VTEC)

O conteúdo total de elétrons na direção vertical (VTEC) é dado por Hofmann-Wellenhof et al., (1994):

$$VTEC = \cos(z') TEC \quad (4.29)$$

onde o valor de z' representa o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico localizado em um plano de altitude média H_m e é obtido através da seguinte equação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994):

$$\text{sen } z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } z \quad (4.30)$$

onde R_m é o raio médio da Terra (6570 km), H_m a altura média da ionosfera (300 km) e z o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - \text{el}$, onde el representa o ângulo de elevação do satélite). A Figura 4.6 ilustra as quantidades envolvidas na equação 4.29.

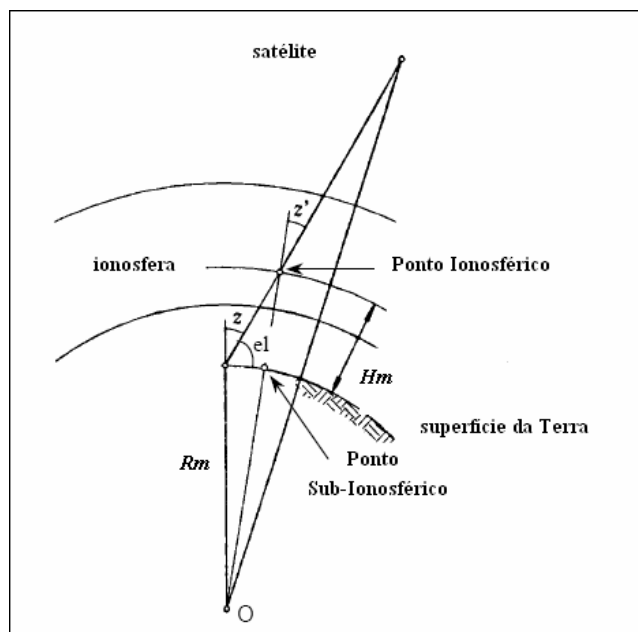


Figura 4.6 – Geometria para o atraso do caminho ionosférico.
FONTE: adaptada de Hofmann-Wellenhof et al., (1994).

4.8 Flutuações de Fase ou Taxas de Variações do TEC (ROT)

As flutuações de fase ou taxas de variações do conteúdo total de elétrons indicam a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala (bolhas ionosféricas) como foram citadas por Mendillo et al., (2000) e Wanninger (1993). Pode-se representar o ROT da seguinte maneira:

$$ROT = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (4.31)$$

onde ΔTEC é a diferença consecutiva entre TECs (sinais GPS) separados pelo seu Δt dado em segundos.

As técnicas de cálculo (VTEC e ROT) são utilizadas no Capítulo 6 para estudos relacionados sobre os efeitos na camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante supertempestades geomagnéticas.

CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Este capítulo descreve a Rede Global IGS (“International GNSS Service – IGS”) e a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) de onde foram obtidos os dados desta pesquisa. Também são descritos o formato do arquivo de dados RINEX e arquivo de órbita SP3. A resolução temporal e o sistema de coordenadas dos parâmetros interplanetários obtidos do satélite ACE também é apresentado. E por último é explicado o porquê da seleção dos dados no período compreendido entre os anos de 2000 e 2005 e as ferramentas computacionais utilizadas para a análise.

5.1 Rede Global IGS

O “International GNSS Service (IGS)” consiste de uma rede de receptores GPS com um propósito científico, cujo objetivo é apoiar as pesquisas geofísicas e geodésicas através da distribuição “on-line” próximo do tempo real de dados de observações GPS utilizados para determinação de órbita de satélites, geração de efemérides, informações sobre os relógios dos satélites e estações, monitoramento ionosférico e da rotação da Terra.

O IGS foi instituído em 1993 pela Associação Internacional de Geodésia (“International Association of Geodesy – IAG”) e começou sua operação em janeiro de 1994. Formado por aproximadamente sete centrais de dados, vários centros de análise e uma rede global com aproximadamente 350 estações de GPS (Figura 5.1) com receptores de dupla frequência operando e recebendo continuamente os sinais. Os receptores recebem os dados brutos e os formatam de acordo com um modelo padrão denominado RINEX (“Receiver

Independent Exchange”). Os dados formatados são enviados aos centros regionais e posteriormente aos globais. Estes por sua vez os mantêm armazenados e os disponibilizam para o acesso “on-line”. Os dados “on-line” são administrados pela NASA através do laboratório de propulsão a jato (“Jet Propulsion Laboratory – JPL”) (NASA, 2004).

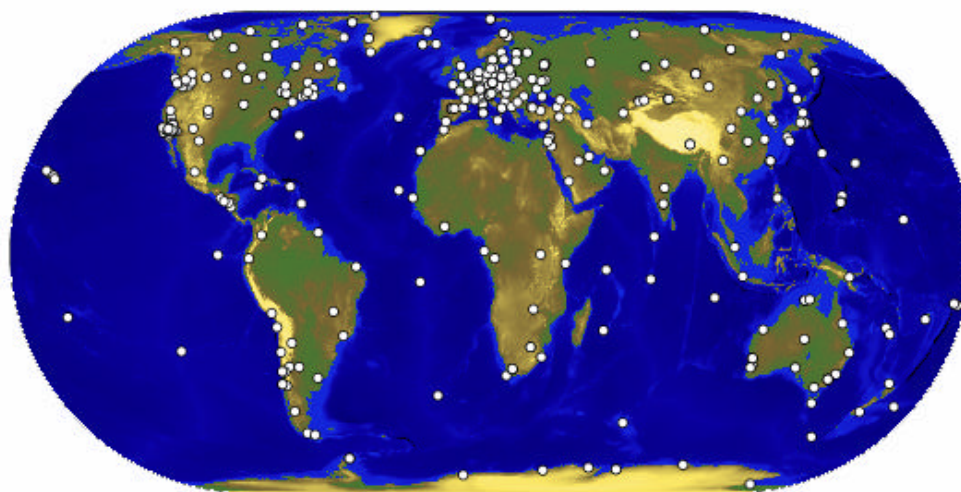


Figura 5.1 – Distribuição geográfica das estações IGS.
FONTE: Nasa (2004).

5.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC)

A RBMC consiste de uma rede de estações com receptores de alto desempenho, rastreando 24 horas ininterruptas ao longo de todo o ano, realizando uma permanente coleta de observações de grande qualidade e confiabilidade, permitindo o cálculo contínuo das coordenadas sobre a superfície terrestre. Além de atender as necessidades do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), atende a qualquer usuário que necessite realizar observações GPS.

A configuração inicial da RBMC contava com nove estações, sendo que, sete estações foram implantadas entre 1996 e 1997 pelo IBGE, com apoio da EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) que recebeu recursos do FNMA (Fundo Nacional do Meio Ambiente) para aquisição dos equipamentos e as outras duas estações integram também a rede IGS. A estação Fortaleza foi instalada no ROEN (Rádio Observatório Espacial do Nordeste) nas dependências do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). A outra estação que também pertence a IGS é a de Brasília, localizada na reserva do Roncador em Brasília – DF, e foi implantada através de um acordo de cooperação entre o IBGE e o JPL (FONSECA JR., 2002).

Em setembro de 2006 a RBMC contava com 22 estações: Belém (BELE), Bom Jesus da Lapa (BOMJ), Brasília (BRAZ), Cananéia (NEIA), Crato (CRAT), Cuiabá (CUIB), Curitiba (PARA), Fortaleza (FORT), Governador Valadares (GVAL), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Montes Claros (MCLA), Porto Alegre (POAL), Presidente Prudente (UEPP), Recife (RECF), Rio de Janeiro (RIOD), Salvador (SALV), Santa Maria (SMAR), Ubatuba (UBAT), Uberlândia (UBER), Varginha (VARG) e Viçosa (VICO) (IBGE, 2006). A princípio, as estações utilizadas nesta pesquisa seriam a Imperatriz, Brasília, Presidente Prudente e Porto Alegre, mas para algumas supertempestades geomagnéticas estudadas os dados destas estações não estavam disponíveis, de modo que foram substituídas pelas estações de Crato, Curitiba, Fortaleza e Belém, conforme foi a necessidade. A Figura 5.2 mostra a distribuição geográfica das estações da RBMC, com destaque (vermelho) para as estações utilizadas. Os dados foram coletados do “website” www.ibge.gov.br no formato RINEX.



Figura 5.2 – Distribuição geográfica das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sinais GPS (RBMC) com destaque em vermelho para as estações utilizadas.

As estações escolhidas no setor brasileiro têm latitude dip variando de $1,2^{\circ}$ N (perto do equador geomagnético) a $20,7^{\circ}$ S (estação mais afastada da região equatorial geomagnética), que cobre bem a região equatorial e de baixa latitude. O ângulo de declinação magnética no setor brasileiro é aproximadamente 20° a oeste do meridiano geográfico e as

estações escolhidas podem ser consideradas aproximadamente alinhadas ao longo do campo geomagnético. A Tabela 5.1 apresenta a localização de cada estação utilizada.

Tabela 5.1 – Cidade, Sigla, Latitude e Longitude Geográfica e Latitude dip referente a cada estação utilizada na pesquisa.

Cidade	Sigla	Latitude	Longitude	Latitude dip
Imperatriz	IMPZ	5,5° S	47,5° O	2,9° S
Brasília	BRAZ	15,9° S	47,9° O	11,7° S
Presidente Prudente	UEPP	22,3° S	51,4° O	14,9° S
Porto Alegre	POAL	30,1° S	51,1° O	20,7° S
Crato	CRAT	7,2° S	39,4° O	9,5° S
Curitiba	PARA	25,4° S	49,2° O	19,1° S
Fortaleza	FORT	3,9° S	38,4° O	7,1° S
Belém	BELE	1,4° S	48,4° O	1,2° N

5.3 Formato RINEX

O formato RINEX (“Receiver Independent Exchange” – formato independente de receptor) foi desenvolvido pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berne (“Astronomical Institute of the University of Berne”) com o objetivo de facilitar a troca dos dados coletados na campanha EUREF 89, em que envolveu mais de 60 receptores GPS de quatro diferentes fabricantes (GURTNER, 2006). Este formato possui uma padronização para o processamento dos dados obtidos em diversos tipos de receptores sendo o mais utilizado por usuários e fabricantes.

O formato RINEX é composto por três arquivos ASCII: arquivo de observações, dados meteorológicos e mensagens de navegação. Cada arquivo de observações refere-se a um determinado dia e estação receptora, contendo uma seção de cabeçalho e uma seção de dados. A seção de cabeçalho contém informações gerais do arquivo e a seção de dados contém a pseudodistância (metros), fase (ciclos) e a hora GPS (instante de observação). O arquivo utilizado nesta pesquisa foi o de observações e seu formato pode ser visto no Anexo A, seção A.1.

5.4 Formato SP3

O NGS (“National Geodetic Survey”) introduziu em 1985 um formato padrão para as órbitas dos satélites GPS, designada por “Standard Product # 1 (SP1)”, na qual fornecia tipos de órbitas e sistemas de coordenadas. Em 1991, o NGS propôs um novo formato que se designou por “Standard Product # 3 (SP3)”, semelhante ao formato original, mas com a correção dos relógios dos satélites inclusos, visando padronizar os formatos de órbita de satélites (SPOFFORD ; REMONDI, 2006), que foram denominadas efemérides precisas.

Inicialmente as efemérides precisas eram coletadas em dez estações distribuídas globalmente e disponibilizadas apenas a usuários autorizados. Posteriormente, podem-se obter as efemérides precisas através de instituições civis como a CIGNET (“Cooperative International GPS Network” – Rede Cooperativa Internacional de GPS) sob a coordenação do NGS incorporada ao IGS (MONICO, 2000).

Os arquivos de dados no formato SP3 são referenciados pela hora GPS, velocidade (dm/seg) e posição (km) do centro de massa do satélite para intervalos de 15 minutos. Os dados possuem três formatos: o IGS resultante da combinação das órbitas dos vários centros

de análises disponíveis dentro de um período de 7 a 10 dias após a coleta dos dados, o IGR em que são órbitas IGS rápidas, disponíveis dentro de até 48 horas e o IGU em que são órbitas IGS ultra-rápidas, disponíveis com antecedência de algumas horas do dia a que se refere (MONICO, 2000). O formato utilizado nesta pesquisa pode ser visto no Anexo A, seção A.2.

5.5 Satélite ACE

O satélite ACE (“Advanced Composition Explorer”) foi lançado do Centro Espacial “Kennedy” no centro da Flórida em 25 de agosto de 1997 sob responsabilidade da NASA, com o objetivo de fornecer dados das variações do campo magnético interplanetário e vento solar. O satélite ACE possui instrumentos como Espectrômetro de Raios Cósmicos, Espectrômetro Solar, Espectrômetro de Ultra Baixa Energia, Espectrômetro de Vento Solar (massa e composição iônica), Analisador de Partículas Energéticas Solares (íons carregados), Magnetômetro e Monitor de Prótons, Elétrons e partículas Alfa. O satélite ACE orbita o ponto Lagrangeano L1, que é um ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra a uma localização de aproximadamente 1,5 milhões de km da Terra e 148,5 milhões de km do Sol. Com um semi-eixo principal de aproximadamente 200.000 km, a órbita elíptica dispõe o ACE a uma visão ininterrupta do Sol e regiões galácticas (ACE, 2005). Os dados do campo magnético interplanetário total, componente vertical do campo magnético interplanetário, densidade e velocidade do vento solar, foram obtidos de <http://www.srl.caltech.edu/ace/>, com resolução temporal de 64 segundos no sistema de coordenadas GSM (“Geocentric Solar Magnetospheric”). O sistema GSM possui o vetor z orientado no eixo do dipolo da Terra, vetor x apontado na linha Sol-Terra e vetor y completando os eixos. A ilustração do satélite ACE pode ser visto na Figura 5.3.

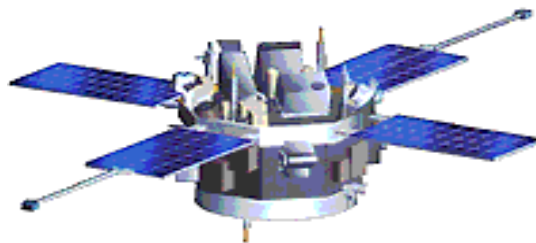


Figura 5.3 – Ilustração do satélite ACE.
FONTE: ACE (2005).

5.6 Período de Dados Analisados

Foi analisado o índice de atividade geomagnética Dst (valores de hora em hora) durante o período de 1976 até 2006 que inclui os ciclos solares 21, 22 e 23. Considerando condições para supertempestades geomagnéticas com $|Dst| > 250$ nT, foi constatado que o número máximo de eventos com supertempestades (9 eventos) ocorreram durante a fase descendente do ciclo solar 23 (2000 até 2006) entre os anos de 2000 e 2005 (Tabela 5.2). Também durante este período do ciclo solar 23, a RBMC/IGS ofereceu bons conjuntos de dados de GPS no setor brasileiro. Os dados de GPS foram utilizados para o cálculo do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT). Sendo assim, foram analisados estes nove eventos da fase descendente do ciclo solar 23 a fim de se obter os efeitos na camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro.

Tabela 5.2 – Histórico de supertempestades geomagnéticas ($|Dst| > 250$ nT) para os ciclos solares 21, 22 e 23 e o número de supertempestades em cada ciclo.

$Dst > 250$ nT					
Ciclo Solar 21		Ciclo Solar 22		Ciclo Solar 23	
ASC.	DESC.	ASC.	DESC.	ASC.	DESC.
1976-1979	1979-1986	1986-1989	1989-1996	1996-2000	2000-2006
0	4	4	5	0	9

FONTE: Final [1957-2003] Dst Index (2006).

5.7 Ferramentas Computacionais Utilizadas

A determinação do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) a partir de dados de GPS tiveram início com a aquisição de dois programas em linguagem “Fortran”, desenvolvidos na Universidade de Nagoya no Japão. Estes programas passaram por modificações na Universidade do Vale do Paraíba em São José dos Campos – SP, até alcançar o formato em que se encontram atualmente.

O primeiro programa desenvolvido teve como objetivo o cálculo do TEC através da observável pseudodistância filtrada pela observável fase da onda portadora em L_1 e L_2 transmitidos pelos satélites da constelação GPS, a fim de obter uma estimativa mais adequada. Os sinais dos satélites recebidos pela RBMC/IGS estão no campo de visão sob um ângulo de elevação a partir de 10° ao redor de cada estação e os sinais utilizados no cálculo do TEC estão sob um ângulo de elevação de 30° . Após serem gerados os arquivos com os cálculos do TEC, um segundo programa foi utilizado para o cálculo do VTEC e flutuações de fase (ROT). Para esse programa são passados (via teclado) importantes parâmetros como: o arquivo TEC, a hora inicial e final para uma sessão (normalmente com duração de 24 horas), o número de satélites

rastreados (todos os satélites) e o arquivo de efemérides (SP3). Assim, são gerados os arquivos com os dados e gráficos do VTEC e flutuações de fase (ROT). Os gráficos do VTEC (sinais em linhas vermelhas sobrepostas aos sinais em linhas verdes) foram gerados por um programa em linguagem “Visual Basic” desenvolvido pelo autor desta pesquisa.

Espera-se então que com os gráficos do VTEC e das flutuações de fase (ROT) gerados, será possível obter uma análise do comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante os nove eventos de supertempestades geomagnéticas, conforme será visto no Capítulo 6.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados do VTEC e ROT obtidos no setor brasileiro durante os nove eventos escolhidos que inclui supertempestades geomagnéticas. Os dados de GPS foram utilizados para calcular as medidas do “Vertical Total Electron Content (VTEC)” e as flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT). Também são apresentadas as variações temporais dos parâmetros interplanetários (B, Bz, Np e Vp) e os índices geomagnéticos (Dst, Kp e AE).

6.1 Definição dos Padrões de Dados Utilizados

Para o estudo da camada F em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante ocorrências de supertempestades geomagnéticas, foram utilizados os dados de GPS da rede RBMC/IGS. A Tabela 6.1 abaixo apresenta os eventos (estações e dias das observações) analisados e apresenta também a média mensal de manchas solares indicando o estado de atividade solar. A hora da ocorrência de SSC/GSC para cada evento estudado foi obtida diretamente de um catálogo no “website” do índice Kp, disponível em <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>.

Tabela 6.1 – Média mensal de manchas solares, estações de GPS da rede RBMC/IGS, dias analisados e dia considerado geomagneticamente calmo para cada evento estudado. Também são incluídas as ocorrências de SSC/GSC (dia e hora).

Eventos	Média mensal de manchas solares	Estações de GPS	Dias analisados / Dia calmo	SSC / GSC* - dia e hora (UT)
1 - abril 2000	125,5	IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL	5, 6, 7, 8 / 5	6d às 16h 40m
2 - julho 2000	170,1	BRAZ, UEPP e PARA	14, 15, 16, 17 / 17	15d às 14h 37m
3 - março 2001	113,5	FORT, BRAZ, UEPP e POAL	30, 31, 1, 2, 3 / 3	* 31d à 1h
4 - abril 2001	107,7	IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL	10, 11, 12, 13, 14 / 10	11d às 15h 19m
5 - novembro 2001	106,5	CRAT, BRAZ e PARA	3, 4, 5, 6, 7 / 3	6d às 1h 52m
6 - outubro 2003	65,5	IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL	27, 28, 29, 30, 31 / 27	29d às 6h 11m 30d às 10h 29m
7 - novembro 2003	67,3	IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL	19, 20, 21, 22, 23 / 19	20d às 8h 3m
8 - novembro 2004	43,5	BELE, BRAZ, UEPP e POAL	6, 7, 8, 9, 10, 11 / 6	7d às 10h 52m 7d às 18h 28m 9d às 9h 31m
9 - maio 2005	42,7	BELE, BRAZ, UEPP e POAL	14, 15, 16, 17 / 14	15d às 2h 39m

Para cada evento foram gerados gráficos distintos, cujos mesmos foram padronizados em três diferentes tipos: gráfico de parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos, gráfico do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e gráfico de flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT).

O gráfico de parâmetros interplanetários mostra os seguintes dados: campo magnético interplanetário total (B), componente vertical do campo magnético interplanetário (Bz), densidade de prótons (Np) do vento solar e velocidade (Vp) do vento solar, índices geomagnéticos Dst (valores a cada hora), Kp (valores a cada 3 horas) e AE. O gráfico do

período inclui também, dia(s) geomagneticamente calmo(s), dia(s) geomagneticamente perturbado(s) e fases da tempestade geomagnética.

O gráfico do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC medido em TECU) apresenta dados de GPS da rede RBMC/IGS. Os valores do VTEC em linhas verdes referem-se ao dia escolhido como geomagneticamente calmo e são repetidos para todos os dias do evento. Os valores do VTEC em linhas vermelhas referem-se ao(s) dia(s) que incluem respectivamente o(s) dia(s) geomagneticamente perturbado(s), fase principal e a fase de recuperação. A linha tracejada vertical indica o horário em que ocorreu o “sudden storm commencement (SSC)” ou “gradual storm commencement (GSC)”. A abscissa mostra o tempo universal representado por UT e o tempo local ao topo representado por LT.

O gráfico de flutuações de fase (ROT medido em TECU/min) por estação, foi baseado no trabalho de Aarons et al., (1996). Mendillo et al., (2000) indicam que a apresentação do ROT neste modo inclui variações do TEC e potencialmente todo o caminho da camada F. Este gráfico possui o mesmo padrão de formatação do gráfico anterior.

Variações dia para dia e sazonal

Como é discutido por Kelley et al., (2006), durante o período geomagneticamente calmo ocorre “equatorial spread F (ESF)” na região equatorial, entretanto a ocorrência de “ESF” tem variações dia para dia (MENDILLO et al., 1992) e sazonal (MARUYAMA e MATUURA, 1984; TSUNODA, 1985). No setor brasileiro, Sahai et al., (2000) mostram que a ocorrência sazonal de bolhas ionosféricas baseado nas observações do imageador “All-Sky” com emissão OI 630 nm, tem máximo entre os meses de outubro e março, diminuindo bastante entre maio e agosto. Neste estudo são apresentados os principais efeitos observados

na camada F em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante os vários eventos de supertempestades apresentados na Tabela 6.1.

6.2 Supertempestade ocorrida em Abril de 2000 (evento 1)

A Figura 6.1 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.2 e 6.3 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo 2,9° S a 20,7° S.

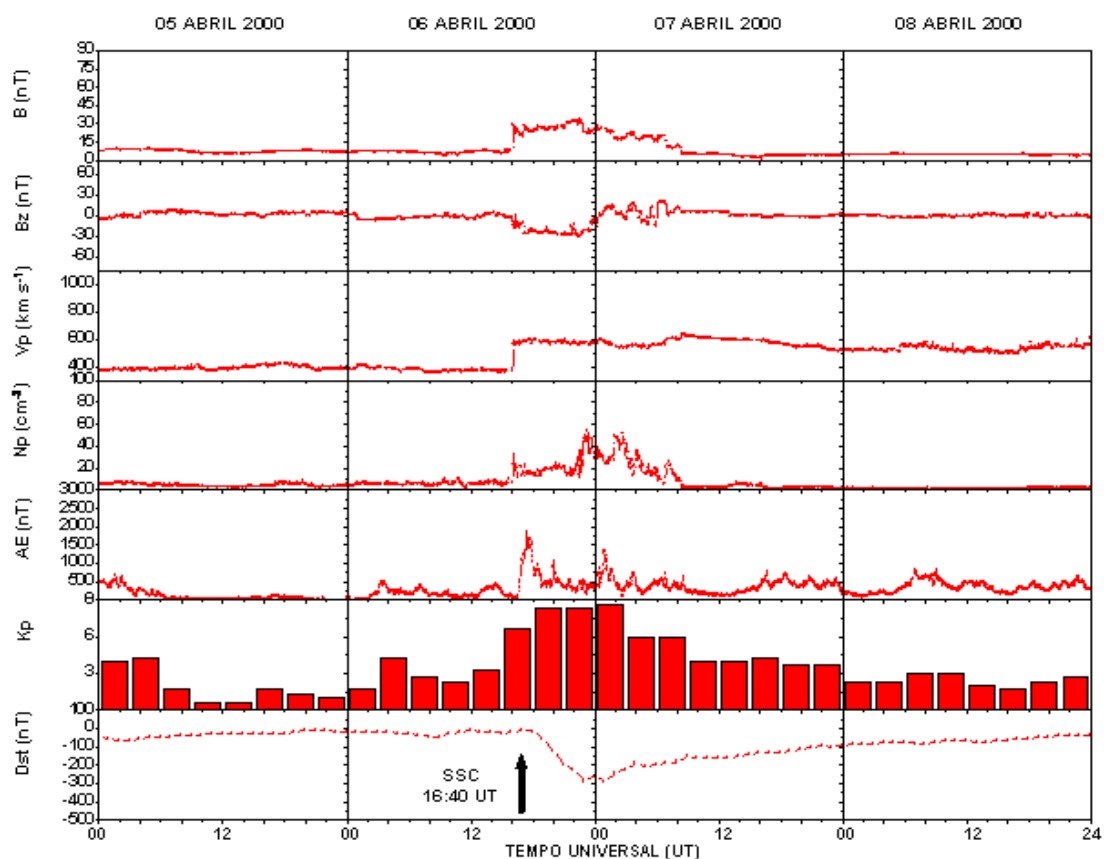


Figura 6.1 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 5 e 8 de abril de 2000.

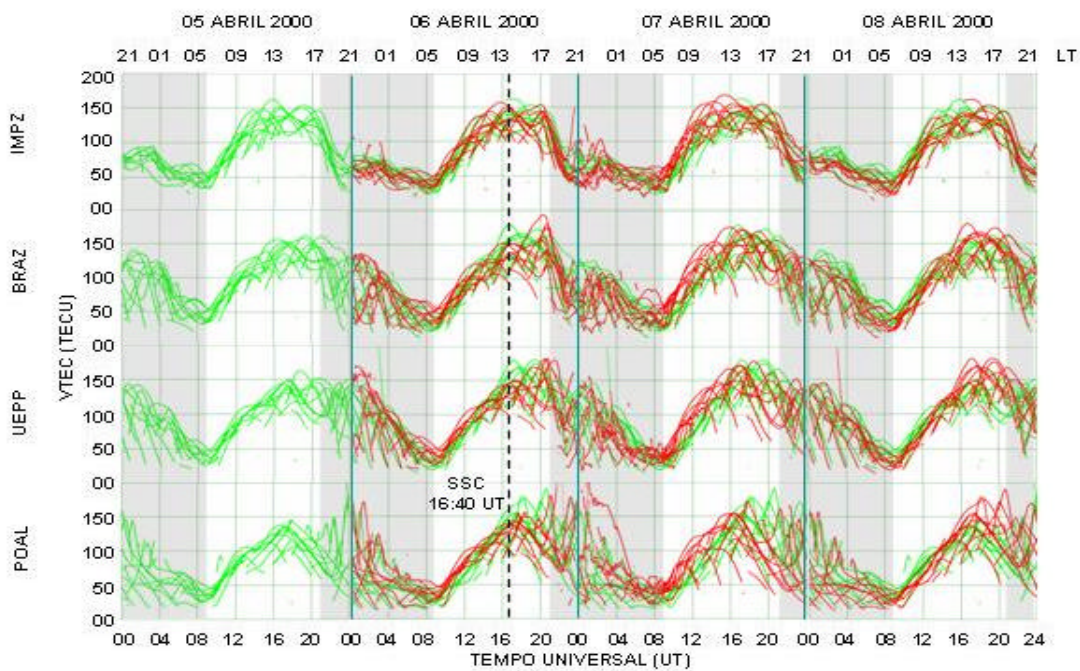


Figura 6.2 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

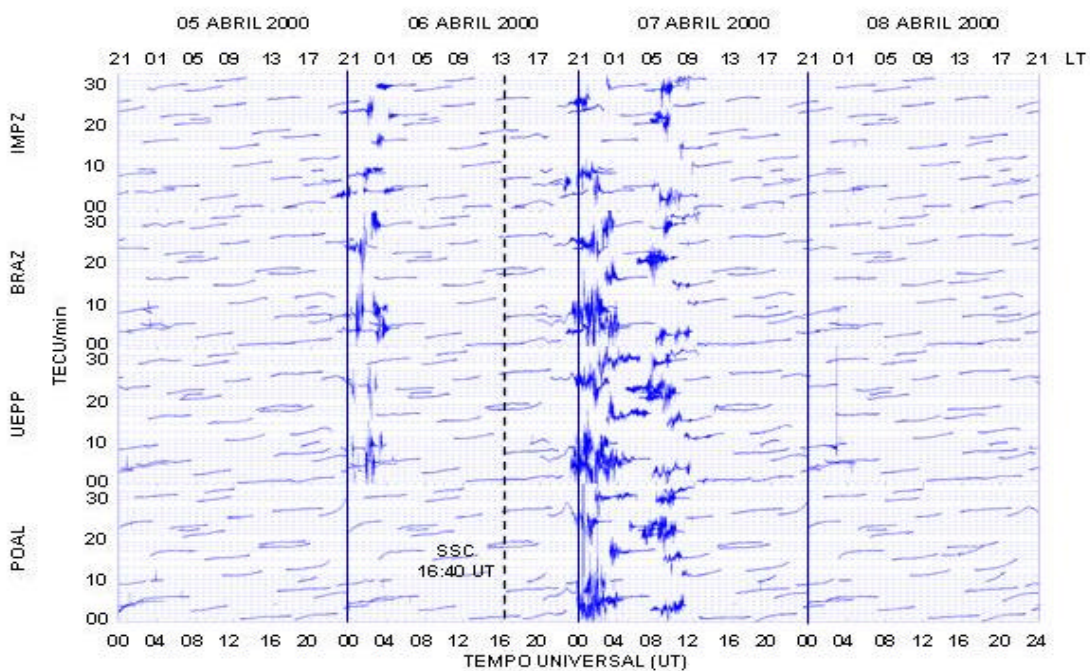


Figura 6.3 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 5 e 8 de abril de 2000 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

A Figura 6.3 mostra flutuações de fase somente na noite de 5-6 de abril (noite geomagneticamente calma), antes da ocorrência de SSC (16:40 UT) nas estações de IMPZ, BRAZ e UEPP no horário entre aproximadamente 20:00 LT e 1:00 LT e na noite de 6-7 de abril (durante fase principal da tempestade geomagnética) em todas as estações no horário entre aproximadamente 20:00 LT e 08:00 LT. Estas flutuações de fase são devidas à presença de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas ionosféricas. Pode-se mencionar que nas noites de 4-5, 7-8 e 8-9 (calmo ou fase de recuperação) não há presença de flutuações de fase (Figura 6.3). Esse fato é talvez devido às variações dia para dia na ocorrência de “ESF”. Depois da ocorrência de SSC, a Figura 6.1 mostra uma rápida diminuição do Dst (~60 nT/h durante 19-23 UT), que dá condição apropriada para penetração rápida de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude para região equatorial (BASU et al., 2005). A Figura 6.2 mostra que possivelmente durante o período do pôr-do-sol o campo elétrico penetrando de alta latitude se associa ao campo elétrico normal e a camada F tem forte subida na região equatorial (IMPZ). Como é discutido por Basu et al., (2001), a forte diminuição do VTEC em IMPZ no horário do pôr-do-sol indica rápida subida da camada F na região equatorial resultando em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixa latitude (ex., BRAZ, UEPP e POAL). A Figura 6.3 mostra que a rápida subida da camada F na região equatorial resultou nas fortes flutuações de fase durante a noite de 6-7 de abril. As flutuações mais fortes são observadas nas regiões afastadas do equador geomagnético (ex., BRAZ e UEPP), onde a densidade eletrônica na camada F é alta (BASU et al., 2001).

6.3 Supertempestade ocorrida em Julho de 2000 (evento 2)

A Figura 6.4 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.5 e 6.6 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de BRAZ, UEPP e PARA com latitude dip cobrindo $11,7^\circ$ S a $19,1^\circ$ S. Por haver falta de dados não foi possível incluir uma estação perto do equador geomagnético. Os dados de V_p e N_p do vento solar obtido do satélite ACE não estavam disponíveis para este evento.

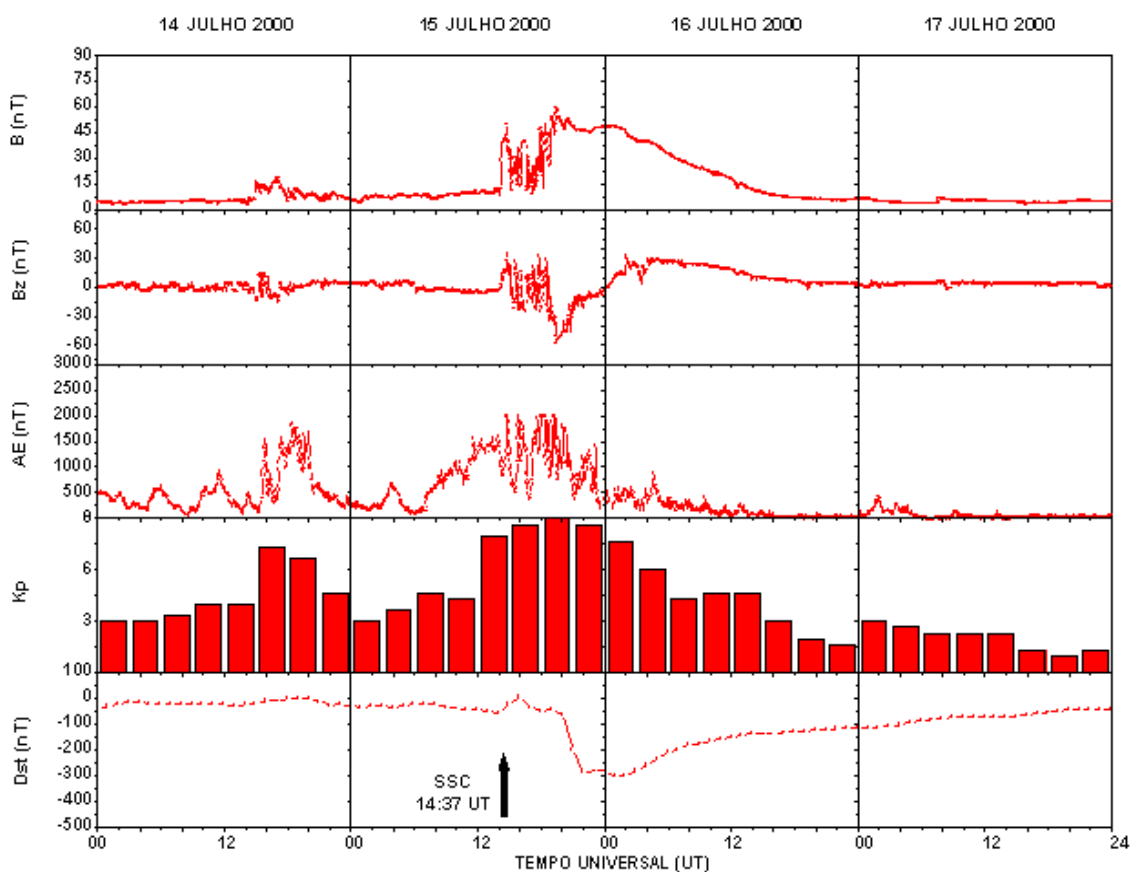


Figura 6.4 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 14 e 17 de julho de 2000.

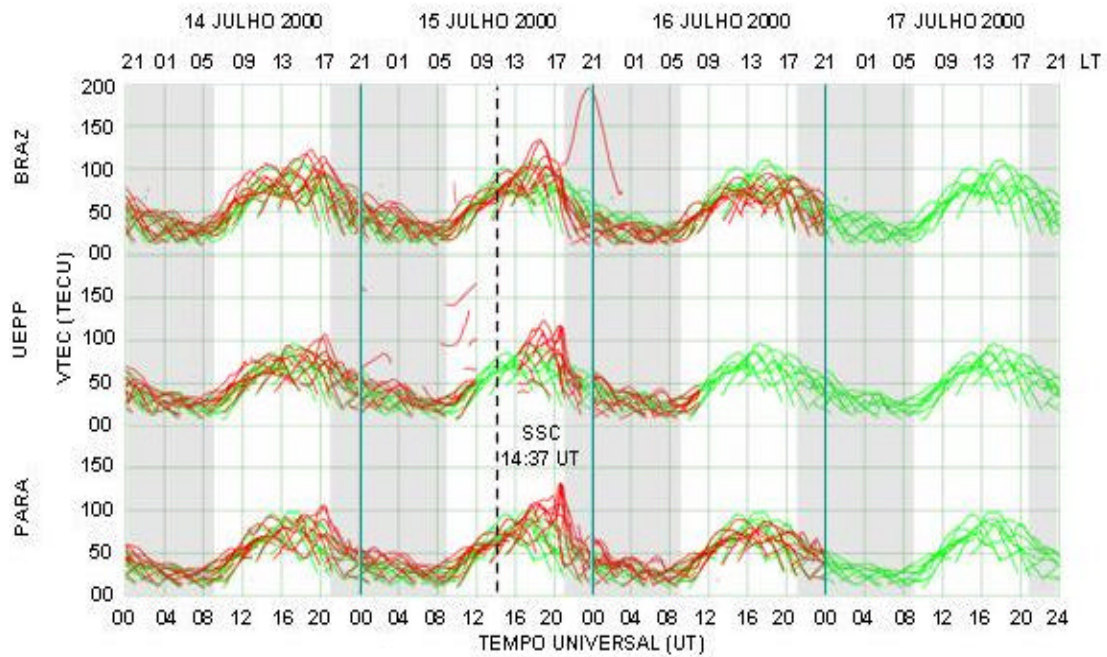


Figura 6.5 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 14 e 17 de julho de 2000 para as estações de BRAZ, UEPP e PARA.

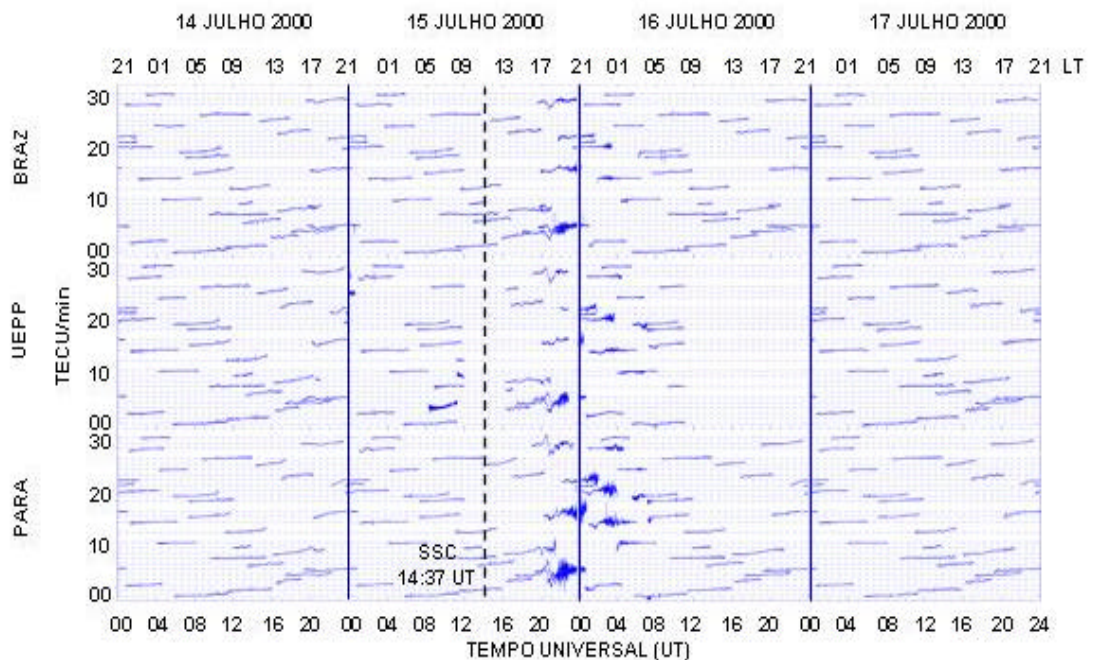


Figura 6.6 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 14 e 17 de julho de 2000 para as estações de BRAZ, UEPP e PARA.

A Figura 6.6 mostra na estação de UEPP ausência de dados no dia 15 de julho no horário entre aproximadamente 9:00 LT e 13:00 LT e dia 16 de julho no horário entre aproximadamente 8:00 LT e 21:00 LT. A Figura 6.6 mostra na noite de 14-15 de julho antes da ocorrência de SSC e nas noites de 16-17 e 17-18 de julho (noites que incluem as fases de recuperação) nas estações de BRAZ, UEPP e PARA a ausência de flutuações de fase. A Figura 6.5 mostra o primeiro aumento do VTEC na estação de PARA no dia 15 de julho (~14:30 LT), propagando-se rapidamente para a estação de BRAZ durante um período de aproximadamente 20 minutos. À distância de aproximadamente 1100 km entre PARA e BRAZ indica uma velocidade de propagação sul para norte de aproximadamente 1000 m s^{-1} . As perturbações observadas são possivelmente geradas pelas perturbações ionosféricas em movimento (“Travelling Ionospheric Disturbances – TIDs”) de alta velocidade. A Figura 6.4 mostra um forte aumento no índice AE indicando aquecimento “Joule” na região auroral gerando TIDs com alta velocidade ($\sim 1200 \text{ m s}^{-1}$; velocidade primeiramente comprovada por KILLEEN et al., 1984 e HAJKOWICZ, 1990). O segundo aumento do VTEC observado claramente nas estações de UEPP e PARA perto do pôr-do-sol, talvez esteja ligado com a subida da camada F na região equatorial. Essa subida da camada F é possivelmente devida à rápida diminuição do Dst ($\sim 110 \text{ nT/h}$ durante 20-22 UT), que dá condição apropriada para ocorrência de penetração rápida de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude em direção a região equatorial. A rápida subida da camada F na região equatorial devida a penetração rápida de campos elétricos resulta em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixas latitudes observadas em UEPP e PARA. Depois da subida da camada F na região equatorial, a Figura 6.6 mostra uma pequena flutuação de fase durante a noite de 15-16 de julho no horário entre aproximadamente 19:00 LT e 1:00 LT, com aumento nas regiões mais afastadas do equador geomagnético (ex., PARA). Como é discutido por Basu et al.,

(2001), a fraca flutuação de fase nas regiões mais próximas ao equador geomagnético (BRAZ e UEPP) é devida à baixa densidade eletrônica na camada F uma vez que a camada F subiu muito devido à penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos.

6.4 Supertempestade ocorrida em Março de 2001 (evento 3)

A Figura 6.7 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.8 e 6.9 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de FORT, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo de $7,1^{\circ}$ S a $20,7^{\circ}$ S.

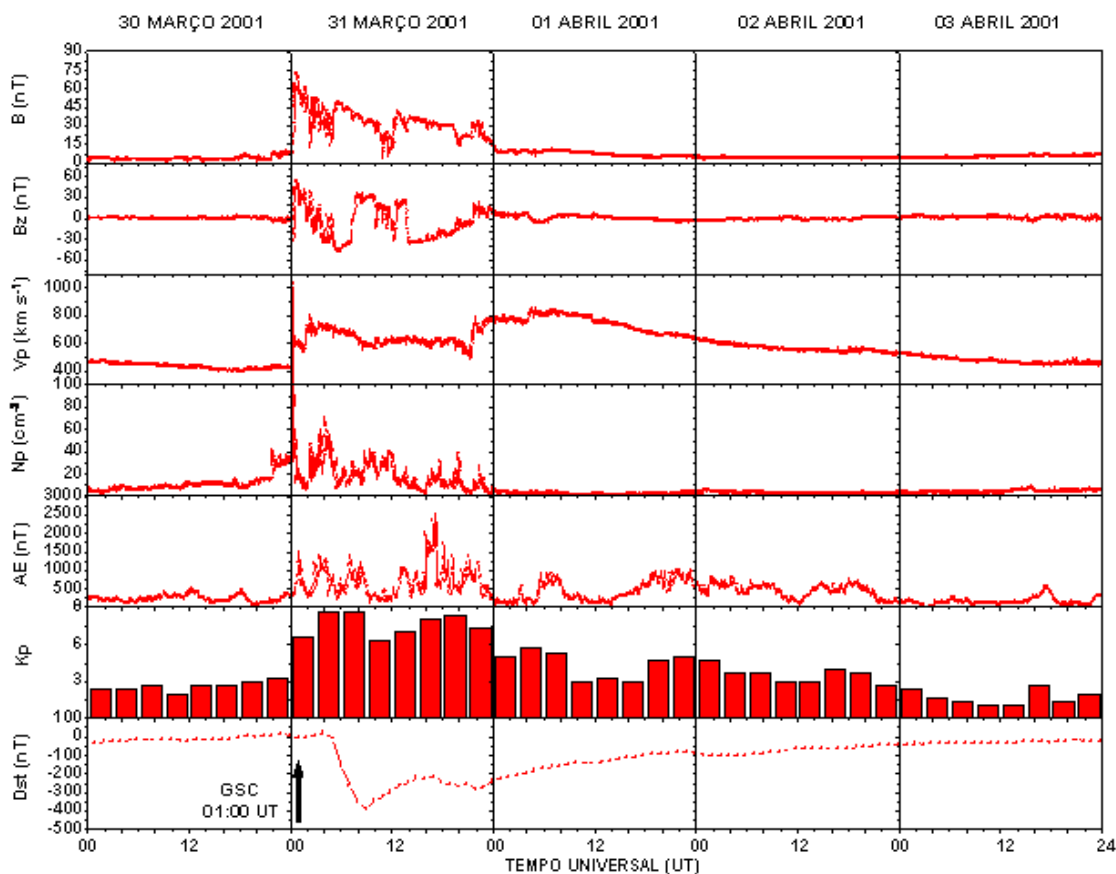


Figura 6.7 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001.

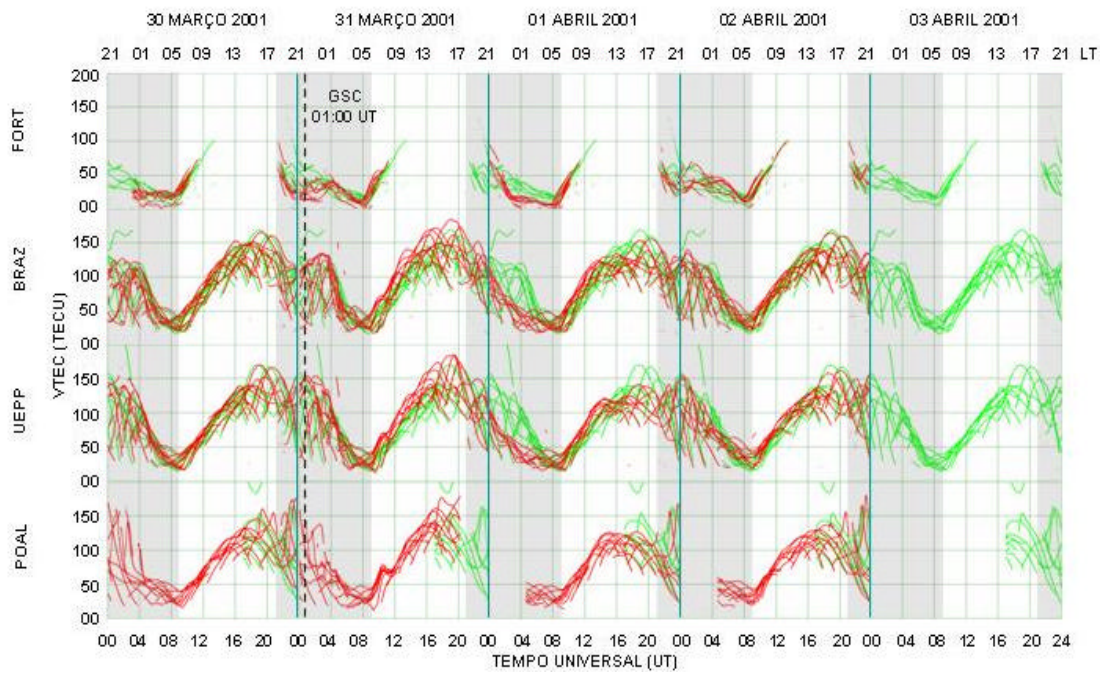


Figura 6.8 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001 para as estações de FORT, BRAZ, UEPP e POAL.

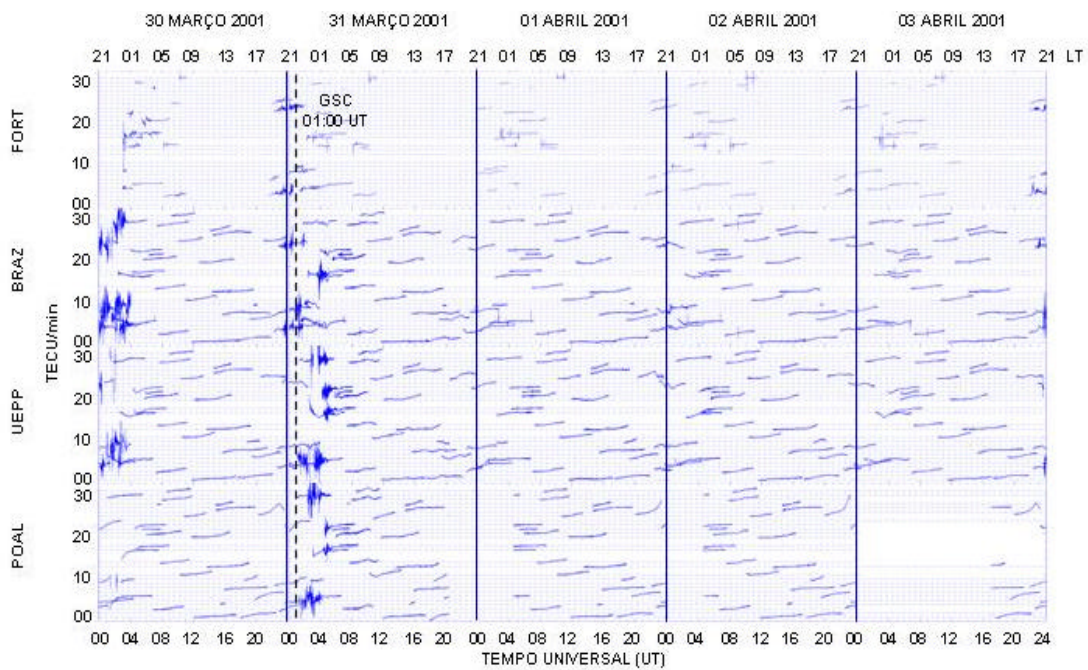


Figura 6.9 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 30 de março e 3 de abril de 2001 para as estações de FORT, BRAZ, UEPP e POAL.

A Figura 6.8 mostra na estação de FORT ausência de dados para todos os dias do evento (30 de março a 3 de abril) no horário entre aproximadamente 9:00 LT e 18:00 LT (parte diurna) e na noite de 29-30 de março no horário entre aproximadamente 21:00 LT e 1:00 LT. A Figura 6.8 mostra também na estação de POAL ausência de dados na noite de 31-01 de abril no horário entre aproximadamente 17:00 LT e 2:00 LT (parte diurna e noturna), na noite de 2 de abril no horário entre aproximadamente 21:00 LT e 2:00 LT (parte noturna) e no dia 3 de abril no horário entre aproximadamente 21:00 LT e 14:00 LT (parte noturna e diurna). A Figura 6.9 mostra flutuações de fase nas noites de 29-30 (BRAZ e UEPP; ausência de dados para FORT) e 30-31 (FORT, BRAZ, UEPP e POAL). As observações de flutuações de fase nas noites de 29-30 e 30-31 são relacionadas com irregularidades ionosféricas na camada F devida às variações dia para dia e períodos geomagneticamente calmos. Depois da ocorrência de GSC (1:00 UT), Sahai et al., (2004), mostram uma grande subida na camada F (~05:00 UT) utilizando dados de sondagem ionosférica em São José dos Campos. Essa subida da camada F observada está relacionada com a penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude para região equatorial durante a rápida diminuição do Dst (~95 nT/h durante 5-9 UT). A Figura 6.8 mostra aumento do VTEC (BRAZ, UEPP e POAL) no horário de aproximadamente 10:00 UT devido à subida da camada F na região equatorial e difusão de plasma ionosférico para latitudes afastadas do equador geomagnético formando uma incomum anomalia equatorial ionosférica durante a parte da manhã (ver também outros estudos sobre incomum anomalia equatorial ionosférica em Batista et al., (2006). A Figura 6.9 mostra também nas noites de 31-1, 1-2 e 2-3 (noite geomagneticamente calma) uma completa ausência de flutuações de fase, devida às variações dia para dia.

6.5 Supertempestade ocorrida em Abril de 2001 (evento 4)

A Figura 6.10 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.11 e 6.12 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo $2,9^{\circ}$ S a $20,7^{\circ}$ S. Para este evento foram analisados dados entre os dias 10 e 14 de abril, com exceção feita a estação de IMPZ que por não dispor de dados no dia 10 de abril, foi analisado o dia 3 de abril como dia geomagneticamente calmo (Figuras 6.11 e 6.12).

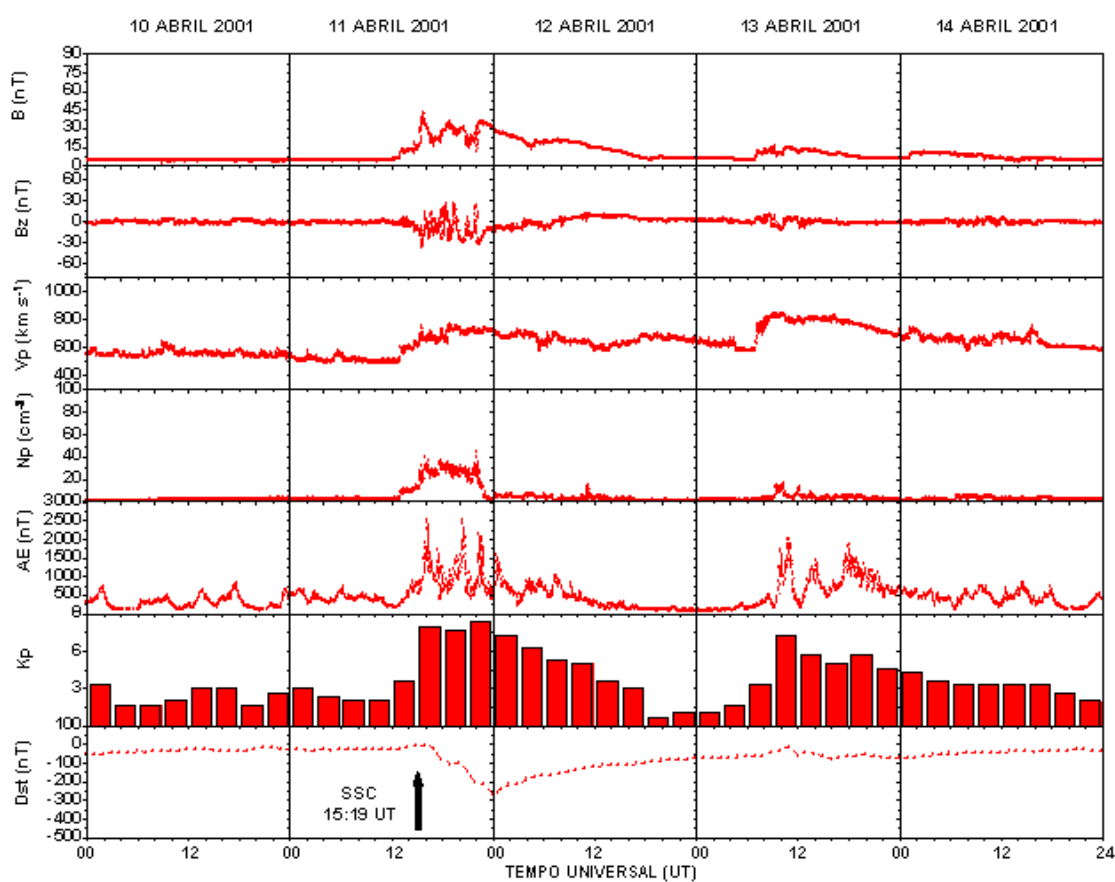


Figura 6.10 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 10 e 14 de abril de 2001.

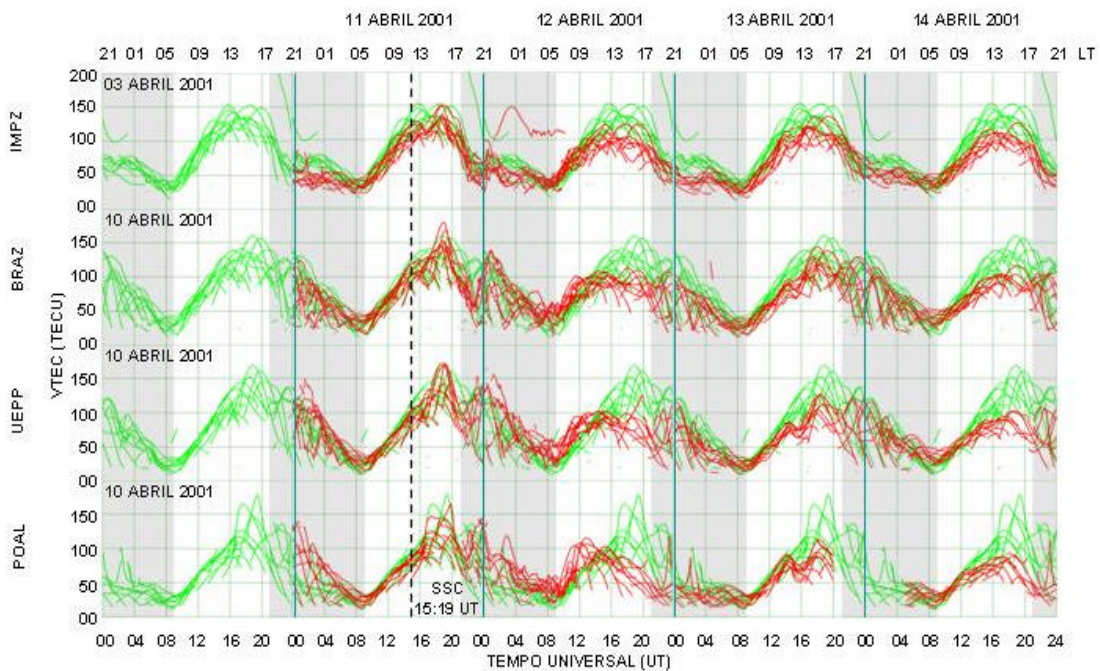


Figura 6.11 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) para o dia 3 de abril de 2001 para a estação de IMPZ e entre os dias 10 e 14 de abril de 2001 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

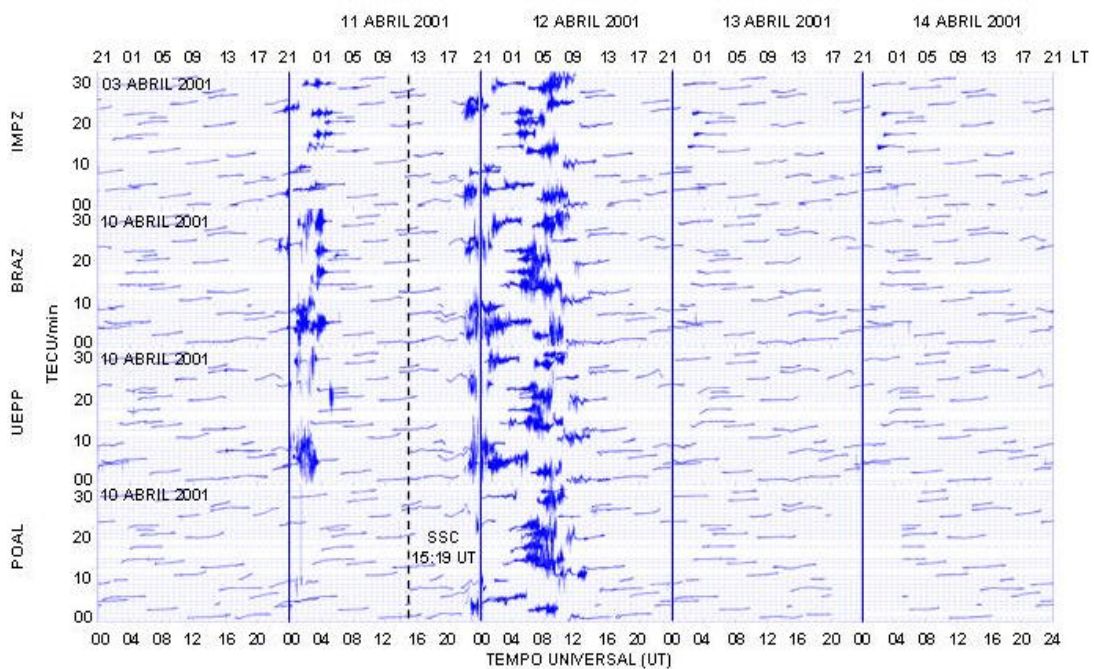


Figura 6.12 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) para o dia 3 de abril de 2001 para a estação de IMPZ e entre os dias 10 e 14 de abril de 2001 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

A estação de POAL na noite de 13-14 de abril (fase de recuperação) não dispunha de dados no horário entre aproximadamente 17:00 LT e 1:00 LT (parte diurna e noturna). A Figura 6.12 mostra flutuações de fase na noite de 10-11 de abril antes da tempestade (IMPZ, BRAZ e UEPP) e na noite de 11-12 de abril durante a fase principal da tempestade (IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL). A Figura 6.11 mostra aumento do VTEC, aproximadamente 18:00 UT do dia 11 de abril, possivelmente associado com a anomalia equatorial ionosférica uma vez que, este aumento é semelhante ao aumento do dia 10 de abril no mesmo horário (~18:00 UT). O aumento do VTEC a 1:00 UT do dia 12 de abril está mais acentuado em BRAZ e UEPP, talvez indicando penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude para região equatorial. As flutuações de fase observadas na noite de 10-11 de abril estão relacionadas com as variações dia para dia (não relacionadas com tempestades geomagnéticas). As fortes flutuações de fase ocorridas na noite de 11-12 de abril, mais intensificadas nos horários entre 4:00 UT e 9:00 UT (12 de abril) após a ocorrência de SSC (15:19 UT do dia 11 de abril), estão relacionadas com a subida da camada F (devido à penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude) resultando em geração de irregularidades ionosféricas. A Figura 6.11 mostra também oscilações do VTEC durante o dia 13 de abril (parte diurna, mais acentuada em UEPP e POAL), podendo estar relacionadas com fortes flutuações do índice AE ou campo elétrico devido a distúrbios do dínamo. Pode-se mencionar que talvez devido à continuação do período perturbado durante a fase de recuperação (Figura 6.10) a anomalia equatorial ionosférica não se desenvolveu nos dias 12, 13 e 14 de abril e nas noites de 12-13 e 13-14 não houve presença de flutuações de fase em razão da tempestade geomagnética (Figura 6.12) (MARTINIS et al., 2005).

6.6 Supertempestade ocorrida em Novembro de 2001 (evento 5)

A Figura 6.13 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.14 e 6.15 mostram o VTEC e as flutuações de fase somente das estações de CRAT, BRAZ e PARA com latitude dip cobrindo 9,5° S a 19,1° S, por haver ausência de dados em outras estações. Os dados de V_p e N_p do vento solar obtido do satélite ACE não estavam disponíveis para este evento.

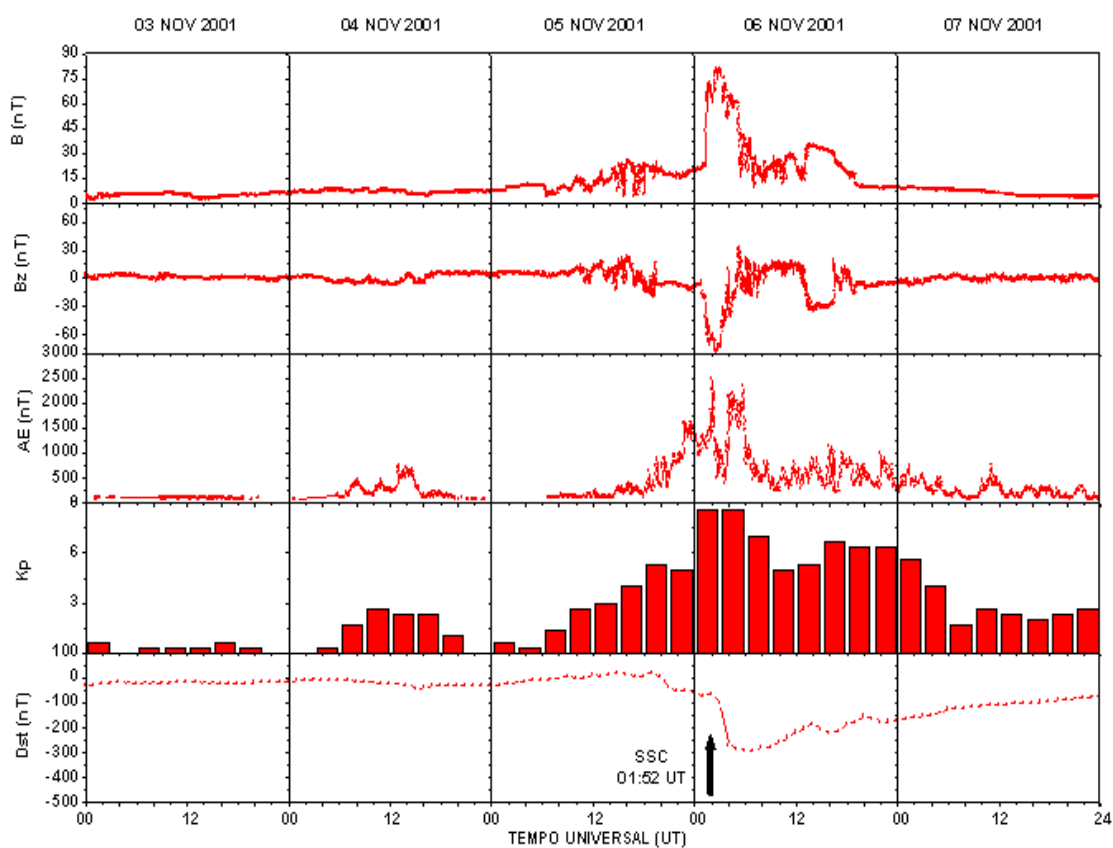


Figura 6.13 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001.

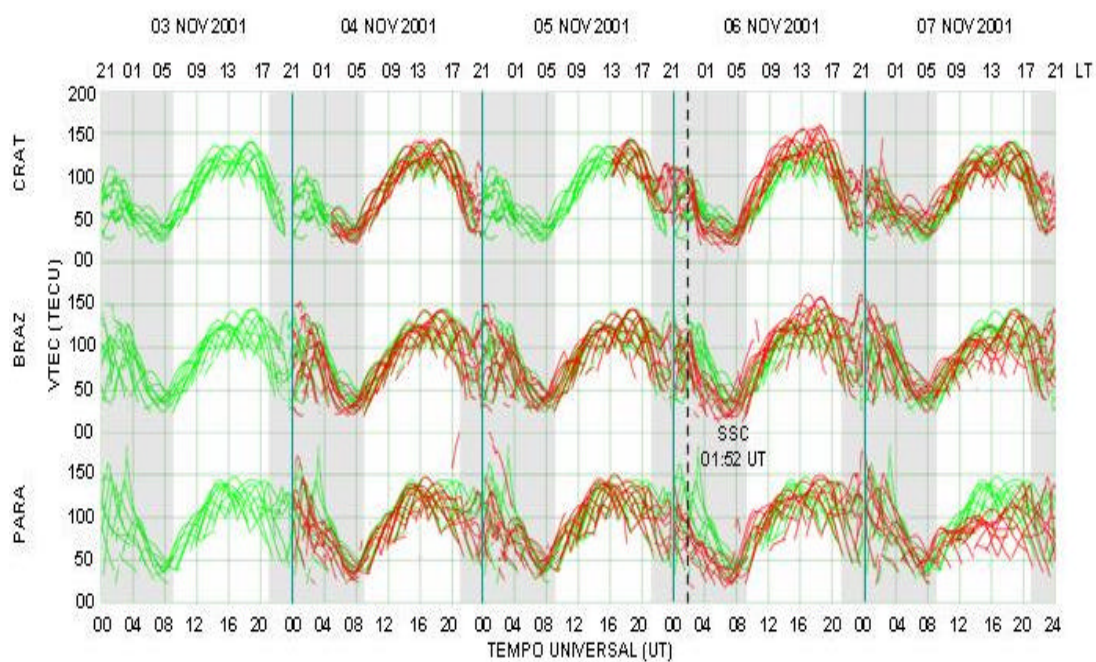


Figura 6.14 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001 para as estações de CRAT, BRAZ e PARA.

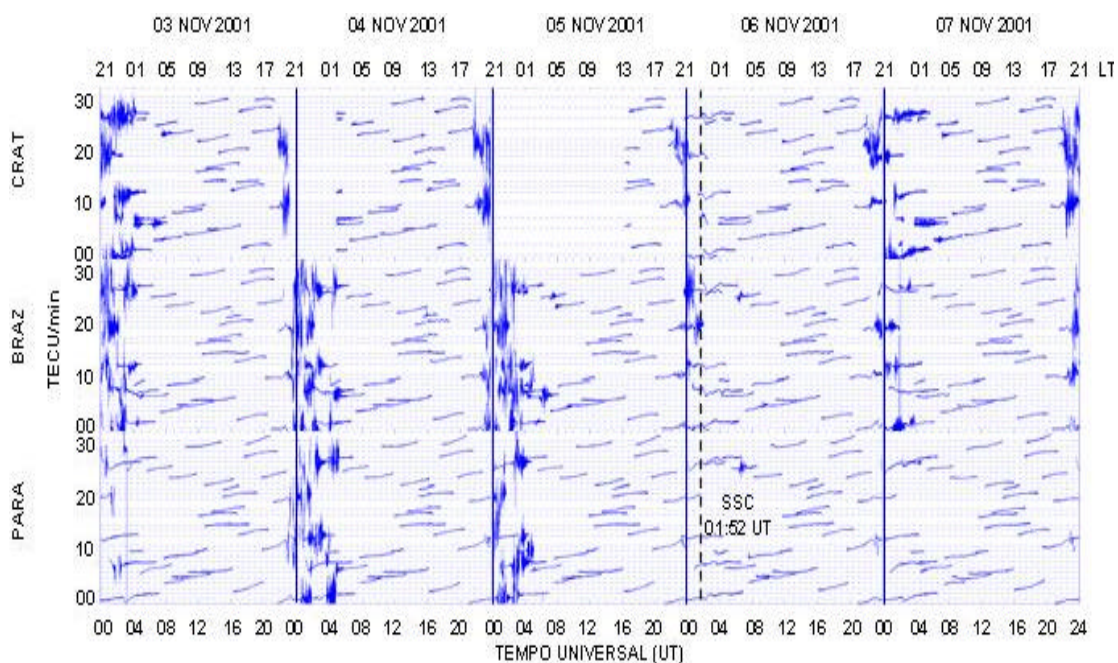


Figura 6.15 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 3 e 7 de novembro de 2001 para as estações de CRAT, BRAZ e PARA.

A Figura 6.14 mostra ausência de dados na estação de CRAT no dia 4 de novembro (parte noturna) entre aproximadamente 21:00 LT e 3:00 LT e no dia 5 de novembro (parte noturna e diurna) entre aproximadamente 21:00 LT e 13:00 LT. A Figura 6.15 mostra fortes flutuações de fase antes da tempestade geomagnética na noite de 2-3 de novembro (noite geomagnética calma; CRAT e BRAZ) e nas noites de 3-4 e 4-5 de novembro (CRAT, BRAZ e PARA). Esse resultado é esperado considerando que o mês de novembro normalmente tem grandes possibilidades de ocorrências de irregularidades ionosféricas (ex., SAHAI et al., 2000). A Figura 6.15 mostra também na noite de 5-6 de novembro (noite da ocorrência de SSC a 1:52 UT) uma grande diminuição de flutuações de fase nas estações de CRAT e BRAZ com ausência total de flutuações na estação de PARA, possivelmente devida a forte queda da densidade eletrônica na camada F, que é evidente na Figura 6.14, logo depois do SSC. Pode-se mencionar que talvez durante esta tempestade geomagnética, ocorreu o efeito de diminuição das irregularidades ionosféricas.

6.7 Supertempestade ocorrida em Outubro de 2003 (evento 6)

A Figura 6.16 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.17 e 6.18 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo 2,9° S a 20,7° S. Os dados de V_p e N_p do vento solar obtido do satélite ACE não estavam disponíveis para este evento.

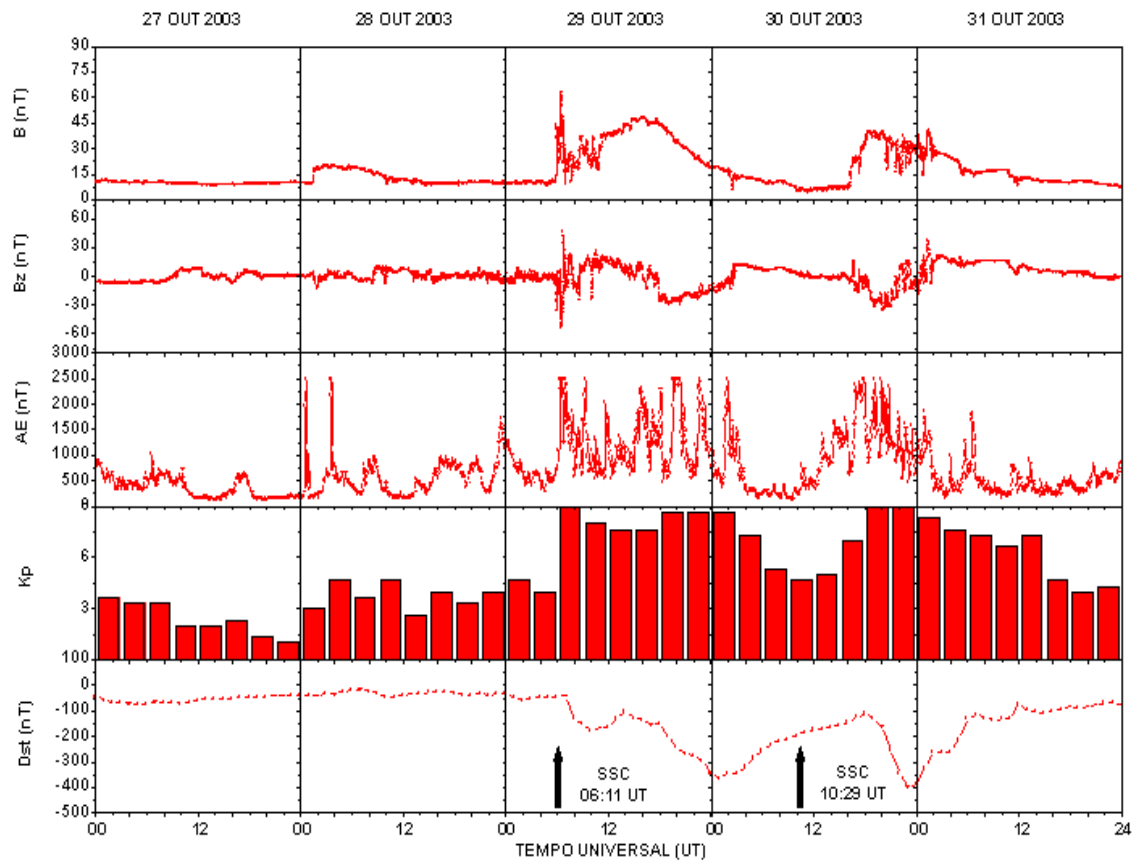


Figura 6.16 – Parâmetros interplanetários B e Bz e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003.

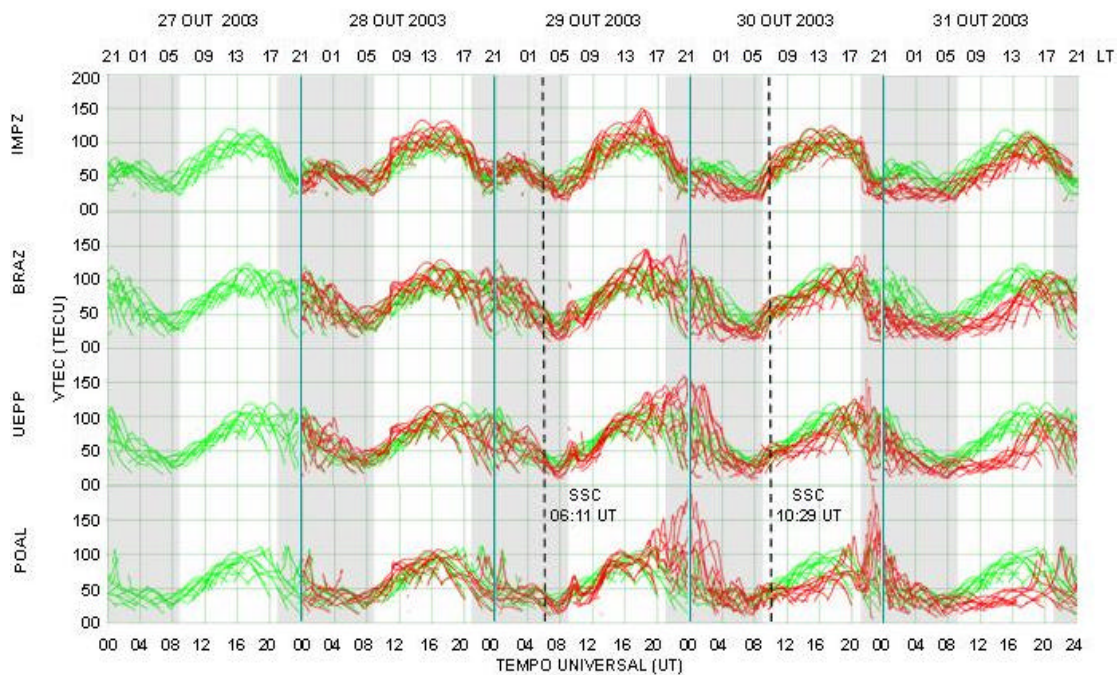


Figura 6.17 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

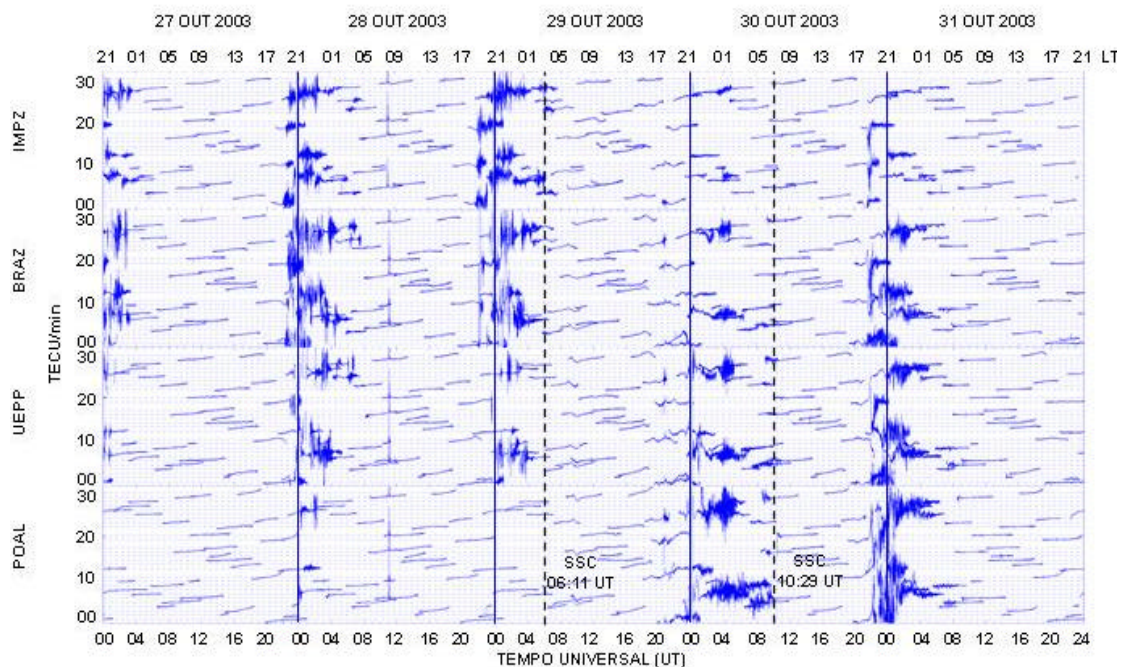


Figura 6.18 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 27 e 31 de outubro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

A Figura 6.17 mostra no dia 29 de outubro a aproximadamente 9:45 UT, um aumento do VTEC nas estações de BRAZ, UEPP e POAL, resultando na formação de uma incomum anomalia equatorial ionosférica, possivelmente devida a penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude (SAHAI et al., 2005; BATISTA et al., 2006). A Figura 6.16 mostra depois das ocorrências de SSC às 6:11 UT do dia 29 de outubro e 10:29 UT do dia 30 de outubro a forte queda do índice Dst (~60 nT/h durante 18-23 UT). Como foi mostrado por Sahai et al., (2005), a região equatorial no setor brasileiro sofreu rápida subida da camada F após os dois SSC durante as tempestades geomagnéticas perto das 22:00 UT do dia 29 de outubro e 21:30 UT do dia 30 de outubro relacionado a penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos de alta latitude, resultando em difusão de plasma ionosférico das regiões equatorial para baixas latitudes. Pode-se observar também na Figura 6.17, nos horários perto da 00:00 UT dos dias 30 e 31 de outubro, um grande aumento do VTEC em regiões afastadas do equador geomagnético (UEPP e POAL). A Figura 6.18 mostra flutuações de fase, indicando a presença de irregularidades ionosféricas de grande escala ou bolhas ionosféricas nas noites de 26-27, 27-28, 28-29, 29-30 e 30-31 de outubro. Pode-se observar a diferença das flutuações de fase antes e depois da tempestade geomagnética. Após a ocorrência da tempestade geomagnética, as fortes flutuações são mais intensas nas regiões de baixa latitude, onde se observou a presença de grande aumento do VTEC (grande aumento da densidade eletrônica; Figura 6.17).

6.8 Supertempestade ocorrida em Novembro de 2003 (evento 7)

A Figura 6.19 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.20 e 6.21 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo 2,9° S a 20,7° S.

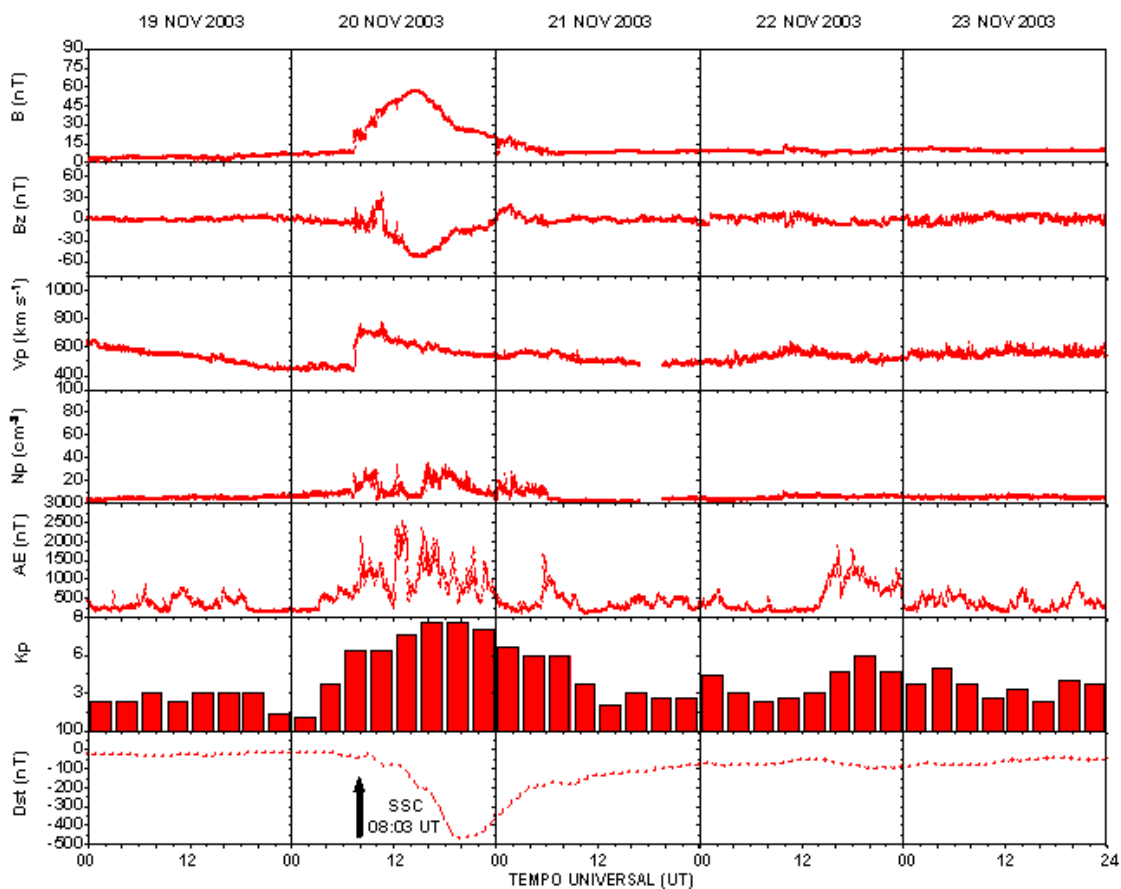


Figura 6.19 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003.

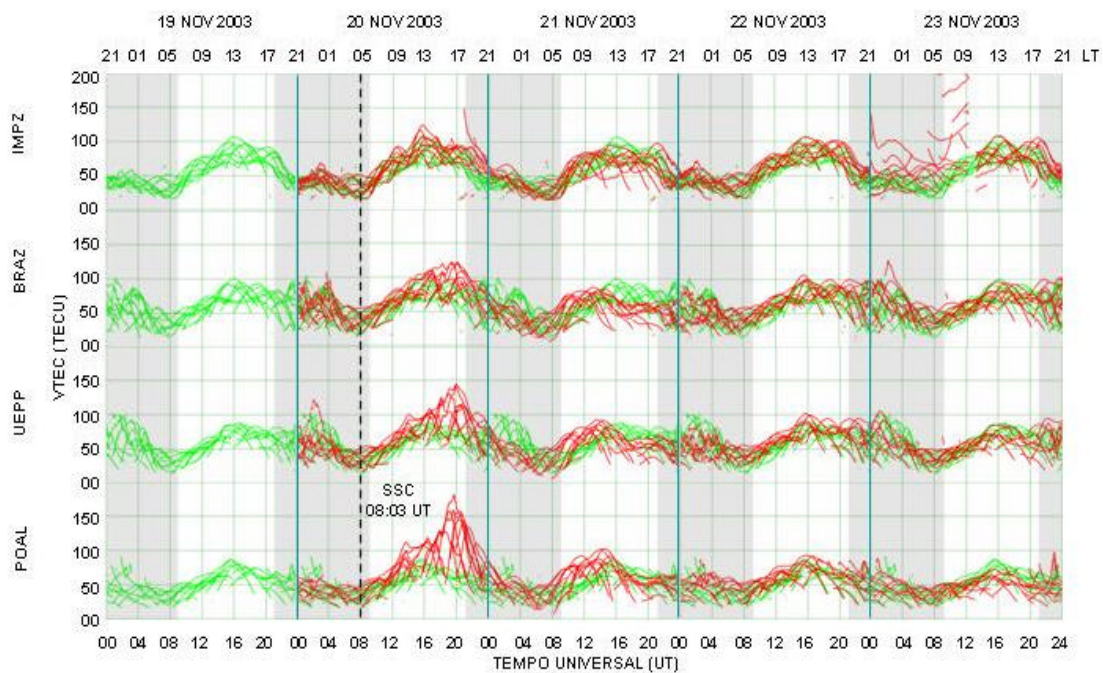


Figura 6.20 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

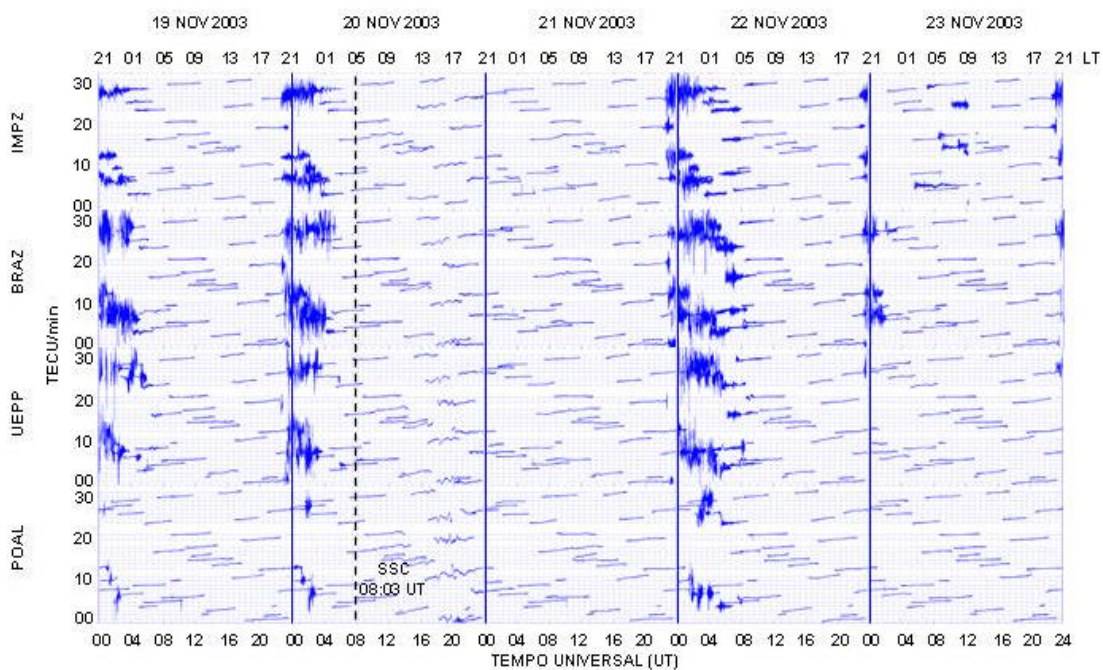


Figura 6.21 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 19 e 23 de novembro de 2003 para as estações de IMPZ, BRAZ, UEPP e POAL.

As Figuras 6.20 e 6.21 mostram no dia 20 de novembro a ocorrência de SSC às 8:03 UT. A Figura 6.20 mostra também para o dia 20 de novembro no horário próximo às 17:00 LT um grande aumento do VTEC em baixas latitudes (UEPP e POAL). Como é discutido por Becker-Guedes et al., (2006), este aumento está relacionado com a forte subida da camada F na região perto do equador geomagnético. Becker-Guedes et al., (2006) (ver como exemplo outros estudos em Abdu, 1997) mostram também ausência de pico pré-reverso durante o pôr-do-sol no dia 20 de novembro, possivelmente relacionado com os distúrbios de vento zonal. A supressão do pico pré-reverso devido à tempestade geomagnética resultou na ausência de flutuações de fase na noite de 20-21 de novembro de 2003 (Figura 6.21).

6.9 Supertempestade ocorrida em Novembro de 2004 (evento 8)

A Figura 6.22 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.23 e 6.24 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo de 1,2° N a 20,7° S.

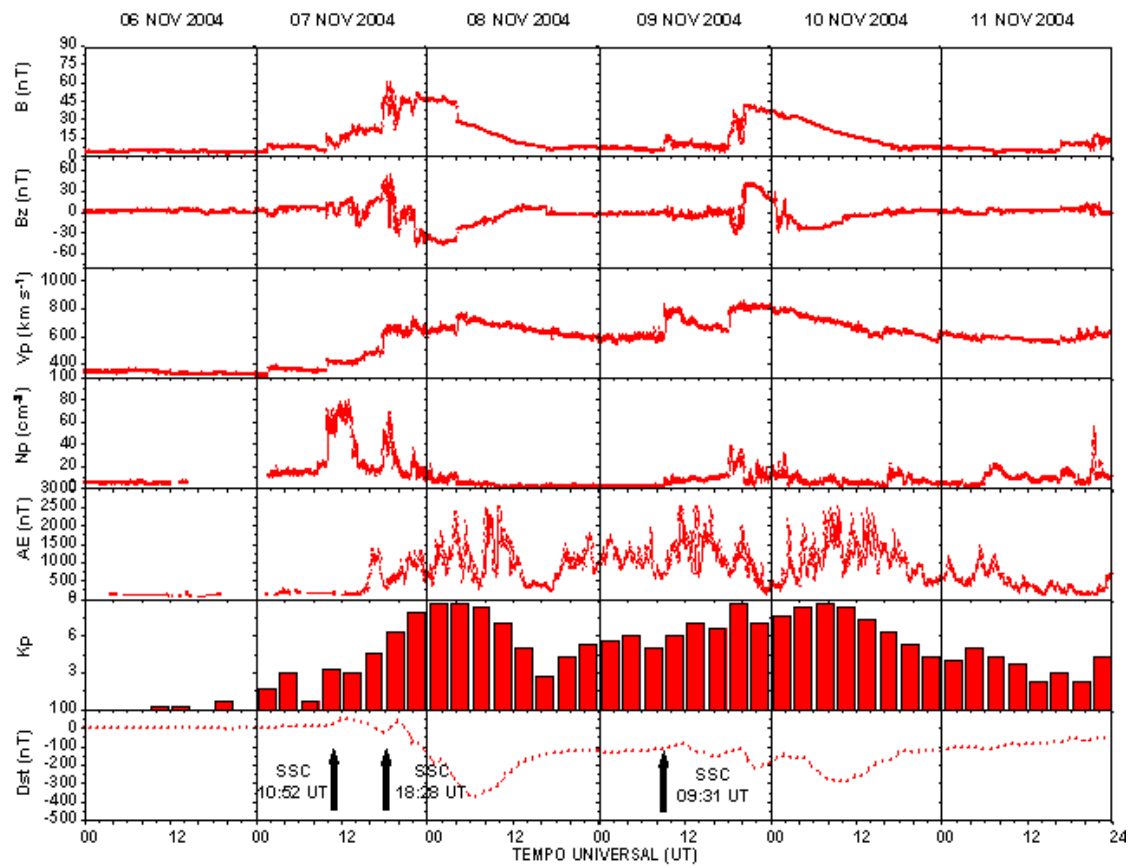


Figura 6.22 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004.

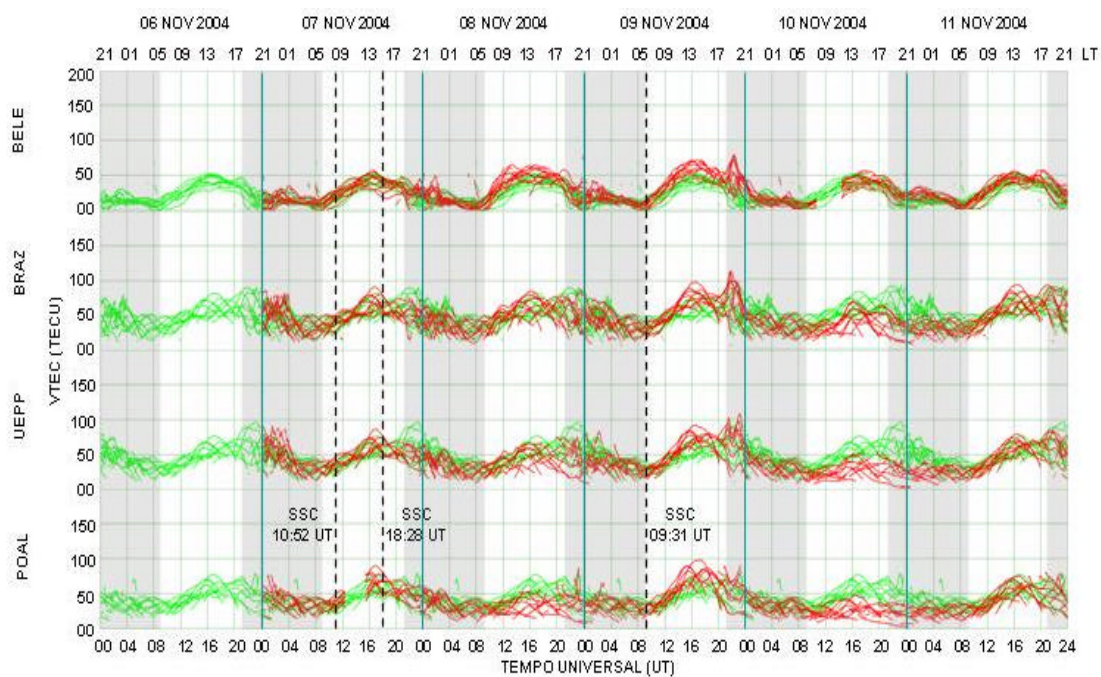


Figura 6.23 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.

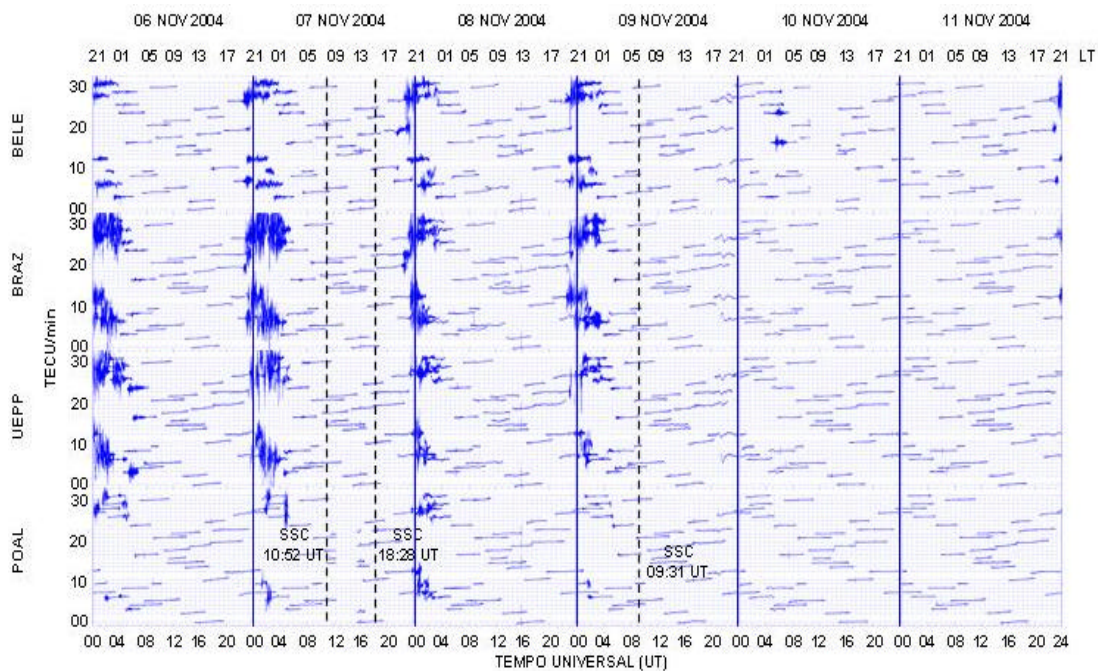


Figura 6.24 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 6 e 11 de novembro de 2004 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.

A Figura 6.23 mostra para a estação de BELE ausência de dados no horário entre aproximadamente 7:30 LT e 11:30 LT do dia 10 de novembro e para a estação de POAL ausência de dados no horário entre aproximadamente 9:00 LT e 13:00 LT do dia 7 de novembro. A Figura 6.22 indica o dia 6 de novembro como geomagneticamente calmo. Depois do segundo SSC (18:28 UT) no dia 7 de novembro, a Figura 6.23 mostra diminuição do VTEC nas estações de BRAZ e UEPP a partir do pôr-do-sol, talvez pela dinâmica da camada F. Após a terceira ocorrência de SSC (9:31 UT) no dia 9 de novembro, houve um aumento maior de densidade eletrônica após o pôr-do-sol nas estações de BELE e BRAZ comparado a UEPP e POAL. A Figura 6.24 mostra flutuações de fase durante as noites de 5-6, 6-7, 7-8 e 8-9 de novembro. As flutuações de fase nas primeiras duas noites (5-6 e 6-7 de novembro; geomagneticamente calmo) é devido ao mês de novembro ser propício à geração de irregularidades ionosféricas (SAHAI et al., 2000). Durante as noites de 7-8 e 8-9 de novembro (período da tempestade), a presença de flutuações de fase indica que a forte tempestade geomagnética não teve influência sobre a geração de irregularidades ionosféricas. A Figura 6.24 mostra completa ausência de flutuações de fase nas noites de 9-10 e 10-11 de novembro, depois do terceiro SSC. A ausência de flutuações de fase nas noites seguindo este terceiro SSC indica forte influência da atividade geomagnética sobre a evolução das irregularidades ionosféricas. Pode-se mencionar que a atividade geomagnética depois do terceiro SSC também ocasionou diminuição do VTEC (durante a parte diurna do dia 10 de novembro) em BRAZ, UEPP e POAL, estações mais afastadas do equador geomagnético. Isso indica que a anomalia equatorial ionosférica não foi bem desenvolvida devido à tempestade geomagnética.

6.10 Supertempestade ocorrida em Maio de 2005 (evento 9)

A Figura 6.25 mostra os dados interplanetários e geomagnéticos e as Figuras 6.26 e 6.27 mostram o VTEC e as flutuações de fase respectivamente das estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL com latitude dip cobrindo 1,2° N a 20,7° S.

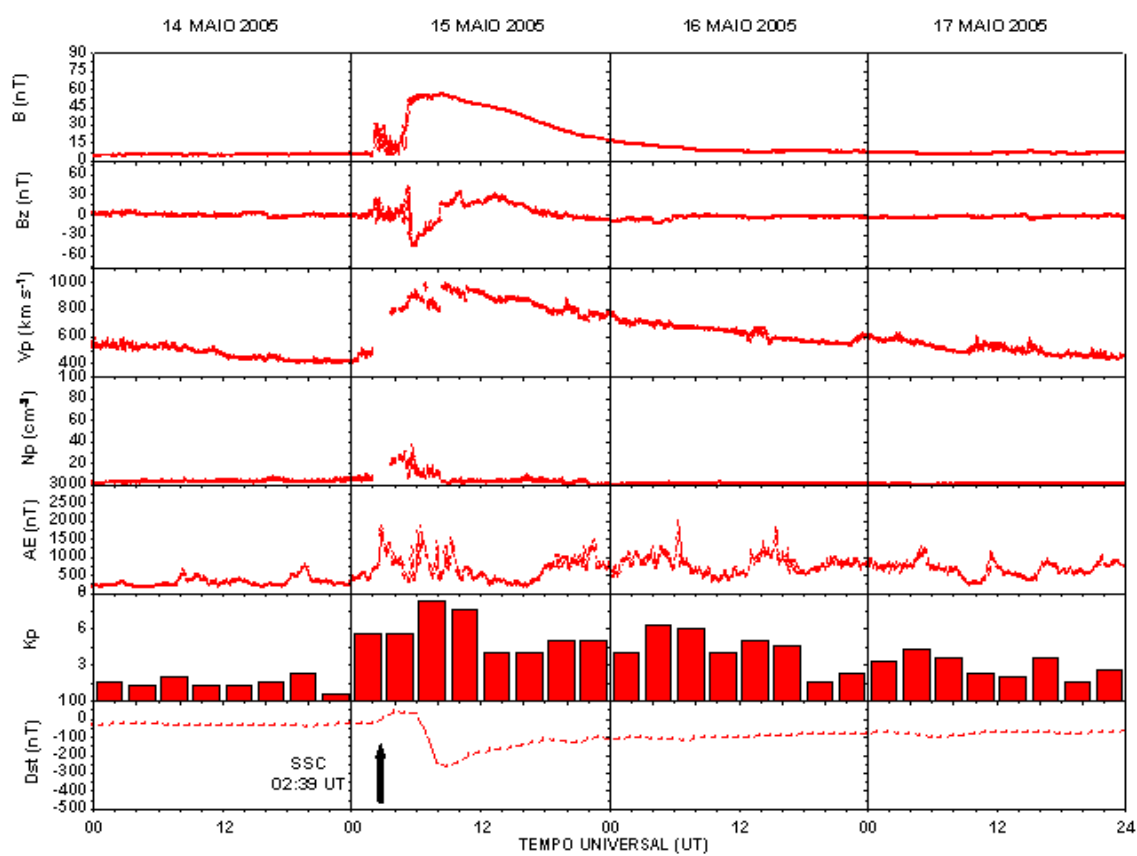


Figura 6.25 – Parâmetros interplanetários B, Bz, Vp e Np e as variações do campo geomagnético através dos índices AE, Kp e Dst entre os dias 14 e 17 de maio de 2005.

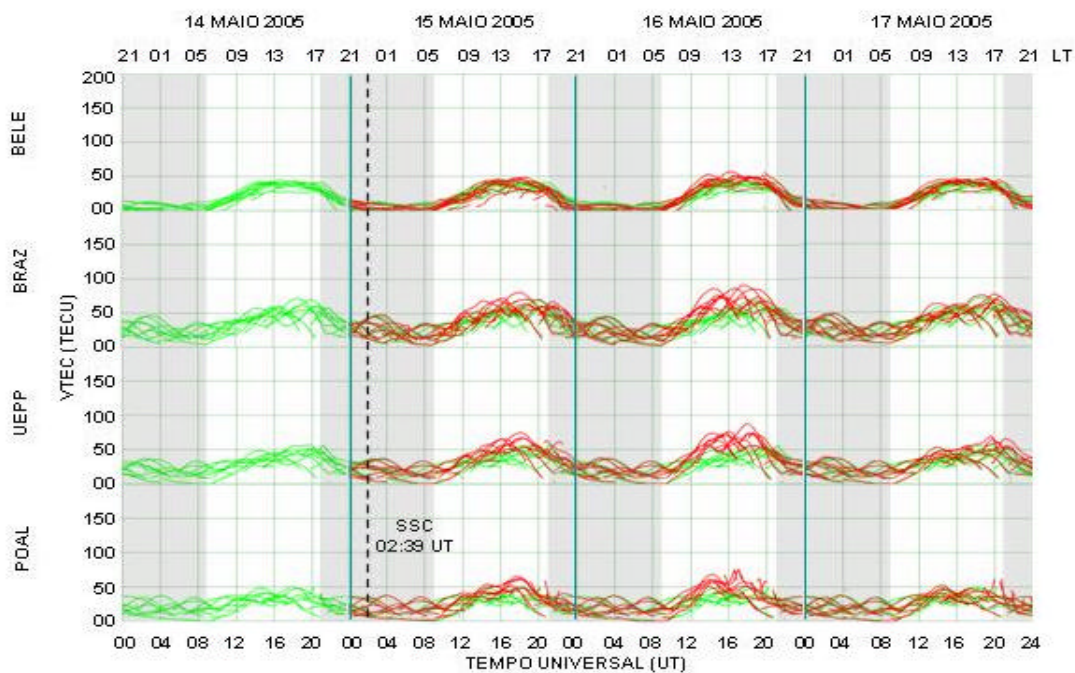


Figura 6.26 – Conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) entre os dias 14 e 17 de maio de 2005 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.

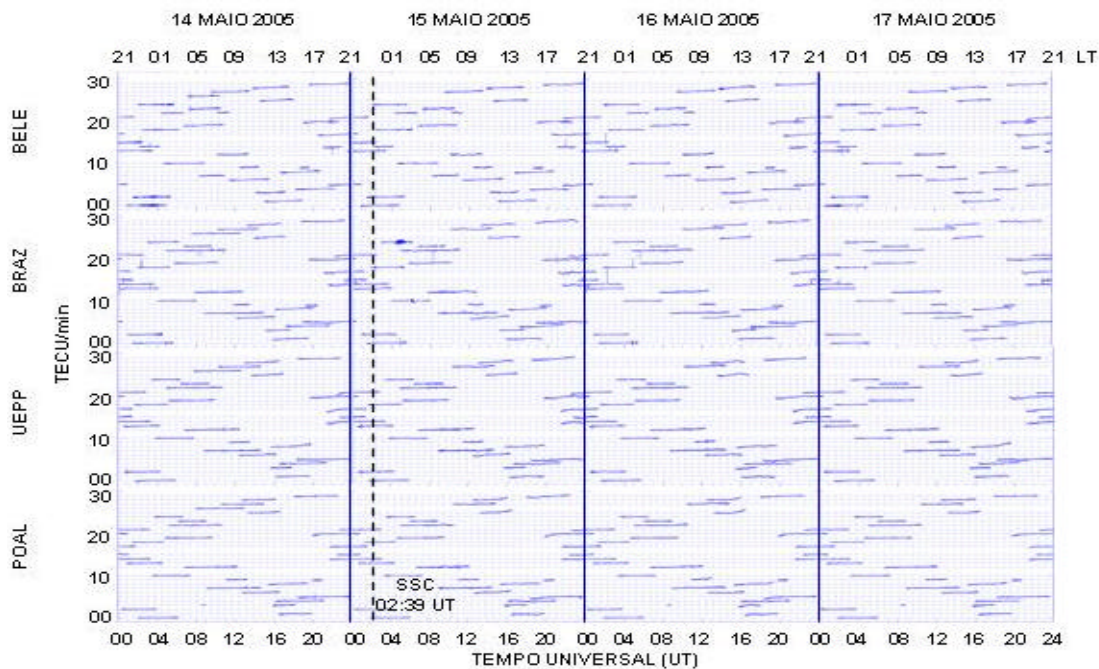


Figura 6.27 – Flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) entre os dias 14 e 17 de maio de 2005 para as estações de BELE, BRAZ, UEPP e POAL.

A característica desta tempestade geomagnética parece ser bem diferente das que foram investigadas (eventos 1 a 8). A supertempestade geomagnética atual apresenta fase principal e longo período de recuperação (Figura 6.25). A Figura 6.26 mostra que durante o período de 14 a 17 de maio quase não tem variação do VTEC. A Figura 6.26 mostra também um máximo do VTEC, aproximadamente 60 TECU para todos os dias e estações do evento. O nível do VTEC observado durante este período é muito baixo quando comparado aos outros eventos investigados. A Figura 6.27 mostra total ausência de flutuações de fase durante todo o período do evento (BELE até POAL). Como é discutido por Sahai et al., (2000), normalmente durante o mês de maio não se observam irregularidades ionosféricas. Pode-se mencionar que a atividade geomagnética ocorrida neste evento é talvez causada pela intensa e contínua atividade do índice AE e longa fase de recuperação designada por evento HILDCAA (“High Intensity, Long Duration Continuous AE Activity”) (TSURUTANI; GONZALEZ, 1987). Esta supertempestade geomagnética não influenciou na geração ou supressão de irregularidades ionosféricas na camada F.

Pode-se mencionar que os efeitos observados na camada F ionosférica nas regiões equatorial e de baixa latitude durante os nove eventos analisados foram muito variados e alguns dos aspectos importantes são resumidos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Aspectos importantes observados durante as ocorrências de supertempestades geomagnéticas durante os nove eventos analisados.

Eventos	Aspectos importantes observados durante as supertempestades geomagnéticas
1- abril 2000	penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em subida da camada F (IMPZ) (dia 6, ~17:30 LT) e difusão de plasma ionosférico (BRAZ e UEPP) gerando fortes flutuações de fase (noite de 6-7, ~21:00 LT a 6:00 LT)

Tabela 6.2 (continuação) – Aspectos importantes observados durante as ocorrências de supertempestades geomagnéticas durante os nove eventos analisados.

Eventos	Aspectos importantes observados durante as supertempestades geomagnéticas
2 - julho 2000	primeiro aumento do VTEC (PARA) (dia 15, ~14:30 LT) propagando-se de sul para norte, causado por “TIDs” de alta velocidade ($\sim 1200 \text{ m s}^{-1}$) devido ao aquecimento “Joule” na região auroral; segundo aumento do VTEC (UEPP e PARA) (dia 15, ~17:30 LT) causado por penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em subida da camada F (perto do pôr-do-sol) e difusão de plasma ionosférico (UEPP e PARA) gerando flutuações de fase (noite de 15-16, ~19:00 LT a 1:00 LT)
3 - março 2001	penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em subida da camada F (aumento do VTEC no dia 31, ~10:00 UT; BRAZ, UEPP e POAL) e difusão de plasma ionosférico formando uma incomum anomalia equatorial ionosférica no período da manhã
4 - abril 2001	aumento do VTEC (mais acentuado em BRAZ e UEPP) (dia 12, ~1:00 UT) talvez causado por penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em subida da camada F gerando fortes flutuações de fase (mais acentuadas no dia 12, ~4:00 UT a 9:00 UT); oscilações do VTEC (UEPP e POAL) (dia 13, parte diurna) relacionadas as fortes flutuações do índice AE ou campo elétrico devido a distúrbios do dínamo
5 - novembro 2001	grande diminuição de flutuações de fase (CRAT e BRAZ; ausência total PARA) (noite de 5-6) possivelmente devida a forte queda da densidade eletrônica na camada F; durante esta tempestade, ocorreu o efeito de diminuição das irregularidades ionosféricas
6 - outubro 2003	formação de incomum anomalia equatorial ionosférica (dia 29, ~9:45 UT); penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos resultando em rápida subida da camada F (IMPZ) (dia 29, ~22:00 UT e dia 30, ~21:30 UT) após os dois SSC e difusão de plasma ionosférico; após as ocorrências de tempestade geomagnética, as fortes flutuações de fase são mais intensas nas regiões de baixa latitude (UEPP e POAL) onde se obteve a presença de grande aumento do VTEC perto da 00:00 UT
7 - novembro 2003	grande aumento do VTEC (dia 20, ~17:00 LT; UEPP e POAL) relacionado com forte subida da camada F (IMPZ); ausência de pico pré-reverso (dia 20, pôr-do-sol) possivelmente relacionado com os distúrbios de vento zonal; a supressão do pico pré-reverso devido à tempestade geomagnética resultou na ausência de flutuações de fase (noite de 20-21)

Tabela 6.2 (continuação) – Aspectos importantes observados durante as ocorrências de supertempestades geomagnéticas durante os nove eventos analisados.

Eventos	Aspectos importantes observados durante as supertempestades geomagnéticas
8 - novembro 2004	após o segundo SSC ocorreu diminuição do VTEC (BRAZ e UEPP) (dia 7, pôr-do-sol) talvez devido à dinâmica da camada F, as flutuações de fase (noites de 7-8 e 8-9) indicam que talvez a forte tempestade geomagnética não influenciou na sua geração, por ser o mês de novembro propício a geração de irregularidades ionosféricas; parte diurna (dia 10) ocorreu diminuição do VTEC (BRAZ, UEPP e POAL) devido a atividade geomagnética indicando que a tempestade inibiu o desenvolvimento da anomalia equatorial ionosférica
9 - maio 2005	supertempestade geomagnética atípica, baixo nível de densidade eletrônica para todos os dias (14 a 17) e estações (BELE, BRAZ, UEPP e POAL), ausência total de flutuações de fase (dias 14 a 17) talvez devido ao mês de maio ser propício a não observação de irregularidades ionosféricas; atividade geomagnética ocorrida neste evento é talvez devido aos eventos HILDCAAs, pela contínua atividade do índice AE e longo período de recuperação; não teve influência na geração ou supressão de irregularidades ionosféricas na camada F

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi estudado o comportamento da camada F ionosférica em regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro durante nove eventos de supertempestades geomagnéticas (considerando como critério o $|Dst| > 250$ nT) ocorridas no período descendente do ciclo solar 23 entre os anos de 2000 e 2005 através de medidas do conteúdo total de elétrons na vertical (VTEC) e flutuações de fase ou taxas de variações do TEC (ROT) usando dados de GPS de várias estações da RBMC/IGS.

Pode-se concluir que os efeitos observados foram variados nos nove eventos (8 ocorridos com SSC e 1 ocorrido com GSC) estudados na camada F ionosférica no setor brasileiro durante as ocorrências de supertempestades, obtendo assim importantes resultados:

- Durante os eventos 1, 2, 4 e 6 foram observados penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos, resultando em fortes flutuações de fase no período noturno.
- Durante o evento 2 foi observado “Travelling Ionospheric Disturbances (TIDs)” de alta velocidade propagando-se de sul para norte devido ao aquecimento “Joule” na região auroral.
- Durante os eventos 3 e 6 foram observados penetração pontual de campos elétricos magnetosféricos, resultando na formação de incomum anomalia ionosférica equatorial no período da manhã (após o nascer do Sol).

- Durante o evento 4 foi observado oscilações, podendo estar relacionadas com fortes flutuações do índice AE ou campo elétrico devido a distúrbios do dínamo. Durante este evento a anomalia ionosférica equatorial não se desenvolveu.
- Durante o evento 5 foi observado que a supertempestade inibiu a geração de irregularidades ionosféricas devida a grande diminuição da densidade eletrônica.
- Durante o evento 7 foi observado ausência de pico pré-reverso possivelmente relacionado com distúrbios de vento zonal, inibindo as flutuações de fase no período noturno.
- Durante o evento 8 foi observado que as flutuações de fase não sofreram influência da supertempestade e na parte diurna observou-se que a supertempestade inibiu o desenvolvimento da anomalia equatorial ionosférica.
- Durante o evento 9 foi observado uma supertempestade atípica, não suprimindo ou gerando flutuações de fase devido a baixa densidade eletrônica. A atividade geomagnética ocorrida neste evento é talvez ligada a eventos HILDCAAs.

Recomendações para Trabalhos Futuros

Pode-se recomendar para trabalhos futuros o uso de dados de GPS de mais estações da RBMC/IGS ou UNIVAP com o objetivo de realizar uma análise latitudinal mais precisa de efeitos de tempestades geomagnéticas na camada F sobre regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro. Recomenda-se também o uso simultâneo de dados de GPS e sondagem ionosférica. Pode-se mencionar que os dados de sondagem ionosférica fornecem detalhes das alturas virtuais (mínima da camada F e densidade máxima) e densidade eletrônica no pico da camada F ionosférica.

Referências Bibliográficas

AARONS, J.; MENDILLO, M.; YANTOSCA, R. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **J. Geophysical Research**, v. 101, n. A8, p. 26,851-26,862, 1996.

ABDU, M. A.; MURALIKRISHNA, P.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. Rocket observations of equatorial plasma bubbles over Natal, Brazil, using a high-frequency capacitance probe. **J. Geophysical Research**, v. 96, n. A5, p. 7689-7695, 1991.

ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-thermosphere system under disturbed conditions. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 5, n. 13, p. 1505-1519, 1997.

ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, n. 63, p. 869-884, 2000.

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

ACE. **ACE Spacecraft**. 2005. Disponível em:
<http://helios.gsfc.nasa.gov/ace_spacecraft.html>. Acesso em 3 nov. 2006.

AKASOFU, S-I. Aurora. In: TSURUTANI, B. T.; SUESS, S. T. **From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares e Cosmic Rays**. Washington: American Geophysical Union, 1998.

BASU, SU.; BASU, SA.; VALLADARES, C. E.; YEH, H. -C.; SU, S. -Y.; MACKENZIE, E.; SULTAN, P. J.; AARONS, J.; RICH, F. J.; DOHERTY, P.; GROVES, K. M.; BULLET, T. W. Ionospheric effects of major magnetic storms during the International Space Weather Period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillations, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes. **J. Geophysical Research**, v. 106, p. 30389-30413, 2001.

BASU, SA.; BASU, SU.; GROVES, K. M.; MACKENZIE, E.; KESKINEN, M. J.; RICH, F. J. Near-simultaneous plasma structuring in the mid-latitude and equatorial ionosphere during magnetic superstorms. **Geophysical Research Lett.**, v. 32, n. L12S05, 2005.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BERTONI, F.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BAILEY, G. J. Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **J. Geophysical Research**, v. 111, n. A05307, 2006.

BECKER-GUEDES, F.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; SPINOZA, E.; PILLAT, V. G.; LIMA, W. L. C.; BASU, SU.; BASU, SA.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MACKENZIE, E. M.; PI, X.; BITTENCOURT, J. A. The Ionospheric response in the Brazilian sector during the super geomagnetic storm of 20 November 2003, **Ann. Geophysical**, 2006.

BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; TAKAHASHI, H. Simultaneous observations of equatorial F-region plasma depletions and thermospheric winds. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 9, p. 1049-1059, 1997.

BOOKER, H. G.; WELLS, H. W. Scattering of radio waves in the F region of ionosphere. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, n. 43, p. 249, 1938.

BUONSANTO, M. J. Ionospheric storms – A review. **Space Science Reviews**, v. 88, p. 563-601, 1999.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CAMPBELL, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**. New York: University of Cambridge, 1997.

CECATTO, J. R. **O Sol** 2003. Disponível em: <<http://www.das.inpe.br/curso/ciaa/ciaa.php>>. Acesso em 16 dez. 2005.

DANA, P. H. **Global Positioning System Overview**. 2000. Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>. Acesso em 10 nov. 2006.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus, 1990.

DST INDEX. **Introduction**. 1991. Disponível em: <<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst2/onDstindex.html>>. Acesso em 22 maio 2006.

FEDRIZZI, M. **Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados de GPS**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FINAL [1957-2003] DST INDEX. **Geomagnetic Equatorial Dst Index Home Page**. 2006. Disponível em: <<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/finalprov.html>>. Acesso em 11 abril 2006.

FONSECA JR., E. S. **O Sistema GPS como ferramenta para a avaliação da refração ionosférica no Brasil**. Tese (Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FRIAÇA, A. C. S.; DAL PINO, E.; SODRÉ JR., L.; JATENCO-PEREIRA, V. **Astronomia: Uma visão geral do universo**. 2. ed. São Paulo: ed. USP, 2003.

GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100nT$). **Planetary Space Science**, v. 35, n. 9, p. 1101-1109, 1987.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm? **J. Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994.

GLOBO CIÊNCIA. **Revista Globo Ciência**, ano VII, junho 1998.

GPS OVERVIEW. **Minnesota Department of Natural Resources MIS Bureau – GIS Section**. 2001. Disponível em: <<http://thoreau.dnr.state.mn.us/mis/gis/tools/arcview/Training/WebHelp/Courses/GPS/GPSOverview/Page5.html>>. Acesso em 28 dez. 2006.

GURTNER, W. **RINEX: The receiver independent Exchange format version 2**. 2006. Disponível em: <<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex2.txt>>. Acesso em 14 out. 2006.

HAARP. **High Frequency Active Auroral Research Program**. 2006. Disponível em: <<http://www.haarp.alaska.edu/haarp/ion1.html>>. Acesso em 3 set. 2006.

HAIKOWICZ, L. A. A Global Study of Large Scale Travelling Ionospheric Disturbances (Tids) Following a Step-like Onset of Auroral Substorms in Both Hemispheres. **Planetary Space Science**, v. 39, p. 913-923, 1990.

HAMILTON, C. J. **O Sol**. 1999. Disponível em: <<http://www.solarviews.com/portug/sun.htm>>. Acesso em 5 maio 2005.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice**. 3. ed. Wien: Springer-Verlag, 1994.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em 8 set. 2006.

IONOSPHERIC PHYSICS. **The electron concentration profile**. 2006. Disponível em : <<http://ion.le.ac.uk/ionosphere/profile.html#gases>>. Acesso em 11 nov. 2006.

JANSEN, F.; PIRJOLA, R. Space weather research elucidates risks to technological infrastructure, EOS, Transactions. **American Geophysical Union**, n. 85, p. 241-245, 2004.

KAMIDE, Y.; BAUMJOHANN, W.; DAGLIS, I. A.; GONZALEZ, W. D.; GRANDE, M.; JOSELYN, J. A.; McPHERSON, R. L.; PHILLIPS, J. L.; REEVES, E. G. D.; ROSTOKER, G.; SHARMA, A. S.; SINGER, H. J.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. Current

understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. **J. Geophysical Research**, v. 103, n. A8, p. 17,705-17,728, 1998.

KAMIDE, Y. What is an intense geomagnetic storm? **Space Weather Quarterly**, v. 4, n. S06008, 2006.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS: Principles and Applications**. 2. ed. Artech House, Inc., 2006.

KILLEEN, T. L.; HAYS, P. B.; CARIGNAN, G. R.; HEELIS, R. A.; HANSON, W. B.; SPENCER, N. W.; BRACE, L. H. Ion-neutral coupling in the high-latitude F region: Evaluation of ion heating terms from Dynamic Explorer 2. **J. Geophysical Research**, v. 89, p. 7495-7508, 1984.

KELLEY, M. C. **The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. San Diego: Academic Press, 1989.

KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; BEAUJARDIÈRE, O. Convective Ionospheric Storms: A Major Space Weather Problem. **Space Weather Quarterly**, v. 4, n. S02C04, 2006.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: ed. Nova Stella, 1991.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Effects on GPS. **GPS World**, p. 48-51, April, 1991.

KUMAR, S.; CHANDRA, H.; SHARMA, S. Geomagnetic storms and their ionospheric effects observed at the equatorial anomaly crest in the Indian Region. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, n. 67, p. 581-594, 2005.

MARTINIS, C. R.; MENDILLO, M. J.; AARONS, J. Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic storms. **J. Geophysical Research**, v. 110, n. A07306, 2005.

MARUYAMA, T.; MATUURA, N. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles. **J. Geophysical Research**, v. 89, p. 10903-10912, 1984.

MASCO. **O Espectro Eletromagnético**. 2001. Disponível em: <<http://www.das.inpe.br/%7Ealta/MASCO/faq/raiox/espectro.html>>. Acesso em 18 nov. 2006.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. Dissertação (Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 56/01, 2004.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; DAL POZ, W. R. Declínio do número de manchas solares do ciclo solar 23: redução da atividade ionosférica e melhora da performance com posicionamento GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 141-157, 2004.

McNAMARA, L. F. **The Ionosphere: Communications, Surveillance and Direction Finding**. Malabar: Krieger, 1991.

McPHERRON, R. L. The role of substorms in the generation of magnetic storms. In: TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; KAMIDE, Y.; ARBALLO, J. K. ed. **Magnetic Storms**. Washington, DC.:[s.ed.], 1997. v. 98.

MSIS-E-90. **Atmosphere Model**. 1990. Disponível em: <<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/msis.html>>. Acesso em 12 set. 2006.

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; PI, X.; SULTAN, P. J. Onset conditions for equatorial spread F. **J. Geophysical Research**, v. 97, p. 13,865-13,876, 1992.

MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, v. 35, n. 3, p. 885-904, 2000.

MENDILLO, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. **American Geophysical Union**, v. 44, n. 2005RG000193, p. 47, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: ed. Unesp, 2000.

NASA. **About the IGS**. 2004. Disponível em: <<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/overview/viewindex.html>>. Acesso em 9 out. 2006.

OBSERVATIONS OF MAGNETIC FIELDS. **Magnetic fields in stars and in the interplanetary medium**. 2006. Disponível em: <<http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/March03/Vallee2/Vallee3.html>>. Acesso em 10 julho 2006.

OLIVEIRA, A. B. V. **Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial**. Dissertação (Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

RISHBETH, H.; GARRIOT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969.

ROCHA, J. A. M. R. **GPS: Uma abordagem prática**. Recife: ed. Bagaço, 2003.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p. 1377-1383, 2000.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BECKER-GUEDES, F.; ABALDE, J. R.; CROWLEY, G.; PI, X.; IGARASHI, K.; AMARANTE, G. M.; PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT, J. A. Longitudinal differences observed in the Ionospheric F-region during the major geomagnetic storm of 31 March 2001. **Ann. Geophysical**, v. 22, p. 3221-3229, 2004.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BECKER-GUEDES, F.; BOLZAN, M. J. A.; ABALDE, J. R.; PILLAT, V. G.; DE JESUS, R.; LIMA, W. L. C.; CROWLEY, G.; SHIOKAWA, K.; MACDOUGALL, J. W.; LAN, H. T.; IGARASHI, K.; BITTENCOURT, J. A. Effects of the major geomagnetic storms of October 2003 on the equatorial and low-latitude F region in two longitudinal sectors. **J. Geophysical Research**, v. 110, n. A12S91, 2005.

SARDÓN, E.; ZARRAOA, N. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases? **Radio Science**, v. 32, n. 5, p. 1899-1910, 1997.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. Cambridge : University Press, 2000.

SCHUNK, R. W.; SOJKA, J. J. Ionosphere-thermosphere space weather issues. **J. Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 14, p. 1527-1574, 1996.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. Berlim: Walter de Gruyter, 1993.

SPOFFORD, P. R.; REMONDI, B. W. **The national geodetic survey standard format SP3**. 2006. Disponível em: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/data/format/sp3_docu.txt>. Acesso em 1 nov. 2006.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment**. 2. ed. Malabar: Orbit Book Company, 1994.

TSUNODA, R. T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradients in E region Pedersen conductivity. **J. Geophysical Research**, v. 90, p. 447-456, 1985.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains. **Planetary and Space Science**, v. 35, n. 4, p. 405-412, 1987.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The interplanetary cause of magnetic storms: a review. In: TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; KAMIDE, Y.; ARBALLO, J. K. ed. **Magnetic storms**. Washington, DC.: [s.ed.], 1997. v. 98.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. Magnetic Storm In: TSURUTANI, B. T.; SUESS, S. T. ed. **From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares e Cosmic Rays**. Washington: American Geophysical Union, 1998.

TSURUTANI, B. T.; MANNUCCI, A.; IJIMA, B.; ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; GONZALEZ, W.; GUARNIERI, F.; TSUDA, T.; SAITO, A.; YUMOTO, K.; FEJER, B.; FULLER-ROWELL, T. J.; KOZYRA, J.; FOSTER, J. C.; COSTER, A.; VASYLIUNAS, V. M. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. **J. Geophysical Research**, v. 109, n. A08302, 2004.

WANNINGER, L. Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS. **GPS World**, p. 48-54, July, 1993.

WHALEN, J. A. Dependence of equatorial bubbles and bottomside spread F on season, magnetic activity, and $E \times B$ drift velocity during solar maximum. **J. Geophysical Research**, v. 107, n. A2, 2002.

YOHKOH. **MSU Solar Physics Group**. 1995. Disponível em:
<<http://solar.physics.montana.edu/sxt/>>. Acesso em 19 set. 2006.

ANEXO A - ARQUIVOS DE DADOS NOS FORMATOS RINEX e SP3

Este apêndice dispõe para consulta aos usuários um trecho de dados nos formatos RINEX (arquivo de dados de observações) e SP3 (arquivo de dados IGR) utilizados nesta pesquisa. Informações adicionais sobre os formatos RINEX e SP3 podem ser obtidas, respectivamente, em Gurtner (2006) e Spofford e Remondi (2006).

A.1 Formato RINEX

```

      2.10      OBSERVATION DATA      G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
DAT2RINW 1.50 002      IBGE/CGED      01OCT05 21:14:42      PGM / RUN BY / DATE
Agencia "HOST"      IBGE/BRASIL      OBSERVER / AGENCY
26334      TRIMBLE 4000SSI      Nav 7.32 Sig 3.08      REC # / TYPE / VERS
214293      DORNE MARGOLIN T      ANT # / TYPE
BELE - RBMC Belem      MARKER NAME
93620      MARKER NUMBER
      4228141.2541 -4772754.3912 -155761.5413      APPROX POSITION XYZ
      0.0075      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
*** Above antenna height is from mark to BOTTOM OF ANTENNA.      COMMENT
      1      1      0      WAVELENGTH FACT L1/2
      5      L1      C1      L2      P2      D1      # / TYPES OF OBSERV
      15.000      INTERVAL
2005      10      1      0      0      15.0000000      TIME OF FIRST OBS
2005      10      1      23      59      45.0000000      TIME OF LAST OBS
28      # OF SATELLITES
      1      1423      1423      1419      1419      1423      PRN / # OF OBS
      2      1527      1529      1511      1511      1527      PRN / # OF OBS
      3      1550      1551      1536      1536      1550      PRN / # OF OBS
      4      2339      2339      2283      2283      2339      PRN / # OF OBS
      5      1594      1594      1584      1584      1594      PRN / # OF OBS
      6      2234      2234      2208      2208      2234      PRN / # OF OBS
      7      1470      1471      1456      1456      1470      PRN / # OF OBS
      8      2309      2309      2283      2283      2309      PRN / # OF OBS
      9      1444      1445      1437      1437      1444      PRN / # OF OBS
      10      2345      2345      2307      2307      2345      PRN / # OF OBS
      11      1550      1552      1537      1537      1550      PRN / # OF OBS
      13      2271      2271      2247      2247      2271      PRN / # OF OBS
      14      1418      1419      1400      1400      1418      PRN / # OF OBS
      15      2283      2283      2234      2234      2283      PRN / # OF OBS
      16      2333      2334      2294      2294      2333      PRN / # OF OBS
      18      1436      1437      1414      1414      1436      PRN / # OF OBS
      19      2175      2176      2140      2140      2175      PRN / # OF OBS
      20      1570      1570      1564      1564      1570      PRN / # OF OBS
      21      2146      2147      2119      2119      2146      PRN / # OF OBS
      22      1504      1504      1494      1494      1504      PRN / # OF OBS
      23      2308      2308      2294      2294      2308      PRN / # OF OBS

```



```

-15490642.45107 22054626.42807 -1493210.19946 22054630.24646 -1209.27000
-20862752.41006 21779099.84606 332918.37046 21779103.53546 -894.04900
-12927420.91906 22808355.03006 -9860360.10446 22808357.76446 3495.22000
05 10 1 0 1 45.0000000 0 10 4 8 11 13 19 20 23 24 27 28

```

A.2 Formato SP3

```

#aP2001 4 10 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS97 HLM IGS
## 1109 172800.00000000 900.00000000 52009 0.00000000000000
+ 29 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 17 18 19
+ 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 5 5 5 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 7 6 5
++ 5 6 5 6 5 5 5 5 7 5 5 7 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
% c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
% c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc ccccc ccccc ccccc ccccc
% f 0.00000000 0.0000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
% f 0.00000000 0.0000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
% i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
% i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* RAPID ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod esa gfz igu jpl ngs sio usn
/* REFERENCED TO GPS CLOCK AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* CLK ANT Z-OFFSET (M): II/IIA 1.023; IIR 0.000
* 2001 4 10 0 0 0.00000000
P 1 -1074.763768 25452.898884 -7282.609150 172.328176
P 2 24518.080098 10160.706349 4420.414231 -364.951083
P 3 -14310.019526 7162.881187 21145.160914 19.073798
P 4 19742.972312 -372.440479 -17806.285426 702.522156
P 5 3028.996726 -15510.612735 -21388.554786 294.055637
P 6 -5240.563566 -25910.301789 825.163603 -0.472675
P 7 15100.098143 14109.437762 -16479.827614 584.285778
P 8 12849.309433 8864.791403 21274.608369 98.061228
P 9 13336.445068 -20812.109546 -9363.794268 -39.607905
P 10 19759.644151 -5131.338312 17105.462216 2.257659
P 11 -12847.660397 21380.311159 -9182.894905 1.694668
P 13 6676.643364 25601.058657 2899.949553 -1.053302
P 14 -14990.757120 -12527.448149 -17890.894207 -100.235884
P 15 -11211.521730 -9819.846767 21726.663120 999999.999999
P 17 -4631.751668 -14379.083967 21753.846458 3.092256
P 18 -16480.007352 -16526.208008 12711.306067 -37.595828
P 19 -4719.202976 21080.219280 15401.033089 491.458775
P 20 -1439.842408 15485.841470 -21580.644895 -64.197649
P 21 -24742.409031 -10454.736943 1919.885419 999999.999999
P 22 -24700.857150 636.891154 10132.171907 575.960644
P 23 -13779.473944 -17041.143856 15615.967494 10.944787
P 24 22655.826238 -11698.254648 -7094.603139 42.006987
P 25 -20600.954840 3457.776975 -16032.003786 12.674359
P 26 9343.722871 -17147.618761 17632.164690 423.593755
P 27 5275.789017 15750.782100 20861.662490 16.966772
P 28 -13730.451925 10223.050319 20378.276009 11.831444
P 29 -15467.945570 -10166.837296 -18832.773159 509.692316
P 30 -8932.676515 -17097.373074 -18465.452100 -15.007039
P 31 -7391.085593 19772.191298 15668.205244 38.644385
* 2001 4 10 0 15 0.00000000
P 1 -1494.429319 24509.903149 -9911.745704 172.329870
P 2 23885.234976 10293.301461 7093.318970 -364.954709
P 3 -14955.083667 4798.084206 21372.890764 19.077173
P 4 18198.869944 1094.516203 -19328.063956 702.523655

```

P 5	5393.404871	-14881.484439	-21359.095466	294.057787
P 6	-4911.615764	-25893.257377	-2009.685699	-0.473066
P 7	15341.158960	15929.751557	-14545.205572	584.285196
P 8	10959.690446	10502.507392	21567.372658	98.101108
P 9	14204.224452	-21209.625618	-6723.294179	-39.610176
P 10	21465.778384	-4444.787218	15148.201030	2.258170
P 11	-13729.486747	21782.178538	-6609.872204	1.694571
P 13	6488.987877	25811.739946	42.738656	-1.053490
P 14	-15249.587954	-14475.071928	-16108.205908	-100.237935
P 15	-9215.870673	-11401.913578	21888.012792	19.812693
P 17	-2598.248803	-15764.340127	21069.812215	3.105343
P 18	-14931.654056	-16145.679303	14911.826318	-37.587948
P 19	-6035.434935	22099.199670	13334.879951	491.468423
P 20	-3799.019866	14750.572003	-21813.318983	-64.199185
P 21	-24376.024602	-10496.954227	4739.146566	2.179153
P 22	-25642.363129	116.771432	7614.357765	575.966250
P 23	-12050.965834	-16506.116132	17543.549782	10.946153
P 24	22003.660795	-10918.396994	-9776.433623	42.010193
P 25	-19361.382282	1884.759980	-17737.106787	12.675347
P 26	9939.104235	-15086.257513	19171.912651	423.610954
P 27	3544.397381	17275.361845	19935.363545	16.966634
P 28	-15834.326964	9427.687331	19178.854330	11.829887
P 29	-15827.519342	-12248.738417	-17260.453218	509.705436
P 30	-6828.295758	-16609.066644	-19771.629533	-15.008870
P 31	-8061.327923	17923.948370	17460.247491	38.645798
*	2001 4 10 0 30	0.00000000		
P 1	-2035.411591	23309.320859	-12368.738271	172.331575
P 2	22977.326091	10401.826140	9649.496765	-364.960042
P 3	-15714.647472	2463.232462	21231.325331	19.080986
P 4	16625.247278	2752.237465	-20517.614447	702.524886
P 5	7763.192191	-14371.865300	-20963.138992	294.059361
P 6	-4496.469245	-25583.759376	-4809.423811	-0.472351
P 7	15604.556773	17508.194591	-12357.687742	584.284971
P 8	9146.489713	12243.967736	21481.128691	98.141767
P 9	14843.472294	-21425.146676	-3964.957184	-39.609695
P 10	22978.027891	-3913.022474	12932.740431	2.258270
P 11	-14393.340870	22004.940276	-3923.372191	1.695010
P 13	6225.997884	25721.004142	-2815.202642	-1.053821
P 14	-15550.249741	-16196.715654	-14046.010340	-100.239944
P 15	-7311.976751	-13088.040143	21663.440980	19.816874
P 17	-715.975537	-17199.529371	20018.393101	3.118382
P 18	-13141.276585	-15776.173936	16856.022497	-37.580667
P 19	-7147.489700	22989.759762	11037.870875	491.478178
P 20	-6197.968709	14138.645396	-21672.553583	-64.201074
P 21	-23714.399825	-10478.929433	7480.428997	2.178187
P 22	-26323.067696	-298.228390	4968.209998	575.971237
P 23	-10107.443413	-16010.707502	19181.616670	10.945405
P 24	21180.046647	-9897.770620	-12287.637364	42.012654
P 25	-18081.845011	120.941868	-19128.761348	12.676029
P 26	10680.192608	-12911.212339	20373.560036	423.627598
P 27	1967.754294	18795.887224	18668.198420	16.968316
P 28	-17829.461512	8780.548846	17650.805918	11.828430
P 29	-16238.114502	-14118.536214	-15386.642581	509.717999
P 30	-4578.429910	-16197.005255	-20743.250825	-15.010326
P 31	-8875.426424	15931.915731	18942.463749	38.646784