

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

EFEITOS DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS EM SINAIS DE GPS, EM NATAL, BRASIL.

Ricardo Yvan De La Cruz Cueva

Orientador: **Prof. Dr. Enivaldo Bonelli**

NATAL-RN, BRASIL

Fevereiro de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

EFEITOS DE TEMPESTADES MAGNÉTICAS EM SINAIS DE GPS, EM NATAL, BRASIL.

Ricardo Yvan De La Cruz Cueva

Orientador: **Prof. Dr. Enivaldo Bonelli**

Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE** em **FÍSICA**.

Natal, Fevereiro de 2008

Aos meus irmão pela eterna amizade, e aos meus amigos por serem parte de meu dia a dia, e sempre estar dispostos a me escutar mesmo falando besteira. Obrigadé!!! rrsrs

“Se dois homens vêm andando por uma estrada, cada um carregando um pão, e, ao se encontrarem, eles trocam os pães, cada homem vai embora com um ... porém, se dois homens vêm andando por uma estrada cada um carregando uma idéia, e, ao se encontrarem, eles trocam as idéias, cada homem vai embora com duas...”

(ditado chinês)

Agradecimentos

Meus agradecimentos vão em primeiro lugar a Deus por me dar esta chance única em minha vida, e para mia família que mesmo estando longe sempre estiveram torcendo e apoiando-me incondicionalmente, como meus irmãos Maria Reyna, Juan José, Ingrid Ivonne, meus pais Mario e Reyna. Ao empurre de minha avó Julia Marquina, e não esquecerei as muitas palavras de apoio de Isabel A. e amigos do Perú que sempre estiveram no msn animando-me e fazendo piadas para continuar me esforçando.

A todas as pessoas que cegamente acreditaram no desenvolvimento desta dissertação, inclusive mais que eu mesmo, he he he he.

Ao Professor Enivaldo Bonelli da Universidade Federal do Rio Grande do Norte em Natal, por sua orientação, paciência, ensinamentos e discussões que foram essenciais para meu aprendizado, e para realização deste trabalho de mestrado. Pela coragem de ter aceito um estudante estrangeiro e, principalmente, pela amizade.

Agradeço a disponibilidade de dados fornecidos da estação São João do Cariri-PB pelo professor Ricardo Buriti, e da estação de Fortaleza-CE pela Dra. Inez Batista, assim como o apoio de Igo Paulino no ensino para o processamento de dados do Imageador All Sky.

Aos meus amigos brasileiros também lhes devo um solene agradecimento, que ao passarem por minha vida também contribuíram para minha formação. Tenho que agradecer com muita emoção aos meus amigos Neymar Pereira e Fabio Ferreira pelo constante apoio, ensino do português, paciência, e em geral pelas experiências vividas ao longo destes dois anos.

Aos professores de toda minha vida acadêmica, pois todos contribuíram para construir meu atual conhecimento e participaram da minha formação como pessoa e profissional.

Ao grupo de Ionosfera da UFRN (<http://dinamo.dfte.ufrn.br/>), integrado pelos

professores Gilvan Borba, Rui de Medeiros, Francisco Mota além do Professor E. Bonelli, que sempre me apoiaram, e ajudaram com idéias, conselhos e esclarecimento de dúvidas.

Aos funcionários do DFTE, pelos serviços prestados.

À UFRN e à CAPES que são, respectivamente, as instituições sede e mantenedora de minha pós-graduação no Brasil.

Um dia Enivaldo Bonelli me disse: “eu não ensino para agora, ensino para o futuro”. Com estas frases terminei a dissertação esperando me dar bem no futuro. Enquanto isso, voltarei para o lindo nordeste brasileiro.

Um muito, muito obrigado as pessoas que moram aqui (no nordeste), porque fazem com que esta seja uma cidade (Natal) com uma excelente qualidade de vida, obrigadão ao Brasil.

Resumo

Sinais de satélites apresentam perturbações (cintilações), devido à presença de irregularidades no plasma ionosférico. No presente trabalho, dedicamo-nos ao estudo da atenuação dessas cintilações ou seja, uma melhoria no sinal, durante a fase principal de tempestades magnéticas presentes no período de outubro 2006 a fevereiro 2007. Usando-se dados de cintilações na amplitude de sinais de 1.5GHz da rede de satélites de GPS, na estação ionosférica de Natal (5.84° S, 35.20° O, -20° dip) e índices geomagnéticos, durante o mínimo do ciclo solar que acaba de terminar (denominado ciclo 23), demonstrando-se a anticorrelação entre atividade magnética (Kp) e o índice de cintilação S4, que é uma medida das cintilações na amplitude do sinal de um satélite (método Bonelli2005, que foi comprovado para períodos de máximo solar), isto quando a fase principal da tempestade magnética acontece durante horas de dia local. Encontra-se, que estas tempestades correspondem à categoria I de Aarons (1991). As tempestades magnéticas podem gerar irregularidades quando o campo elétrico de penetração é para leste na hora do pico pré-reversão intensificando-o e também podem gerar irregularidades no período entre meia noite e o amanhecer. A limitação do método aplicado é que não considera algumas tempestades que também ocorreram durante este período de equinócio e verão na região brasileira. Então, utiliza-se dados adicionais das estações de São João de Cariri- PB (Imageador All Sky e Fotômetro) e da estação de Fortaleza-CE (dados de digisonda), para analisar estas tempestades. As tempestades que foram deixadas de fora pelo método aplicado, encaixam-se nas outras duas categorias de Aarons, com uma única exceção (tempestade do 02 de Janeiro). Mostramos que no dia da fase principal, e com presença de bolhas (segundo os dados do Imageador e Fotômetro), a velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ ($\Delta hF/\Delta t$) está abaixo de 20m/s, que é o limiar encontrado por Anderson et al.,

(2004) ($>20\text{m/s}$ como condição favorável à formação de irregularidades e aumento no índice de cintilação). Esta diminuição da velocidade é devido ao mínimo solar.

Abstract

Satellites signals present disturbances (scintillations), due to presence of irregularities in the ionospheric plasma. In the present work, we dedicate to the study of the attenuation of these scintillations that is, an improvement in the signal, during the main magnetic storm phase during the period of October 2006 to February 2007. Using amplitude of scintillation 1.5GHz (L1) data of the net of satellites GPS, in the ionospheric station of Natal (5.84° S, 35.20° O, -20° dip) and geomagnetic indices, during the minimum solar cycle (referred to as cycle 23), demonstrating its anti-correlation between magnetic activity (Kp) and index of scintillation ($\langle S4 \rangle$) (Bonelli2005 method, that works for solar maximum, Bonelli(2005)). These results show that these storms correspond to category I of Aarons (1991). The magnetic storms can generate irregularities when the electric field of penetration eastward on the pre-reversal hour intensificating that and can too generate irregularities on midnight and sunlight period. The limitation of the method applied here is that it is not considering some storms that had also occurred during equinox and summer in the Brazilian region. For this reason, we will use additional data of the stations of São João de Cariri (Imager and Photometer) and of the station at Fortaleza (Digisonde data), as aid to analyze these storms. The storms that had been left out by the applied method, fit in the other two categories of Aarons, with one only exception (storm of January, 02). We show that in the day of the main phase of the magnetic storm, and with presence of bubbles (according to data of the Imager and Photometer), the speed of vertical drift $\vec{E} \times \vec{B}$ ($\Delta hF/\Delta t$) is below 20m/s, that is the threshold found for Anderson al., (2004) ($>20\text{m/s}$ as condition favorable to the formation of irregularities and increase in the scintillation index). This reduction of the speed is due to solar minimum.

Sumário

Agradecimentos	iii
1 Sistema de Posicionamento Global	4
1.1 O sistema GPS	4
1.1.1 Características dos sinais GPS	6
1.1.2 Efeitos da ionosfera no sinal de GPS	7
1.1.3 Cintilação	11
2 Física na ionosfera	15
2.1 A ionosfera	15
2.2 Eletrodinâmica da Ionosfera da Zona Equatorial	17
2.2.1 Dínamo da região E e eletrojato equatorial	18
2.2.2 Formação do dínamo da região F	24
2.2.3 Formação do Pico Pré-reversão	29
2.3 Campos Elétrico Perturbados	31
2.3.1 Penetração Direta	33
2.3.2 Dínamo Perturbado	35
2.4 Irregularidades Ionosféricas	37
2.4.1 Teoria de Rayleigh-Taylor Gravitacional (GRT)	38
2.4.2 Teoria Linear da instabilidade Rayleigh-Taylor generalizada	40
3 Tempestades Magnéticas, Índices Geomagnéticos	42
3.1 Erupções Solares	42
3.2 Tempestades Magnéticas	43
3.2.1 Fases de Tempestade Magnética	45
3.3 Índices Geomagnéticos	47

3.3.1	Índice Dst	48
3.3.2	Índice Kp	48
4	Resenha Bibliográfica	50
4.1	Bonelli, 2005	50
4.2	Birsa, 2002	54
4.3	Aarons, 1991	57
4.4	Anderson, 2004	59
5	Instrumentação	63
5.1	GPS(L1) - Natal	63
5.2	All Sky - Campina Grande	66
5.2.1	Descrição geral do instrumento	66
5.2.2	Dados de imagens	68
5.3	Digissonda - Fortaleza	69
6	Resultados	71
6.1	Anti-correlação	75
6.1.1	Um critério para previsão de cintilação	75
6.1.2	Determinando se há Anti-correlação	78
6.1.3	Sinais de Satélites	80
6.1.4	Estudo da Deriva Vertical $\vec{E} \times \vec{B}$	82
6.2	Não Anti-correlação	84
7	Conclusões e Discussões	105
7.1	Discussão	105
7.2	Conclusão	114
7.3	Perspectivas	118
8	APÊNDICE	120
8.1	Antena GPS da UFRN	120
8.2	Erros no sinal	121
8.3	Tempestades Magnéticas	122
8.4	Luminescência Atmosférica	123
8.5	Observação de bolhas no Imageador All Sky	125

8.6	Procedimento, instruções do receptor GPS	129
8.7	Estação de Natal - UFRN	131
	Bibliografia	140

Lista de Figuras

1.1	Constelação de satélites GPS ao redor do globo.	5
1.2	Irregularidades ionosféricas	12
1.3	Gráfico gerado do programa Scanfile.	13
1.4	Sinal de satélite.	13
2.1	Perfil da ionosfera	17
2.2	Eletrojato Equatorial	21
2.3	Eletrojato equatorial-Brasil	23
2.4	Diagrama Terminadouros	26
2.5	Formação do sistema Sq de correntes	28
2.6	Formação do dínamo da região F	29
2.7	Geração de campo elétrico zonal	30
2.8	Deriva de plasma vertical, Jicamarca	31
2.9	Penetração direta de campos elétricos	34
2.10	Dínamo perturbado	36
2.11	Teoria linear de Rayleigh-Taylor	39
2.12	Evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor	40
3.1	Reconexão magnetosférica	45
3.2	Fases de tempestade magnética	47
4.1	Comportamento de cintilação. Bonelli 2005	51
4.2	Gráfico do Scanfile	52
4.3	Noite calma vs noite perturbada. Bonelli 2005	52
4.4	Índices magnéticos. Birsa, 2002	54

4.5	Representação gráfica. Aarons1991	59
4.6	Deriva vertical. Anderson, 2004	61
4.7	S4 vs $\vec{E} \times \vec{B}$. Anderson, 2004	61
5.1	Diagrama de blocos, Imageador	67
5.2	Imageador All Sky	67
6.1	Ocorrência de cintilação em Natal	72
6.2	Mapa das estações	73
6.26	Digisonda 0610(19-21)	82
6.27	Fotômetro 0610(19-21)	82
6.29	Digissonda 0611(22-23-24)	83
6.30	Fotometro 0611(23-24)	83
6.33	digissonda 0701(14-15-16-17)	83
6.35	Dst-S4, Tempestade-1 Outubro 2006	84
6.38	Tempestade Janeiro 02	84
6.41	S4-Kp, Fevereiro 2007	84
6.44	Tempestade Fevereiro 13	84
6.3	Outubro 2006	87
6.4	Novembro 2006	87
6.5	Dezembro 2006	87
6.6	Janeiro 2007	87
6.7	Fevereiro 2007	87
6.8	Dst-S4, Tempestade-2 Outubro 2006	88
6.9	Dst-S4, Tempestade-1 Novembro 2006	89
6.10	Dst-S4, Tempestade-2 Novembro 2006	90
6.11	Dst-S4, Tempestade-1 Dezembro 2006	91
6.12	Dst-S4, Tempestade-2 Dezembro 2006	92
6.13	Dst-S4, Tempestade-1 Janeiro 2007	93
6.14	Dst-S4, Tempestade-2 Janeiro 2007	94
6.15	S4-Kp, Outubro 2006	95
6.16	S4-Kp, Novembro 2006	96

6.17	S4-Kp, Dezembro 2006	97
6.18	S4-Kp, Janeiro 2007	98
6.19	Scanfile Novembro-1	99
6.20	Scanfile Novembro-2	100
6.21	Scanfile Dezembro-1	101
6.22	Scanfile Janeiro-1	102
6.23	sinais-nov06	103
6.24	sinais-dez06	104
8.1	Bolhas outubro 2006	125
8.2	Bolhas novembro 2006	126
8.3	Bolhas dezembro 2006	127
8.4	Bolhas janeiro 2007	128
8.5	Arquivo sumário	129
8.6	Animação gráfica do passo dos satélites	130
8.7	Scanfile mostrando os satélites no céu	130
8.8	exemplo: S4-Kp vs Dia	131
8.9	Campus UFRN, estação ionosférica	132

Introdução

A eletrodinâmica gerada pela interação dos eventos solares e o campo magnético da Terra é de grande interesse, principalmente para os cientistas da ionosfera. Aplicação direta nas telecomunicações satelitais, que é motor da continuidade destas pesquisas em benefício do homem, as quais são dependentes destas tecnologias satelitais.

A ionosfera de baixas latitudes e região equatorial tem sido e continua sendo amplamente estudada porque ocorre um fenômeno que consiste na formação de extensas regiões onde a densidade do plasma da região F é drasticamente reduzida. A morfologia e a dinâmica desse fenômeno, referido como rarefações do plasma ionosférico (ou bolhas ionosféricas) afetam drasticamente os sistemas de telecomunicações e de posicionamento global – GPS, nestas latitudes.

Estas irregularidades e seus efeitos são estudadas por diversas técnicas de medidas tais como ópticas (imageadores, fotômetros), radiofrequência (radares, ionossondas, polarímetros, sistemas de GPS, etc), sondagem a bordo de satélites e foguetes. No entanto as causas da geração e desenvolvimento de tais irregularidades ainda têm muitas incógnitas. E seus efeitos são maximizados ao longo do pôr-do-sol e estendem-se ao longo da noite.

Após o pôr-do-sol aparece um campo elétrico intenso para leste devido às cargas de polarização, o qual levanta o plasma para cima violentamente carregando consigo as linhas de campo, e que por efeito de gravidade e gradientes de pressão forma-se a anomalia equatorial, que favorece a geração de instabilidades (bolhas) que são alinhadas às linhas de campo magnético, e a formação destas, é explicada pela teoria de instabilidades de Rayleigh-Taylor.

Começando aproximadamente a uns 100 kms de altura (composto basicamente de oxigênio), encontra-se plasma por milhares de quilômetros em altura, e sua densidade varia logaritmicamente. Esta camada ionizada tem um pico de densidade na camada F, a aproximadamente 350Km, que é de alta concentração durante o dia e menor concentração durante a noite, em comparação com a camada E, que existe durante o dia, e praticamente desaparece durante as horas a noite.

Explosões solares emitem uma quantidade de matéria (prótons principalmente – núcleos de hélio) que ingressam à Terra e interagem com o seu campo magnético que nos protege, perturbando-o.

O plasma vai para os pólos, podendo causar auroras. Enquanto o plasma faz isso, ele também penetra outras latitudes, e cria-se uma corrente (corrente de anel) a vários raios terrestres de altura.

Normalmente há um campo elétrico, devido ao dínamo da camada E e ao dínamo da camada F após o pôr-do-sol, na direção de oeste-leste (que vai fazer subir o plasma), que é o responsável por criar as irregularidades, que gerarão flutuações no sinal de satélite, o que conhecemos como cintilação, que é o material de nosso estudo.

Um dos efeitos de este campo elétrico, devido ao dínamo perturbado, é que se cria um campo elétrico na direção contrária (leste-oeste), e perturba o desenvolvimento normal da ionosfera, e praticamente anula, ou diminui o campo elétrico leste-oeste. Com isto, cancela-se o campo elétrico para leste e não teremos cintilação.

A hipótese, é que aparece uma componente de campo elétrico na direção contrária ao normal, no pôr-do-sol. Ocorre então uma atenuação de cintilação a qual encontra uma base no método Bonelli2005 para máximo solar, e nesta dissertação colocamos muita informação que demonstra a atenuação de cintilação para o mínimo solar, em tempestades que cumprem o critério de Bonelli(2005) [23], assim como o 1º critério de Aarons.

O plasma que chega aos pólos perturbando-o, mais o alto aquecimento, devido à precipitação de partículas energéticas do vento solar com intensificação das correntes aurorais (efeito joule), cria ondas de gravidade (ondas mecânicas) que chegam às baixas latitudes e perturbam a eletrodinâmica equatorial. Além dos campos elétricos que já estão afetando o equador, são agora afetados umas horas depois, ou dias depois por campos

elétricos de origem magnetosféricos que penetram perturbando novamente a ionosfera.

Neste trabalho, estudamos as tempestades magnéticas que ocorreram entre os meses de outubro de 2006 e fevereiro de 2007, por ser o período de maior probabilidade de ocorrência de irregularidades, motivados pelo trabalho prévio desenvolvido por Bonelli(2005) [23], onde apresenta uma anticorrelação entre atividade magnética e índice de cintilação, com isto conclui-se que em presença de tempestades magnéticas podemos ter melhor precisão no sinal GPS, o que foi encontrado no solar máximo (ciclo solar 23).

Este estudo faz parte da caracterização de um dos fenômenos desenvolvido na ionosfera, e em baixas latitudes magnéticas, especificamente na região equatorial, onde é possível utilizar o método aqui aplicado para comparação com dados de outras estações localizadas ao longo da anomalia equatorial.

Logo estudaremos também tempestades magnéticas que não cumprem o critério acima explicado, sendo possível o estudo graças aos dados de satélites GPS coletados com um receptor na banda de frequência L (L1) localizado em Natal (5.84°S, 35.20°O), no nordeste do Brasil. Tendo como suporte dados de presença de bolhas da estação de São João do Cariri-PB (7.38°S, 36.5°O), bem como da velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ da camada F (h'F) da estação de Fortaleza-CE (3.8°S, 38°O).

Um segundo objetivo é a caracterização das tempestades em estudo, com as categorias definidas em Aarons(1991) [1], segundo o comportamento do índice S4, tanto para as tempestades escolhidas com o método Bonelli2005([23]), como também as tempestades que não cumpriram este critério, mas que estão dentro do período em estudo.

Capítulo 1

Sistema de Posicionamento Global

Neste capítulo apresentamos os fundamentos necessários sobre o sistema GPS, explicando a constelação de satélites GPS, as características dos sinais de frequência na banda L, a passagem destes pela ionosfera onde encontra o plasma ionosférico e como este sofre alteração em seus parâmetros.

1.1 O sistema GPS

O Sistema de Posicionamento Global ou GPS (“Global Positioning System”) é um sistema de rádio-navegação baseado em satélites artificiais que servem para determinar a posição e velocidade de um objeto, fixo ou móvel, situado em qualquer ponto sobre ou próximo à superfície terrestre, em relação a um sistema de referência, e sob qualquer condição meteorológica. É composto por uma rede de 24 satélites (ver fig. 1.1) colocados em uma órbita aproximada de 20200 km de altitude, pelo Departamento Norte-Americano de Defesa, distribuídos em seis planos orbitais com uma inclinação de 55° em relação ao plano equatorial. Com um período de revolução de 12 horas siderais ou, mais precisamente, 11h 58m (Fedrizzi, 2003 [31], Beach, 1998 [17]). Isto significa que a posição dos satélites se repete, a cada dia, com aproximadamente 4 minutos de adiantamento em relação ao dia anterior.

Atualmente, a constelação é formada por 28 satélites operando em Blocos. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro (04) satélites GPS sejam visíveis em qualquer

local da superfície terrestre ou acima dela, a qualquer hora do dia, permitindo que o usuário, por uma triangulação, possa conhecer sua posição e tempo.

O GPS foi originalmente planejado para aplicações militares, complementando as limitações do sistema TRANSIT, cuja estrutura básica do sistema foi aprovada em 1973. E ao final dessa mesma época ficou disponível para uso civil, sendo que existe ainda restrição quanto à precisão.

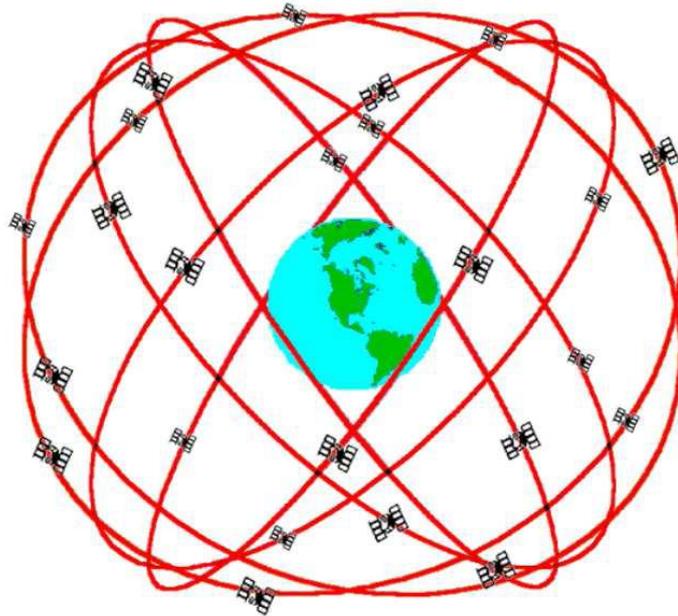


Figura 1.1: Constelação de satélites GPS ao redor do globo.

O sistema está estruturado em três segmentos: o espacial, de controle e de usuários. O sistema espacial é constituído pela constelação completa de satélites GPS. A estrutura básica foi apresentada umas linhas acima.

Os primeiros protótipos experimentais de satélites (Block I), do segmento espacial, foram lançados entre 1978 e 1985 e deram início ao seguinte conjunto, Block II e Block IIA, cujo lançamento começou em 1989 e prosseguiu até 1995, ano em que o sistema foi considerado completamente operacional com o posicionamento em órbita da constelação completa de 24 satélites. Atualmente, o sistema está composto, principalmente, pelos satélites tipo Block IIR e IIF. No futuro próximo estará sendo posto em órbita uma nova geração conhecida como Block III.

O segmento de controle está composto por uma série de estações de seguimento em Terra localizadas ao redor do globo terrestre e controladas por uma estação mestra que é responsável por integrar toda a informação e operar os satélites. Dentro das responsabilidades da estação mestra de controle, localizada em Colorado, estão as predições das órbitas dos satélites e atualizações da informação orbital destes, bem como ordenar as manobras para o monitoramento da órbita.

Por último, o segmento de usuários consiste nos receptores que são capazes de receber os sinais dos satélites, decodificá-los e utilizá-los para encontrar sua posição e velocidade. O grande avanço neste tipo de tecnologia tem permitido baixar os custos dos receptores e tornando-os acessíveis a um grande número de usuários.

1.1.1 Características dos sinais GPS

O sistema GPS é, em essência, um sistema de medida de tempos, onde a “observável básica” é o tempo de atraso entre a transmissão do sinal pelo satélite e a chegada até o receptor.

Cada satélite GPS transmite sinais centrados em duas frequências de rádio na faixa de microondas, 1575,42 MHz, chamada Link 1 ou L1, e 1227,60 MHz, ou L2 (Neil Ashby, 2003 [9]), que são canais que pertencem à banda de frequências L (1-2 GHz). Estas são múltiplos da frequência fundamental 10,23 MHz, padrão de tempo do sistema. As portadoras são: $L1 = 154 \times 10,23 = 1575,42 MHz$ e $L2 = 120 \times 10,23 = 1227,60 MHz$, cujos comprimentos de onda são, aproximadamente, 19,03 cm e 24,42 cm.

Dessa forma, L1 corresponde à alta frequência de 1,57542 GHz, enquanto L2 corresponde à baixa frequência de 1,22760 GHz [T. L. Beach (1998) [17]].

Os satélites também emitem uma mensagem de navegação, sendo identificado através de um número relacionado a um segmento particular do código pseudo-aleatório (“*Pseudo Random Noise-PRN*”), definido por uma seqüência de códigos modulados sobre as portadoras, que é atribuído individualmente a cada satélite. Dessa forma, todos os satélites GPS podem transmitir nas mesmas frequências, diferenciando-se apenas pela modulação das portadoras L1 e L2. Os códigos pseudo-aleatórios transportam informações

aos receptores através de seqüências de valores binários (0 e 1 , ou $+1$ e -1) que aparecem aleatórios, porém são identificados sem ambigüidades.

Os códigos PRN's modulam as portadoras. Os receptores identificam os satélites que estão transmitindo e também provendo os mais básicos níveis de informação oportuna. Cada um dos satélites transmitem dois tipos de código de ruído pseudo-aleatório (PRN), com códigos únicos C/A (“*Coarse/Acquisition code*”) e o código P (“*Precise code*”). Cada satélite identifica seu código P em ambos sinais L1 e L2, sendo que o código C/A só aparece na frequência L1.

Para usuarios civis, o departamento de Defesa dos Estados Unidos encripta o publicamente conhecido código P dentro do “código Y” sob o programa chamado de “*Anti-Spoofing*”, sendo que o código Y só é disponibilizado para usuários autorizados. Maiores informações podem ser encontradas nas referências T. L. Beach (1998) [17], M. A. Timbó (2000) [71], J.R. Bernardi e Landim (2002) [18], e Asbhy (2003) [9].

1.1.2 Efeitos da ionosfera no sinal de GPS

A ionosfera

A ionosfera é uma parte da alta atmosfera. É um plasma frio magnetizado que envolve a Terra. É a região da atmosfera onde a concentração de elétrons é suficientemente alta para ter um efeito importante na propagação das ondas de rádio. Enquanto sua fronteira inferior se localiza entre 50 ou 60km de altura sobre a superfície terrestre, a superior não está bem definida. A 1500km de altura, a densidade eletrônica não supera 1% do máximo da ionosfera, que se localiza entre os 300 - 400km.

Para obter as definições de Ionosfera, e suas características físicas, químicas, etc. seria importante o leitor revisar os livros de Rishbeth (1969) [64], Kelley (1989) [46].

Propagação de sinais eletromagnéticos na troposfera e na Ionosfera

A propagação dos sinais na troposfera depende principalmente da quantidade de vapor de água, da pressão do ar e da temperatura. Sinais UHF (Ultra High Frequency), que compreendem uma faixa de frequência de 300 MHz a 3GHz, onde estão incluídos os sinais GPS, são propagados de forma não dispersiva na troposfera. Isto quer dizer que não teremos efeitos de dispersão para ser considerados na passagem do sinal pela troposfera.

Quando os sinais de rádio do GPS são transmitidos dos satélites aos receptores, são afetados pela ionosfera ao se propagarem através deste meio dispersivo ¹ e anisotrópico, como pode ser visto na ilustração da fig. 1.2. Este fato é uma decorrência da natureza dispersiva da ionosfera, onde a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, neste meio, depende de sua frequência como explica Fedrizzi(1999) [30].

Os principais efeitos desta região atmosférica sobre os sinais do GPS são: o atraso da velocidade de grupo na modulação do sinal, o avanço na fase da portadora, o deslocamento Doppler, a distorção na forma de onda do pulso, a cintilação da fase do sinal, o enfraquecimento e a cintilação da amplitude do sinal. Esta natureza dispersiva da ionosfera causa erros sobre medidas que são as mais elevadas na propagação do sinal.

O GPS está sujeito a efeitos de um número de fontes de erros tais como erros ionosféricos e troposféricos, erro de multicaminho, erros de efemérides, geometria dos satélites, erro dos relógios dos satélites, perdas de ciclo, e sendo a mais importante fonte de erros a própria presença da Ionosfera. Uma boa referência explicando cada uma destas fontes de erro é a dissertação de X. Liao(2001) [50]. Uma tabela resumindo estes efeitos sobre o sinal pode ser encontrado no Apêndice (8.2).

A propagação de ondas eletromagnéticas através de um determinado meio satisfaz as equações de Maxwell para um fluido magneto-hidrodinâmico, com densidade de carga e corrente nulas. Temos as equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (1.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.3)$$

¹um meio, no qual a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas depende da frequência

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.4)$$

onde $\vec{B} = -\mu\vec{H}$ e $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$.

As quantidades \vec{D} , \vec{B} , \vec{E} e \vec{H} são os vetores deslocamento elétrico e magnético, intensidades do campo elétrico e magnético, e as constantes ϵ e μ representam a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética.

Com algumas manipulações é possível obter a equação de onda:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.5)$$

Esta equação pode ter uma solução de onda plana do tipo $E(r, t) = E_o \exp(\omega t - kr)$, onde ω é a frequência angular da onda e k é o vetor da onda. Utilizando a notação complexa, os operadores $\vec{\nabla}$ e $\partial/\partial t$ tornam-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} = i\omega \quad (1.6)$$

$$\nabla = -ik. \quad (1.7)$$

Substituindo esta notação na equação 2.12, obtém-se o número de onda (representado pelo módulo de k):

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.8)$$

A forma de 2.12 que expressa a propagação de ondas eletromagnéticas sem o termo dependente da condutividade (F.Chen, 1974 [25]), nos dá a velocidade da luz no meio.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.9)$$

No vácuo essa constante assume um valor bem conhecido $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s.

Relacionando 2.4 e 2.3, obtém-se:

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (1.10)$$

que é a velocidade de fase de uma onda plana.

A propagação da onda através do meio é caracterizada pelo índice de refração, e pode ser expressa como:

$$\eta = \frac{c}{v} \quad (1.11)$$

Onde c é a velocidade da luz, e v é a velocidade da onda no vácuo.

A Ionosfera não é um meio homogêneo. O índice de refração em uma dada localização na ionosfera pode ser expresso pela fórmula de Appleton-Hartree, como é descrita e desenvolvida em Rishbeth(1969) [64] e recentemente em Fedrizzi(1999) [30] em sua equação (3.47). Esta aquação pode ser aproximada como segue:

$$\eta^2 = 1 - X \quad (1.12)$$

como está deduzido em Fernando C. (2004) [19], sendo X definido como: $X = \frac{(f_N)^2}{f^2}$, onde f é a frequência da onda e $f \gg f_N$. Logo expandindo numa série binomial, obtemos:

$$\sqrt{1 - X} \approx 1 - \frac{X}{2} \quad (1.13)$$

então o índice 2.6 pode ser escrito como:

$$\eta = 1 - \frac{X}{2} \quad (1.14)$$

Fedrizzi(1999) [30] conclui de 1.14 que $X = \frac{40.3N}{f^2}$, sendo N e f , respectivamente, o conteúdo eletrônico total em $elect/m^2$ e a frequência em *Hertz*.

O efeito da refração ionosférica é diretamente proporcional ao número de elétrons, e inversamente proporcional à frequência da onda. Logo o erro estará associado à densidade de partículas (elétrons) no meio e à frequência.

O índice de refração da fase pode ser expressa por:

$$\eta_p = 1 - \frac{40.3N}{f^2} \quad (1.15)$$

1.1.3 Cintilação

O fenômeno denominado cintilação particularmente na banda L tem recebido considerável atenção em anos recentes [Kintner et al.(2005 [47]) por exemplo], porque muitos equipamentos estão integrando o GPS, e o impacto potencial de irregularidades ionosféricas sobre estes sistemas cresce.

O sinal de satélite se propaga através da ionosfera com pequenas mudanças quando a ionosfera é uniforme. Enquanto que, quando a ionosfera é irregular, refração pode ocorrer.

Cintilações ionosféricas são rápidas variações aleatórias em fase e amplitude do sinal GPS recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho do sinal ao atravessar a ionosfera. As regiões de irregularidades de densidade de elétrons na camada da ionosfera, como se apresenta na figura 1.2, podem mover-se através da ionosfera, e a linha que une satélite-receptor também se move relativo às irregularidades.

Variações rápidas na refração do sinal acontecem e o sinal é refratado nestas irregularidades (atuando como uma rede de difração). A frente de onda emergente exibe mútua interferência e resultante variação em fase e amplitude do sinal são observados no receptor. A severidade nas quais as irregularidades ionosféricas produzem cintilação são relacionados à frequência do sinal comparada à frequência do plasma e influência das irregularidades [El-Gizawy (2003) [27]].

Estas flutuações de sinal devido às irregularidades de densidade de plasma da região F foram reportadas numa ampla faixa de frequências (Aarons, 1993 [2]; A.DasGuta, 2006 [26]). Recentes observações (Beach and Kintner, 1999; Bhattacharyya et al., 2000 [20]; Valladares et al., 2004 [74]), usando os satélites GPS na zona equatorial e de baixas latitudes, têm revelado a ocorrência de cintilação em UHF, VHF, e baixas frequências.

De acordo com Kintner *et al.*(2001), a magnitude da cintilação depende da distribuição espacial e da amplitude das irregularidades de densidade. O tamanho destas irregularidades que produzem cintilações na banda L correspondem à primeira escala de Fresnel da onda de rádio. A escala de Fresnel é dada por $\sqrt{2\lambda z}$, onde λ é o comprimento de onda e z a altitude da camada em estudo da ionosfera.

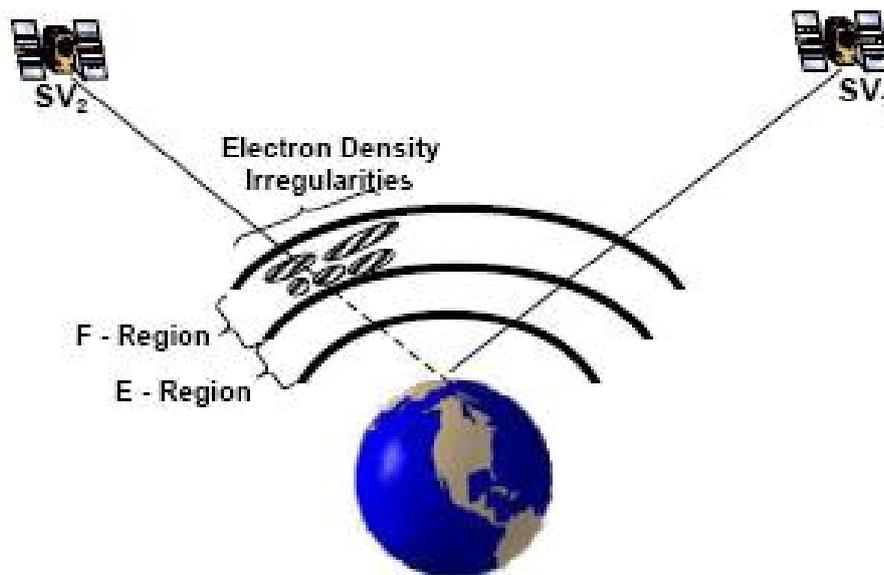


Figura 1.2: Irregularidades ionosféricas
 Ilustração mostrando cintilação sofrida pelo sinal ao passar por irregularidades presentes na ionosfera.

Considerando que a camada de irregularidades se encontra a uma distância de 350km e que o satélite encontra-se no zênite, pode-se dizer que as irregularidades que mais contribuem para a cintilação em sinais GPS (L1) são as irregularidades com escalas de tamanho de aproximadamente $\lambda_F = 400$ metros.

Estudos prévios mostram que cintilações são observadas a noite toda, isto utilizando sinal VHF (Valladares et al., 1996 [73]), onde as irregularidades de tamanhos menores se desvanescem mais rápido, permanecendo as maiores por maior tempo (Kelley (1989) [46]). Estando nossos dados no mínimo solar, vamos apresentar a ocorrência de cintilações no sinal de vários satélites, que acontecem esporadicamente, mas não a noite toda. Os dados são pegos das 2100 até 2900 TU. Um exemplo pode ver-se nas figuras 1.3 e 1.4.

Nas figuras 1.3 e 1.4 apresenta-se o exemplo dos efeitos de uma bolha ionosférica equatorial no índice de cintilação S4 e na potência do sinal de GPS recebido obtida na estação de Natal. No lado esquerdo temos um diagrama de elevação-azimut do PRN 04. O sinal de potência para dia com e sem cintilação é mostrado no painel direita superior.

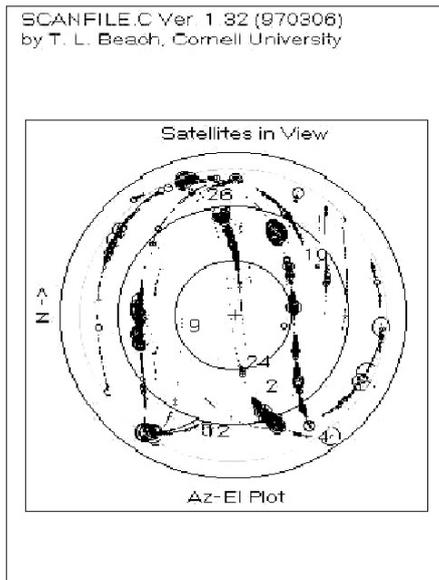


Figura 1.3: Gráfico gerado do programa Scanfile.

Vemos as trajetórias percorridas pelos satélites GPS (em especial PRN 04) no campo visual do receptor de Natal.

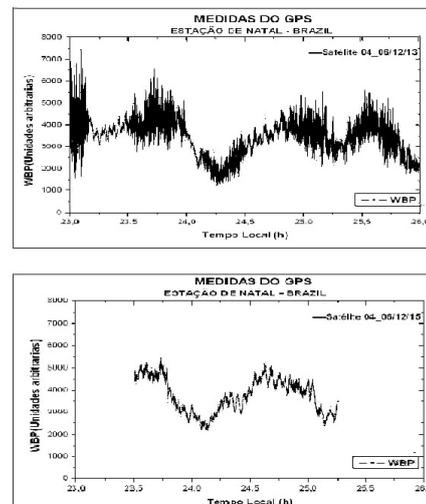


Figura 1.4: Sinal de satélite.

O painel superior mostra o satélite PRN 04 num dia com cintilação e o painel inferior o PRN 04 para um dia sem cintilação.

No painel direita inferior está o gráfico de dia sem cintilação. Na parte direita superior é para um dia que apresenta cintilação, isto pela presença de uma bolha entre 2330 e 2530 LT.

A amplitude do sinal do GPS mostrada no painel superior direito inicialmente incrementa enquanto o satélite se levanta. A mudança na amplitude é resultado da atenuação ionosférica, que é geralmente mais baixo em elevações mais baixas. Quando o sinal encontra a bolha, começa também a cintilar em amplitude e as cintilações terminam quando o sinal sai da bolha.

Dois índices são usados para descrever a ocorrência e/ou quantificar a magnitude das cintilações ionosféricas. O primeiro é chamado índice S4 e é a relação do desvio padrão das flutuações da potência do sinal sobre a média da potência. Este índice S4 é calculado tipicamente sobre um período de um minuto. O segundo é chamado sigma-phi e é o desvio padrão das flutuações da fase.

Depois do pôr-do-sol o campo magnético horizontal no equador, na presença do campo elétrico para leste, mantém levantando o plasma ionosférico, permitindo a geração do

equivalente eletromagnético da instabilidade de Rayleigh-Taylor. Se as condições forem favoráveis, dentro de uma hora após o pôr-do-sol, se formam bolhas no plasma ionosférico, levantando-se vários quilômetros.

As bolhas evoluem ao longo das linhas do campo magnético e, enquanto se levantam, as projeções das linhas do campo mapeam-se para latitudes mais elevadas que, eventualmente, alcançam as cristas das anomalias ($\pm 15^\circ$ a $\pm 20^\circ$ de latitude). O movimento ascendente da bolha evolui por cerca de uma hora, criando gradientes de densidade do elétron e irregularidades ionosféricas. Depois que o efeito da instabilidade termina, os gradientes e as irregularidades subsistem na ionosfera ao longo da noite, dissipando-se lentamente. No amanhecer a ionosfera preenche os vazios deixados pelas bolhas e irregularidades ionosféricas.

Como explicado acima, as bolhas e as cintilações associadas com elas começam logo após o pôr-do-sol. Predizer a existência das cintilações em uma noite específica é complexo. De um ponto de vista climatológico as bolhas são mais prováveis de ocorrer quando os pontos do pé de uma linha do campo magnético estão alinhados com o terminadouro.

Assim, para regiões onde as linhas da longitude geográfica e as linhas da longitude magnética estão paralelas, portanto as bolhas são mais prováveis de ocorrer durante os equinócios em setembro e em março (Rui T. M., 1985 [70]; Abdu et al., 1992 [4]). Onde as linhas não estão paralelas, o período de máxima ocorrência de bolhas é deslocada. Por exemplo, no Brasil a estação para bolhas é de novembro até fevereiro [Rui T. M.(1985) [70]]. O fator seguinte a considerar é a atividade geomagnética. Algumas tempestades magnéticas tendem a suprimir a ocorrência das bolhas antes da meia-noite local e a realçar sua ocorrência após a meia-noite local. Há um consenso que em condições de equinócio durante o máximo solar há condições que conduzem à geração de irregularidades equatoriais em todas as longitudes durante tempo magneticamente calmo (ver o artigo de Basu and Basu [1985 [14], e referências dentro dele]).

Durante o máximo solar e durante o pico da estação, as bolhas podem ocorrer em 70-80 por cento das noites. A habilidade de prever a ocorrência das bolhas em uma dada noite é uma área de pesquisa ativa.

Capítulo 2

Física na ionosfera

Nosso enfoque será particularmente para latitudes equatoriais, e para isto apresentaremos a física que governa a dinâmica na ionosfera da Terra, enfatizando a formação de irregularidades ionosféricas e o efeito de tempestades magnéticas. No capítulo de resultados vamos mostrar resultados destas inquietudes.

2.1 A ionosfera

A parte ionizada da atmosfera, a ionosfera, contém um significativo número de elétrons livres e íons positivos. O meio como um todo é eletricamente neutro, sendo que para um número de cargas positivas temos igual número de cargas negativas dentro de um volume dado. Embora as partículas carregadas podem ser uma minoria entre os constituintes neutros, elas exercem grande influência sobre as propriedades elétricas do meio, e daí sua importância. Esta camada surge como o produto da densidade neutra (que cai com a altura), e a intensidade de ionização (que aumenta com a altura), como bem é esquematizado na fig. 2.1 (a), o que estaria dando um primário perfil de densidade da camada superior.

A ionosfera estende-se desde 80 Km, mas a densidade de elétrons é maior acima de 100 Km, atingindo um máximo (da ordem de 10^5cm^{-3}) no pico da camada E (ao redor de 120 Km), e um maior máximo (da ordem de 10^6cm^{-3}) no pico (ao redor de 300 Km) da camada F₂.

Os primeiros indícios que sugerem a presença na atmosfera terrestre de uma camada

elétricamente condutora, que agora chamamos de ionosfera, provêm dos estudos do campo magnético terrestre. As pequenas variações diárias do campo magnético observadas na superfície da Terra são conhecidas desde o século XVIII e já em 1839 V. F. Gauss especulou com a idéia que sua origem poderia ter relação com correntes elétricas atmosféricas.

A partir destas variações, Balfour Stewart em 1883 inferiu pela primeira vez a existência da ionosfera como uma região elétrica condutora e Schuster em 1889 calculou matematicamente as correntes elétricas que deviam fluir nela.

Por outro lado, já em 1860 Lord Kelvin também havia sugerido a existência de uma camada condutora em conexão com o fenômeno de eletricidade atmosférica. Esta teoria não era muito conhecida fora do âmbito científico, de modo que quando em 12 de dezembro de 1901 G. Marconi logrou transmitir ondas de rádio através do Atlântico, desde Inglaterra até Norte América, a presença de uma região ionizada da alta atmosfera foi proposta como a explicação deste evento. Esta proposta foi realizada em 1902 independentemente por O. Heaviside em Gran Bretanha, A. K. Kennelly em Estados Unidos e K. Nagaoka em Japão.

Na mesma década, J. E. Taylor e J. A. Fleming, entre outros, sugeriram que a camada condutora se produzia pela ação da radiação ultravioleta solar ionizante sobre a alta atmosfera. Isto sugere um controle solar sobre a propagação das ondas de rádio, o que se confirmou tão logo como se estabeleceram as comunicações comerciais através do Atlântico. Encontrou-se que a potência das sinais que se recebiam variava com o dia, a estação e o ciclo solar de uma maneira regular e que se perturbavam quando o campo magnético terrestre se encontrava perturbado.

Desde 1920 a ionosfera tem sido extensivamente explorada por científicos, sendo que em 1924 E. V. Appleton e M. Barnett obtiveram a primeira evidência experimental definitiva da camada Kenelly-Heaviside (chamada camada E por Appleton) estudando o desvanescimento de uma onda de rádio por interferência do sinal direto e refletido pela ionosfera. A primeira medida direta da camada condutora se pode atribuir aos americanos G. Breit e M. A. Tuve em 1925 que utilizaram um precursor das modernas ionosondas: enviavam pulsos de rádio de curta duração para calcular a altura aparente de reflexão, sendo eles os primeiros pioneiros junto com Appleton. Foi o australiano R. A. Watson-Watt quem propôs em 1926 o nome de "Ionosfera", entanto que não se utilizou até alguns anos

depois [Rishbeth and Garriott, 1969 [64]], cerca de 1932.

Appleton reconhece a presença de mais de uma camada ionizada, e a ele são devidas os nomes E e F; depois eletrons foram deteidas na região D extendéndose abaixo da região E dentro da mesósfera. Ela apresenta uma estrutura vertical típica como é mostrado na fig. 2.1 (b).

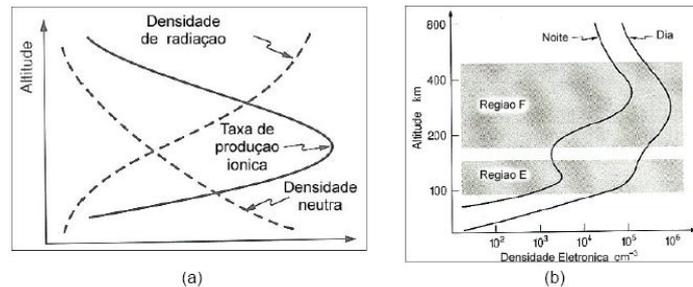


Figura 2.1: Perfil da ionosfera

(a) Perfil da ionosfera segundo a função de Chapman.(b) Perfil da ionosfera nos períodos diurno e noturno. FONTE: Adaptada de Kirchhoff (1991) [?]

Desde então, a ionosfera tem sido extensivamente estudada e muitas de suas principais características, embora não todas, são agora razoavelmente bem compreendidas em termos dos processos físicos e químicos.

2.2 Eletrodinâmica da Ionosfera da Zona Equatorial

Os campos elétricos são importantes por darem as condições físicas necessárias (deriva de plasma vertical por exemplo) para a geração de instabilidades no plasma ionosférico propiciando assim a formação de bolhas, que são o ponto principal deste trabalho de mestrado.

2.2.1 Dínamo da região E e eletrojato equatorial

As equações que governam a eletrodinâmica da região E (entre 90 e 140 km) são as equações de Maxwell no estado estacionário e as equações de momentum no estado estacionário aplicadas tanto para íons como para elétrons. Usamos a divergência da equação $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$, como $\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = 0 = \vec{\nabla} \cdot \vec{J}$, obtém-se que a densidade de corrente \vec{J} não é divergente ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$), onde \vec{H} é a intensidade do campo magnético. O $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ significa que a corrente que flui em um condutor é estacionária. Ou seja, a densidade de corrente permanece constante no tempo em qualquer ponto do condutor e o número de cargas elétricas que passam em um ponto qualquer do condutor na unidade de tempo não muda. Por tanto, para uma distribuição de corrente independente do tempo a integral de superfície da corrente estendida a qualquer superfície fechada será nula.

Até este ponto foi apresentado só a componente vertical do campo elétrico equatorial e algo da sua morfologia. A componente zonal é bem pequena mas muito importante, desde que causa o movimento do plasma verticalmente. Este movimento afeta grandemente a densidade do plasma causando que interatue com pequenas diferentes densidades de plasma enquanto este muda de altura. A componente zonal do campo elétrico e a componente vertical do horário diurno são devidos primariamente aos ventos na região E, ventos de marés. Estes ventos de marés são produzidos pelas oscilações de marés da atmosfera que, por sua vez, são o resultado da absorção de radiação solar na estratosfera e troposfera. Em geral, na região E estes ventos de marés são caracterizados pelos modos de maré diurno e semidiurno.

Teoria de marés é complexa. As equações de atmosfera neutra seriam solucionadas sobre uma camada esférica rotando sujeito ao campo gravitacional da Terra. Considerável informação é obtida estudando as oscilações livres da atmosfera -isto é, os modos normais do sistema. As amplitudes destes ventos associadas a cada um destes modos de maré varia com a latitude de acordo com as funções de Hough (Forbes, 1981 [37]; Tarpley, 1970 [?]).

Estos ventos de marés (\vec{U}_m), por meio das colisões entre partículas neutras e carregadas, deslocam os íons através das linhas de campo magnético (\vec{B}), enquanto que os elétrons têm seu movimento restrito na direção do campo magnético. Assim, segundo a teoria do dínamo, uma corrente elétrica começa a fluir nesta região, em resposta ao campo elétrico induzido por $\vec{U}_m \times \vec{B}$. A corrente elétrica associada a esse campo induzido, em

geral, não satisfaz a condição $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$, em outras palavras, a corrente associada ao campo induzido $\vec{U}_m \times \vec{B}$ é não estacionária. Para que a corrente na região E seja não divergente, campos elétricos de polarização devem ser estabelecidos de modo que qualquer variação da corrente associada a este campo seja compensada pela corrente associada aos campos elétricos de polarização. Por tanto o campo elétrico total da região E é formado pelo campo elétrico induzido e pelo campo elétrico de polarização, \vec{E}_p . Isto é representado:

$$\vec{E} = \vec{E}_p + \vec{U}_m \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Na região E da ionosfera, o tensor condutividade não é diagonal e os termos Hall seriam também considerados. Ainda mais, o campo elétrico não pode ser tomado como completamente auto-generado por campos de vento local. A ionosfera de dia é um bom condutor elétrico no qual correntes são guiadas pelas marés termosféricas inferiores. O campo de vento de maré da região E \vec{U}_m é global e seria guiado por um sistema de correntes global dado por $\vec{J} = \tilde{\sigma}[\vec{U}_m \times \vec{B}]$. Agora, desde que ambos $\tilde{\sigma}$ e \vec{U} dependem da posição a corrente \vec{J} não precisa, em geral, ser livre de divergência. Aqui entra nosso campo elétrico \vec{E} tal que a divergência da corrente total é zero:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot [\tilde{\sigma} \cdot (\vec{U}_m \times \vec{B})] = 0 \quad (2.2)$$

onde $\tilde{\sigma}$ é o tensor de condutividade elétrica.

Para entender melhor a física do dínamo da região E, considerar-se-à uma camada condutora fina, onde o fluxo de corrente está confinado entre 90 e 140 km de altura. Além disso, correntes verticais podem ser desprezíveis. Logo, quando um campo magnético \vec{B} e um campo elétrico \vec{E} , perpendiculares entre si, atuam sobre o condutor elétrico, dois tipos de correntes surgem: uma corrente perpendicular denominada Hall e uma corrente paralela à direção do campo elétrico denominada corrente Pedersen. Isto é justamente o que acontece na região E equatorial. A fig. 2.2 ilustra o mecanismo do dínamo E, onde a camada estreita está sujeita a um campo elétrico zonal constante ($E\hat{x}$). O campo elétrico perpendicular a \vec{B} , \vec{E}_x , cria uma corrente elétrica na sua própria direção e sentido, a chamada corrente Pedersen ($\sigma_p E_x$). Além disso, E_x cria também uma corrente perpendicular ao plano (\vec{E}_x, \vec{B}), no sentido $-\hat{z}$, a chamada corrente Hall ($\sigma_H E_x$). Já que a

corrente Hall não pode fluir através dos limites, as cargas se acumulam em suas fronteiras. Isto gera um campo elétrico de polarização dirigido para cima ($E_z \hat{z}$). Em um estado inicial deste modelo de camada, não há corrente vertical que pode fluir e a corrente Pedersen ($\sigma_p E_z$) (gerado pelo campo de polarização $\sigma_p E_z$) na direção $+\hat{z}$ cancela a corrente Hall ($\sigma_H E_z$). Além disto, o campo elétrico $E_z \hat{z}$ também gera uma corrente Hall na direção $+\hat{x}$ que se soma à corrente Pedersen ($\sigma_p E_x$). Pelo já explicado, a soma das duas correntes verticais leva a:

$$\vec{J}_z = -\sigma_H \vec{E}_x + \sigma_p \vec{E}_z = 0 \quad (2.3)$$

isto implica que:

$$\sigma_H E_x = \sigma_p E_z \quad (2.4)$$

logo:

$$E_z = \frac{\sigma_H}{\sigma_p} \cdot E_x \quad (2.5)$$

Desde que $\sigma_H > \sigma_p$, a componente do campo elétrico vertical excede consideravelmente a componente de campo elétrico zonal. Em resumo, $E_z(z)$ têm a mesma dependência z como a $\frac{\sigma_p(z)}{\sigma_H(z)}$ função. Na direção horizontal (\hat{x}) a soma das duas correntes zonais leva ao resultado:

$$J_x = \sigma_H E_z + \sigma_p E_x \quad (2.6)$$

usando o resultado da equação 2.5 a corrente zonal total fica na forma:

$$J_x = \left[\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1 \right] \sigma_p E_x = \sigma_c E_x \quad (2.7)$$

Este resultado mostra que a condutividade zonal da região condutora é aumentado acima da condutividade Pedersen, por um fator $(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1)$. A grandeza $(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1)\sigma_p$ é conhecido como condutividade Cowling.

Notar-se-à que o vento neutro não entra neste cálculo; o eletrojato é construído pelos ventos de marés globais que criam a componente de campo elétrico zonal diurno medido

no equador. De fato, a última equação mostra que a condutividade zonal está aumentando por um fator de $\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1$ o qual deixa o jato intenso de corrente no equador magnético.

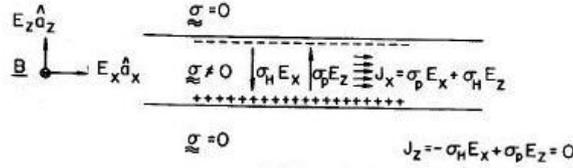


Figura 2.2: Eletrojato Equatorial
O modelo do eletrojato equatorial na geometria de barra.

Eletrojato equatorial

Na ionosfera (durante o dia), os ventos neutros geram um campo elétrico de polarização o qual predominantemente aponta na direção leste e a direção do campo magnético que aponta ao norte. Isto gera uma deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ para cima. O que claramente podemos ver entre 1000 até 1600-1700 horas LT aproximadamente segundo os resultados apresentados por Bonelli(1985) [24] no estudo das derivas com dados do ROJ localizado em Lima-Perú. Após este tempo o campo elétrico para leste se intensifica, o que eleva a camada ainda mais. Efeito gerado após o pôr-do-sol local em todas as latitudes equatoriais.

Dos gráficos de derivas para oeste e deriva vertical se observa que o comportamento geral é para cima e oeste durante o dia, e para baixo e leste durante a noite. As derivas mudam para o oeste ao amanhecer [Woodman, 1972 [76]], e após o pôr-do-sol muda para o leste; com características particulares para o mínimo e máximo solar que podem ser aprofundados em algumas referências[Kelley (1989) [46] e Bonelli (1985) [24]].

No equador magnético, onde o campo magnético é exatamente horizontal, este campo elétrico tem um efeito interessante: A deriva resultante dirigida para cima $\vec{E} \times \vec{B}$ dos elétrons gera uma carga negativa para cima e uma carga positiva abaixo, na região E ionosférica (entre 90 até 130 Km de altitude). O campo elétrico resultante previene a posterior deriva ascendente dos elétrons. No seu lugar, agora são propulsados para o oeste pelo campo elétrico com direção leste. Este movimento para o oeste dos elétrons produz uma corrente elétrica para o leste que é chamado de Eletrojato Equatorial. O

movimento dos íons é inibido em grande parte nesta altitude, devido a suas colisões com o gás neutro.

No pôr-do-sol, quando a ionização da baixa ionosfera diminui, esta deriva para cima conduz a uma posição na qual uma região de plasma densa é situada sobre a região esgotada em plasma. Em alguns dias a região superior de plasma denso desenvolve instabilidades, também denominadas bolhas de plasma equatorial (EPB - Equatorial Plasma Bubbles). Estas irregularidades na densidade de plasma levam à dispersão de ondas de rádio.

O equador magnético cruza a costa oeste de América do Sul aproximadamente em 13° ao sul do equador que depois curva-se ao norte para cruzar o equador geográfico, passando pelo Norte-Nordeste do Brasil (Figura 2.3).

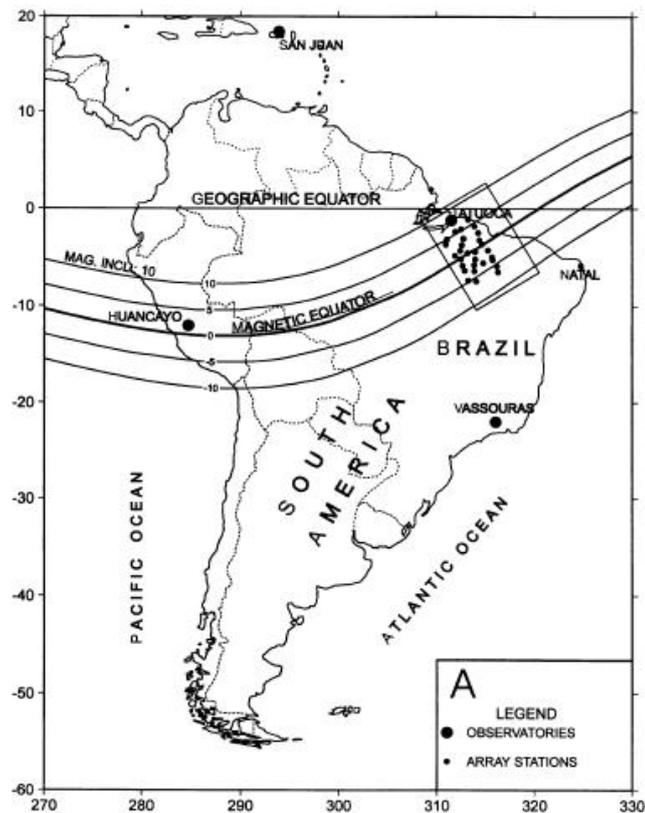


Figura 2.3: Eletrojato equatorial-Brasil

Gráfico mostrando o eletrojato equatorial na América do Sul, mostrando a estação de Natal. Pego de: Rigoti et al., 1999 [62]

Efeito Fonte e Anomalia Equatorial

Uma importante característica da região F de baixa latitude é a presença da anomalia equatorial, com pico na densidade de plasma em $\pm 15^\circ$ latitude dip e mínimo no equador magnético. Estes são o resultado do movimento para cima do plasma no equador magnético e sua conseqüente difusão ao longo das linhas de campo magnético [Hanson and Moffett, 1966 [42]]. A crista afasta-se do equador com incremento em tempo local, quando a região F no equador se move à muito altas altitudes, e alcança um máximo desenvolvimento ao redor de horas da tarde [Basu and Das Gupta, 1968 [12]].

Em algumas noites uma forte ressurgência da anomalia toma lugar; isto é provavelmente devido ao bem conhecido levantamento pré-inversão (prereversal enhancement) da deriva vertical, o qual geralmente ocorre ao redor das 1900LT [Woodman, 1970 [75]; Tanaka, 1981 [68]].

A anomalia equatorial, que é uma anomalia na distribuição latitudinal de ionização, caracteriza-se por uma menor concentração de partículas ionizadas na região equatorial quando comparada a regiões de mais alta latitude, contrariando o que se poderia esperar pois, no setor equatorial, existe uma maior incidência de fótons solares por unidade de área. Na verdade, nas regiões próximas ao equador geomagnético existe uma depleção de plasma, havendo um pico de concentração eletrônica em torno de aproximadamente $\pm 20^\circ$ de latitude magnética.

O campo elétrico diurno leste-oeste combinado ao campo geomagnético norte-sul (ambos paralelos à superfície terrestre no equador) gera uma fonte de plasma que se estende por centenas de quilômetros afastados do equador (Balan et al., 1997 [10]). Durante o dia, a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ eleva o plasma para altas altitudes, deriva ascendente. O plasma que foi levado para cima, pelo movimento ascendente, difunde-se para baixo, ao longo das linhas de campo magnético, devido à força de gravidade e gradientes de pressão, sendo levado para as regiões afastadas do equador. A combinação entre campo elétrico e campo magnético produz um aumento no movimento do plasma. Esse movimento do plasma, ascendente durante o dia, e descendente, durante a noite, é denominado efeito fonte. Portanto, os picos na concentração eletrônica nas regiões afastadas do equador são

mantidos pela difusão do plasma proveniente das regiões sobre o equador.

Um bem sucedido PRE tem sido encontrado a ser um dos importantes indicadores associados com o início do Spread F equatorial (ESF) por Basu et al., [1996] [13] e Fejer et al., [1999] [36]. Valladares et al., [2001] [72] demonstrou a existencia de uma relação que acerca a evolução temporal e os perfis do TEC como uma função de latitude perto do pôr-do-sol e o início do ESF.

O PRE da deriva vertical é importante para a geração de ESF [Sunanda et al., 2001 [15]]. Sendo que o efeito fonte está ligado à presença de spread-F, e indica que em presença de Spread-f a altura da anomalia equatorial é maior que dias de não spread-F [?].

Um dos bem conhecidos pré-requisitos para o início do ESF é o rápido levantamento durante a tarde da camada F (Abdu et al., 1983 [6]; Farley et al., 1970 [28]) sob ação do dínamo da região F, o qual produz o aumento pré-inversão no campo elétrico para leste (Woodman, 1970 [75]; Fejer et al., 1979 [33]).

É possível observar uma pronunciada depleção próximo ao equador magnético, e picos na concentração de elétrons entre 15° e 20° ao norte e ao sul do equador magnético. Esta anomalia se ocorre durante horas de dia, sendo mais pronunciada no pôr-do-sol, mostrando variações com a longitude e atividade solar.

2.2.2 Formação do dínamo da região F

É bom saber que a teoria da condutividade considera a ionosfera formada por camadas estreitas horizontais, caracterizadas por condutividades anisotrópicas devidas ao campo magnético da Terra, além da presença -claro- do campo elétrico, segundo isto três diferentes correntes alébricas podem fluir na ionosfera (coisa que não sera formulado aqui porque fuge do objetivo deste texto), especificamente na região E mas tendo contribuição na camada F, sendo estas a corrente paralela, a corrente Pedersen e a corrente Hall.

Na região F (equatorial) da ionosfera κ_i e κ_e são muito altos e daí que as velocidades dos íons e elétrons perpendiculares a \vec{B} são aproximadamente iguais, o que significa que o movimento do fluxo de plasma (velocidade) pode ser definido e relacionado ao campo

elétrico. Logo, o mecanismo pelo qual os ventos (neutros) podem gerar estes campos elétricos e também correntes na região F foi primeiramente explicado por Rishbeth(1971) [63] e logo desenvolvido como modelo numérico por Heelis et al.(1974) [43].

Observações do pico da região F equatorial foram feitas desde alguns séculos atrás, sendo um dos resultados importantes as derivas vertical, e deriva para leste do plasma ionosférico. Estas derivas mostram o comportamento do plasma ao longo do dia, e como se comporta com as estações do ano e a atividade solar. O resultado mais importante e bem conhecido do movimento de deriva do plasma ionosférico da região F é que durante horas de dia a deriva é para cima e para oeste, a noite é para abaixo e para leste. as características são:

1. O pico da deriva para leste no horário de noite é duas vezes maior que o pico da deriva para oeste durante o dia.
2. As derivas zonais são muito maiores que as velocidades verticais.
3. A deriva vertical é com frequência fortemente afetado justo depois do entardecer, mas não apresenta característica similar perto do amanhecer.
4. Há forte efeito do ciclo solar na deriva vertical e um moderado efeito sazonal, tanto na deriva vertical como na deriva para leste.

Estas derivas são uma resposta direta do campo elétrico perpendicular local, como segue:

$$\vec{E}_{\perp} = \vec{V}_i \times \vec{B} \quad (2.8)$$

onde \vec{B} é o campo magnético local, e \vec{V}_i é a velocidade de deriva.

Os campos elétricos segundo a equação de Maxwell ($\vec{\nabla} \times \vec{D} = 0$) implica que:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.9)$$

um resultado em palavras é que a diferença de potencial entre os terminadouros entardecer-amanhecer quando o campo elétrico esta para oeste seria igual que quando o campo elétrico esta para leste (de dia).

Da equação de Poisson:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.10)$$

espera-se que o campo elétrico do lado dia e lado noite observado seja o resultado do aparecimento de cargas de polarização nos terminadouros, onde o terminadouro do entardecer seria carregado negativo e o terminadouro do amanhecer positivo.

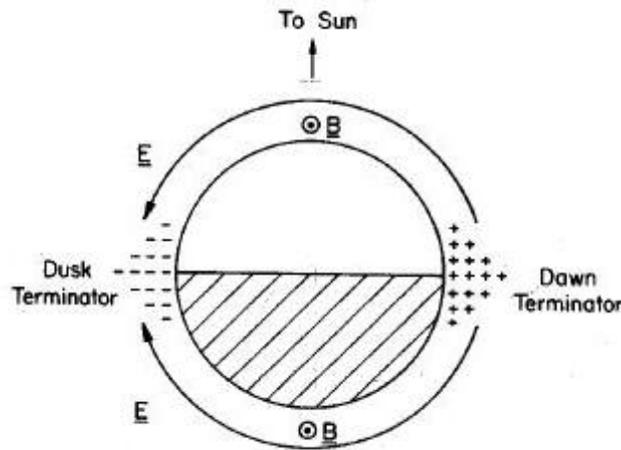


Figura 2.4: Diagrama Terminadouros
Diagrama mostrando a componente do campo elétrico zonal e à relação com a densidade de carga nos terminadouros.

Os ventos termosféricos governam no movimento do plasma ionosférico na camada F, e de observações de dados de Jicamarca se têm uma correlação na velocidade da deriva do plasma com a velocidade de vento termosférico.

A teoria do dínamo atmosférico é quem explica o surgimento do vento termosférico que praticamente é a bateria do campo elétrico do dínamo da região F. Nessa teoria marés (Heelis, 1974[43]) atmosféricos (geradas pelo aquecimento solar e pela atração lunar) provocam o surgimento de ventos neutros. Esses ventos neutros, de velocidade \vec{U} , durante o dia sopram em direção aos polos ao longo do campo magnético induzindo a criação de campos elétricos em altas latitudes $\vec{E} = \vec{U} \times \vec{B}$, pois nos pólos a inclinação do campo magnético é maior. Esses campos vão gerar correntes (\vec{J}):

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot \vec{E} \quad (2.11)$$

onde $\tilde{\sigma}$ é o tensor de condutividade elétrica.

Essas correntes podem ser divergentes, mas para os pontos onde $\vec{J} < 0$ cargas de polarização serão criadas instantaneamente para modificar a densidade de corrente tornando o campo não divergente. Esse campo elétrico de polarização pode ser representado por um gradiente de potencial escalar $\nabla\Phi$ (Kudeki, 1983 [48]).

Desse modo, o campo total do dínamo gerado sera:

$$\vec{E}_D = (\vec{U} \times \vec{B}) - \nabla\Phi \quad (2.12)$$

onde $\nabla\Phi$ é o potencial escalar eletrostático.

A densidade de corrente total fica da forma:

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot \vec{E}_D = \tilde{\sigma} \cdot [(\vec{U} \times \vec{B}) - \nabla\Phi] \quad (2.13)$$

Este sistema de correntes vai polarizar positivamente o terminadouro do lado do amanhecer e negativamente do lado do anoitecer. Devido às condutividades, a ação do dínamo é mais efetiva na região do equador magnético, a uma altura entre 90 e 120 quilômetros. Nessa região aparece uma corrente que flui do terminadouro do amanhecer para o terminadouro do anoitecer no lado dia e lado noite. Dessa forma a corrente terá sentido leste no lado dia e sentido oeste no lado noite (ver fig. 2.5). Entanto que, sua intensidade do lado dia é superior a do lado noite, devido a densidade eletrônica ser maior do lado dia (lado iluminado pelo sol).

O vento termosférico na região equatorial provê a fonte de energia que mantém o campo elétrico na ionosfera. O vento neutro agindo sobre a ionosfera da região F causa uma corrente elétrica que flui na direção vertical $J_Z = \sigma_P u B$ (considerando $\sigma_P \gg \sigma_H$). A corrente gerada tem um pico da ordem de $0,01 \mu A/m^2$. No entanto, sP varia consideravelmente com a altura devido a dependência com o produto $\eta\nu_{in}$. A componente zonal do vento (u) pode também variar com a altura, mas supõe-se que a viscosidade mantém essa variação pequena na região F. Em qualquer altura tem-se um $d(\sigma_P u B)/dZ \neq 0$, dessa forma um campo elétrico será formado para manter a livre divergência de corrente. Além disso, supõe-se que nos terminais das linhas de campo o fluxo de corrente seja nulo,

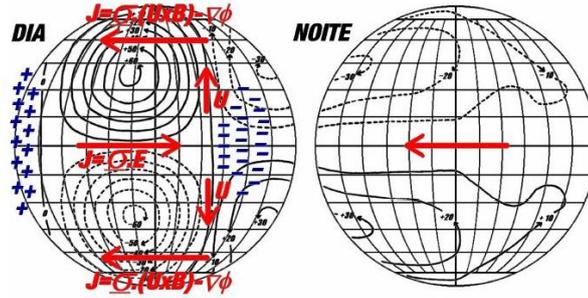


Figura 2.5: Formação do sistema Sq de correntes
 Formação do sistema Sq de correntes baseado na teoria do dínamo atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros \vec{U} no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes $\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot (\vec{U} \times \vec{B}) - \nabla \Phi$ que polarizam os terminadouros e o eletrojato equatorial $\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot (\vec{E})$. FONTE: Adaptada de Chapman e Bartels (1940, p. 228) [?].

não permitindo que flua corrente ao longo das linhas de campo, ou seja, $J_Y = 0$, então seguindo estas aproximações uma forte condição em \vec{J} mantém $\nabla \cdot \vec{J} = 0$.

$$\text{Dessa forma temos: } J_Z = \sigma_P E_Z + \sigma_P u B = 0 \Rightarrow E_Z = -u B$$

Um esquema simplificado na Figura 2.6 mostra este mecanismo de geração do dínamo do campo elétrico da região F.

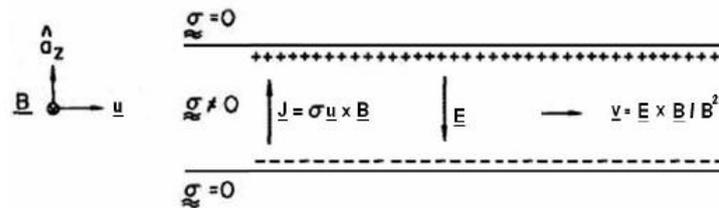


Figura 2.6: Formação do dínamo da região F
 Esquema simplificado de formação do dínamo da região F. FONTE: Adaptada de Kelley (1989) [46].

Note que o plasma dentro da região com $\sigma_P \neq 0$ terá uma velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B} / B^2$ igual a velocidade do vento neutro (Kelley, 1989 [46]).

2.2.3 Formação do Pico Pré-reversão

O aumento pré-reversão é um dos vários fenômenos que dão a dinâmica à ionosfera além dos modelos simples dos dínamos E e F; sendo este um evento local.

Prévio ao pôr-do-sol, a parte inferior da camada F quase apresenta uma situação de equilíbrio instável, e a evolução desta camada é fortemente controlada pela velocidade de deriva vertical; sendo que uma condição necessária, mas não suficiente, para a geração do Spread F é a alta velocidade de deriva com um limiar de 20m/s para máximo ciclo solar, segundo Anderson et al. (2004) [8]. Na figura 2.7, nota-se que a velocidade de deriva, está atrelada ao campo elétrico zonal na região F, ela aumenta linearmente com o fluxo solar, além de variar com a estação do ano (ver fig. 2.8), que vêm a ser um dos motivos que explica a diferença na probabilidade de ocorrência de irregularidades nos diversos períodos do ano (Fejer et al., 1999 [36]; Sastri et al., 1997 [65]).

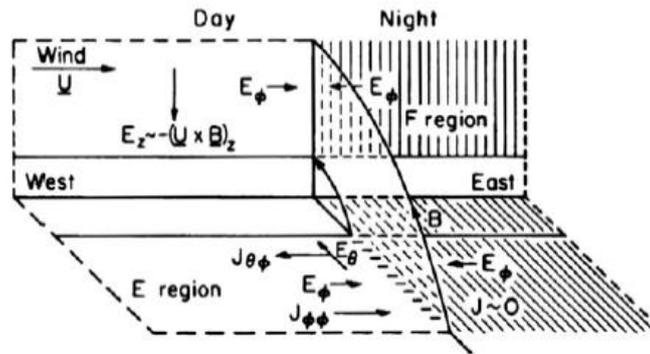


Figura 2.7: Geração de campo elétrico zonal

Modelo simplificado da geração do campo elétrico zonal. FONTE: Farley (1986) [29].

Da figura 2.7 observa-se que o plasma como um todo se desloca para o leste, próximo ao pôr-do-sol, por arraste. E junto com a direção do campo magnético horizontal na região do equador, provocam o aparecimento de um campo elétrico vertical de polarização para baixo ($\vec{E} \sim \vec{U} \times \vec{B}$), dínamo da região F. Esse campo elétrico de polarização (criado) é mapeado, através das linhas de campo magnético para a região E, com direção norte magnético E_θ da fig. 2.7), do qual deriva uma corrente Hall para oeste $J_{\theta\phi}$. Supondo que a densidade eletrônica cai para valores bem baixos após o pôr-do-sol na região E, verifica-se que essa corrente no lado noturno é desprezível, fazendo com que ocorra um acúmulo de cargas negativas na região do pôr-do-sol, criando assim o campo elétrico zonal E_ϕ , que nos períodos diurno e noturno está configurado nas direções leste e oeste, respectivamente (Farley et al., 1986 [29]), intensificando o campo elétrico zonal no período do pôr-do-sol, causando o pico pré-reversão.

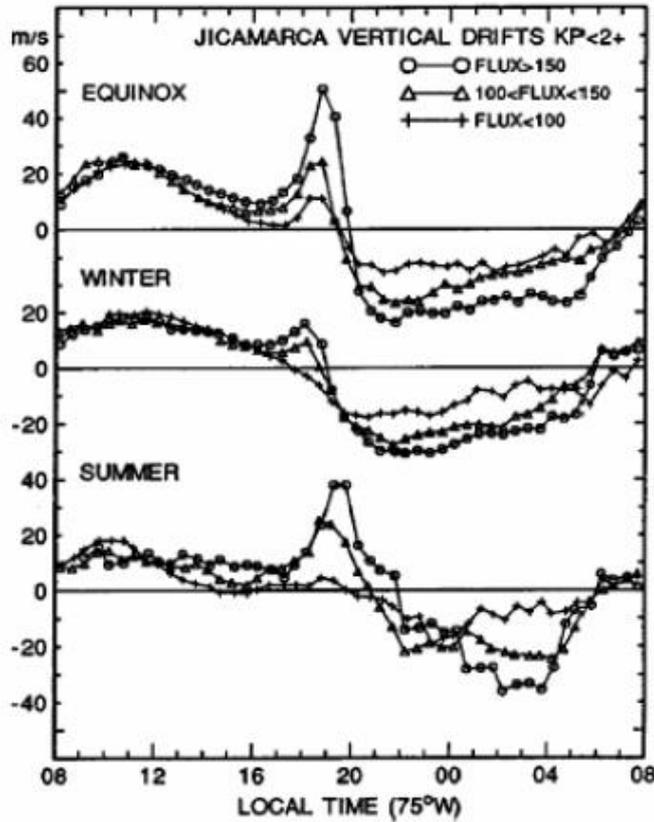


Figura 2.8: Deriva de plasma vertical, Jicamarca

Médias de deriva vertical de plasma medidas em Jicamarca durante o equinócio (Março-Abril, Setembro-Outubro), no inverno (Maio-Agosto) e no verão (Novembro-Fevereiro) para três níveis de fluxo solar. FONTE: Fejer et al.(1991) [34].

Pelo efeito de deriva ($\vec{E} \times \vec{B}$), onde B é a componente horizontal da intensidade de campo geomagnético, e E o campo elétrico zonal E_ϕ , o plasma equatorial desloca-se para cima no período diurno e para baixo no período noturno, com a reversão ocorrendo no nascer e no pôr do sol. Como mostra a Figura 2.8, vemos o comportamento dessa deriva ao longo do dia, em diversas condições, com a reversão no pôr do sol apresentando o pico pré-reversão responsável por toda uma dinâmica do plasma gerando condições para a evolução das instabilidades.

2.3 Campos Elétrico Perturbados

Os campos elétricos perturbados sobre a região equatorial são basicamente de dois

tipos:

- Campos elétricos de penetração direta, que acontecem durante uma sequência de perturbações magnetosféricas correspondendo às bem conhecidas fases de tal perturbação, tais como mudança de polaridade do campo magnético interplanetário (IMF), início súbito de tempestade (SC), flutuações DP 2, entre outras.
- Campo elétrico retardado devido à entrada de energia da tempestade na alta latitude do sistema ionosfera-termosfera produzindo um vento perturbado no equador/circulação termosférica. Conhecida como ação do dínamo perturbado.

Existem basicamente dois processos responsáveis pela maior parte das perturbações no campo elétrico de médias e baixas latitudes durante períodos perturbados. O primeiro é a penetração direta de campos elétricos e correntes a partir da magnetosfera e ionosfera de altas latitudes para as médias e baixas latitudes através da ionosfera condutora. O segundo, ocorre devido à ação dinâmica dos ventos termosféricos, durante o período das tempestades, produzidos pelo aquecimento auroral. Estes ventos alteram a circulação global, gerando campos elétricos perturbados em médias e baixas latitudes (Blanc e Richmond, 1980) e causando variações na composição e densidade termosféricas (Rishbeth, 1971 [63]).

Os campos elétricos devido à penetração direta e dínamo perturbado têm escalas de tempo consideravelmente diferentes. O fenômeno de penetração direta propaga-se para as médias e baixas latitudes ionosféricas quase instantaneamente. O segundo mecanismo, o dínamo perturbado, ocorre devido à ação dinâmica dos ventos termosféricos, durante o período das tempestades, produzidos pelo aquecimento auroral (proposto primeiramente por Blanc and Richmond (1980)

As escalas de tempo dos campos elétricos devido a estes dos fenômenos são consideravelmente diferentes. Kikuchi e Araki (1979) sugeriram que esta transmissão ocorre através do modo de guia-de-onda magnético transversal de ordem zero (TM_0) excitado por campos elétricos polares que propagam-se na direção norte-sul dentro do guia-de-onda Terra-ionosfera. Claro que isto não sempre ocorre, de acordo com Blanc (1978) [21], Fejer et al. (1979b) [33] e Gonzalez et al. (1979) [39], citados por Fejer

(1986) [32], sendo controlada por vários processos eletrodinâmicos (Maekawa (1980) , Kamide e Matsushita (1981) [44] e Senior e Blanc (1984) [66]), igualmente citados por Fejer (1986) [32]. Em contraste, os campos elétricos devido ao dínamo perturbado têm um tempo de atraso (“time delay”) de algumas horas, sendo que ainda este assunto em discussão, com umas 9 horas após grandes aumentos na deposição de energia segundo Blanc e Richmond (1980) [?], e 30 horas após este aumento na ionosfera de altas latitudes, durante os períodos de tempestades, proposto por Scherliess e Fejer (1997) [35].

2.3.1 Penetração Direta

Do ponto de vista físico do acoplamento vento solar-magnetosfera-ionosfera, o sentido e magnitude do IMF B_z é o mais importante parâmetro no controle do efeito de penetração (Chao-song et al., 2007.)

Kelley et al. (1979) [45], citado por Fejer (1986) [32], propuseram que as perturbações no campo elétrico equatorial zonal são fundamentalmente produzidas por campos elétricos de convecção, com controle indireto do IMF. Em condições magnetosféricas e de vento solar estáveis, gradientes de pressão perto do limite interno da plasmasfera atua como blindagem da magnetosfera interna e ionosfera de média e baixa latitude dos efeitos do campo elétrico de convecção amanhecer-crepúsculo via produção de correntes de campos que se acoplam à magnetosfera interna e baixa ionosfera (Maruyama et al., 2005 [57]).

Súbitas inversões para o norte no IMF, a partir de uma direção estacionária sul, causa um desequilíbrio temporário entre densidade de carga relacionada à convecção e a carga no limite interno da corrente de anel, que regula a interação entre o vento solar e a magnetosfera, destruindo a blindagem [Kelley et al. (1979) citado por Fejer (1986); Maruyama et al., 2005]. De acordo com Vasyliunas (1972), citado por Fejer (1986), a constante de tempo para o decréscimo ou acúmulo de cargas de blindagem nesta camada Alfvén é maior do que varios minutos. Este desequilíbrio produz uma perturbação no campo elétrico crepúsculo-amanhecer (na direção oeste durante o dia, e leste durante a noite) que pode penetrar na plasmasfera. A eficiência deste processo depende igualmente de parâmetros como a condutividade ionosférica, o nível de atividade magnética e a

hora local. Os campos elétricos transientes devido ao “overshielding” da magnetosfera interna produzem derivas de plasma na região F para baixo, na direção equatorial, durante o dia e derivas para cima, em direção aos pólos, à noite (Fejer, 1991). Um processo similar ocorre em períodos de súbitos aumentos na convecção, durante o tempo necessário para o restabelecimento das cargas de blindagem da camada Alfvén, quando a penetração dos campos elétricos pode ocorrer na plasmasfera. Significativas variações para sul no IMF aumentam o campo elétrico amanhecer-crepúsculo na magnetosfera interna (“undershielding”), o qual corresponde a um campo elétrico para leste no lado diurno e para oeste no lado noturno, ou seja, com a mesma polaridade dos campos elétricos equatoriais nos períodos calmos. Ambos processos são ilustrados na Fig. 2.9

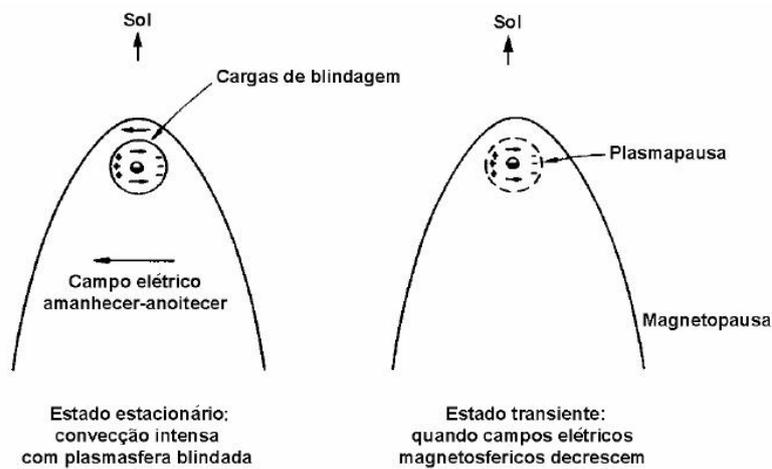


Figura 2.9: Penetração direta de campos elétricos

Diagrama (no plano equatorial) demonstrando como o rápido decréscimo na convecção magnetosférica pode criar variações nos campos elétricos dentro da plasmopausa. FONTE: Kelley (1989, p. 99) [46].

O tempo de escala característico para o restabelecimento do blindagem, controlado por vários fatores tais como condutividade ionosférica e a temperatura e a densidade da plasmasfera (Wolf, 1983; Toffoletto et al., 2003), foi encontrada a ser menor que uma hora (Spiro et al., 1988) se o campo magnético magnetosférico permanece constante. Entretanto, mudanças no campo magnético associado com mudanças no potencial da calota polar foi depois encontrado a ser importante [Fejer et al., 1990; Sazykin, 2000; citados por Maruyama (2005) [51]] sobre o incremento do tempo de blindagem e prolongando a penetração de campos elétricos.

2.3.2 Dínamo Perturbado

As perturbações que ocorrem nos ventos termosféricos, campos elétricos e correntes em baixas latitudes, têm efeito global e estão relacionadas à resposta da circulação termosférica global ao aquecimento joule e das colisões dessas partículas carregadas, provenientes da magnetosfera com a atmosfera neutra, em altas latitudes, durante o período de tempestade (Blanc e Richmond, 1980 [22]). Este aquecimento, devido à dissipação Joule das correntes sub-aurorais intensificadas e à precipitação de partículas, gera uma circulação meridional que se estende a partir da latitude onde se iniciou o aquecimento para as latitudes menores, com ventos na direção do equador nas altitudes da região F (Mazaudier e Venkateswaram, 1990).

Um esquema deste mecanismo do dínamo perturbado está representado na fig. 2.10. Com o transporte de momento angular, o vento perturbado originado com o aquecimento auroral, inicialmente em direção ao equador, adquire uma velocidade para oeste com relação à Terra devido ao efeito da força de coriolis. Estes ventos perturbados indo para oeste em médias latitudes geram correntes Pedersen (J_P) na direção do equador em altitudes próximas a 150Km, onde o valor da condutividade ionosférica Pedersen é elevado. Tais correntes (J_P) tenderão à carregar positivamente a ionosfera em baixas latitudes, estabelecendo um campo elétrico na direção do pólo, o qual opõe-se e eventualmente interrompe o fluxo de corrente Pedersen. Este campo elétrico em direção ao pólo, é perpendicular à componente vertical do campo magnético terrestre para baixo (cima) no hemisfério norte (sul) em médias latitudes que produz uma deriva de plasma para oeste e uma corrente Hall (J_H) para leste, cuja intensidade máxima deve ocorrer nas médias latitudes. A interrupção destas correntes hall nos terminadouros (amanhecer e crepúsculo), onde as condutividades ionosféricas têm acentuado gradiente longitudinal, resulta em dois *loops* de corrente e estabelece um campo elétrico zonal do crepúsculo para amanhecer. Este campo elétrico tem polaridade oposta ao campo elétrico causado pelos ventos neutros mencionado anteriormente, e se estende para baixas latitudes e regiões equatoriais através da ionosfera.

Os efeitos do dínamo perturbado vêm sendo estudados exaustivamente com uma

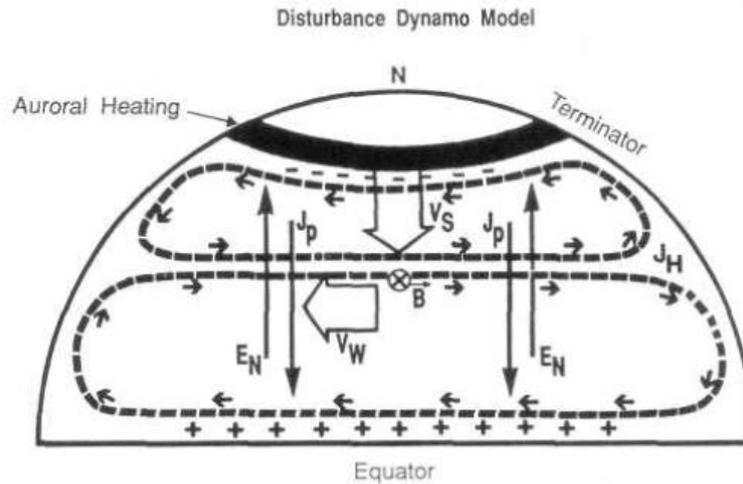


Figura 2.10: Dínamo perturbado

Diagrama esquemático mostrando o mecanismo de geração do efeito do dínamo perturbado proposto por Blanc e Richmond (1980)[22]. FONTE: Mazaudier e Venkateswaran(1990).

possível explicação para a ocorrência de *Spread F* e bolhas de plasma, em dias precedidos por atividade geomagnética. Assim como é provável que outros efeitos como composição química da ionosfera de médias latitudes e ondas de gravidade de longa duração, além das perturbações geomagnéticas, contribuam para a ocorrência dos campos elétricos do dínamo perturbado [Fejer, 1991 [34]; citado por Fedrizzi (2003) [31]].

Richmond et al. (2003) constataram, através do modelo MTIE-GCM, que os efeitos no campo elétrico da região equatorial causado pela ação do vento neutro sobre a ionosfera, e a penetração direta segue o mesmo padrão de distribuição seguindo a variação em hora magnética local, enquanto que o dínamo gerado pelos ventos perturbados (dínamo perturbado) tem uma influência oposta sobre o campo elétrico equatorial. Conclui-se que o efeito do dínamo devido ao vento perturbado tem uma tendência a cancelar o efeito normal dos ventos de tempo quieto.

Um modelo desenvolvido por Scherliess e Fejer (1997) (a partir de dados de velocidade de deriva vertical, dos anos 1968-1988) do radar do Rádio Observatório de Jicamarca, determinaram a deriva de plasma perturbado devido à combinação dos efeitos de curta duração, como a penetração de campo elétrico e os distúrbios de longa duração como o efeito do dínamo perturbado.

2.4 Irregularidades Ionosféricas

Os fenômenos de instabilidades do plasma, que ocorrem na região F da ionosfera próxima ao equador são conhecidas como Equatorial Spread F (ESF), e foi dada essa denominação por causa do espalhamento em altura dos traços que podem ser observados nos ionogramas.

A instabilidade ocorre próxima ao equador magnético como resultado da ação do campo gravitacional contra o gradiente de densidade do plasma. Basley et al. em 1972 e Haerendel em 1973 desenvolveram uma importante teoria considerando um tubo de fluxo integrado ao longo das linhas de campo e o ambiente ionosférico do pôr-do-sol (Kelley, 1989).

Sabe-se, através de estatísticas de dados observados com diversos equipamentos, que a ocorrência dessas instabilidades obedece a algumas regras de comportamento. Há meses de menor ocorrência entre maio e agosto (Sobral et al., 2002), e de maior ocorrência entre setembro e fevereiro sobre a região brasileira (de Paula, 1985 [?]; Batista, 1994 [16]; Sobral et al., 2002 [67]).

As probabilidades de ocorrência das instabilidades de plasma, que geram as bolhas ionosféricas durante os períodos de baixa frequência de ocorrência e em dias considerados magneticamente calmos, são informações para o estudo da eletrodinâmica da ionosfera, pois poderão revelar condições físicas críticas necessárias para sua geração. Alguns parâmetros do ambiente ionosférico vêm sendo estudados e analisados exaustivamente em relação ao desenvolvimento das instabilidades, como os distúrbios no campo magnético, a velocidade de deriva vertical (Sastri et al., 1997), o gradiente de densidade eletrônica, uma forte presença da camada E esporádica (Stephan et al., 2002; Abdu et al., 1996, 2003) e a anomalia equatorial. Tendo-se algumas tentativas na previsão de ocorrência de instabilidades na região Peruano/Chileno sendo realizadas por Anderson et al. (2003,2004 [7][8]), utilizando a velocidade vertical $\vec{E} \times \vec{B}$.

Essas irregularidades podem causar degradação nos sinais de ondas de rádio que utilizam a ionosfera como meio de propagação, provocando grandes danos nas telecomunicações, principalmente via satélite devido ao passo do sinal através destas,

prejudicando, por exemplo, o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

2.4.1 Teoria de Rayleigh-Taylor Gravitacional (GRT)

A teoria de Rayleigh-Taylor explica como uma pequena perturbação na base da região F da ionosfera pode gerar as bolhas ionosféricas (Kelley, 1989 [46]).

Há algumas teorias para explicar a formação da bolha ionosférica. A mais aceita é a teoria Rayleigh-Taylor (Kelley, 1989 [46]), que explica como uma pequena perturbação na base da região F da ionosfera pode gerar a formação das bolhas ionosféricas.

Como ilustrado por Kelley (1989) [46], a ionosfera pode ser representada como um meio com maior densidade sendo sustentada por um meio com menor densidade (fig. 2.11). Esta configuração da ionosfera, sob a ação da gravidade, resulta em uma região de equilíbrio instável. Uma perturbação na base da região, como, por exemplo, ondas de gravidade, podem romper este equilíbrio, e a partir desta pequena perturbação pode fazer com que a instabilidade evolua, gerando as bolhas ionosféricas. Esta evolução depende de uma série de condições do ambiente, como a configuração dos campos elétricos locais, os distúrbios geomagnéticos, a altura e os gradientes de densidade eletrônica na base da ionosfera.

A Figura 2.12 mostra, de forma simplificada, como é a evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor gravitacional no plano equatorial (GRT). A força gravitacional para baixo, ou seja, antiparalela ao gradiente de densidade, e o campo geomagnético horizontal (perpendicular ao gradiente de densidade eletrônica do plasma ionosférico) da região equatorial, criam uma deriva das partículas no plano horizontal. Esta deriva faz com que apareça uma corrente $J_x = nMg/B$ (direção de $\vec{g} \times \vec{B}$).

Devido ao fato de as mobilidades dos íons e elétrons serem diferentes uma da outra (massa, carga, direção), ao ocorrer uma pequena perturbação haverá uma separação e um acúmulo de cargas, provocando o aparecimento de um campo elétrico de polarização. Este campo elétrico horizontal ($d\vec{E}$), como mostrado na Figura 2.12, juntamente com o campo geomagnético (perpendicular a $d\vec{E}$), criarão derivas de plasma ($d\vec{E} \times \vec{B}$) vertical, que podem formar as denominadas bolhas ionosféricas. Pode-se calcular a taxa de crescimento

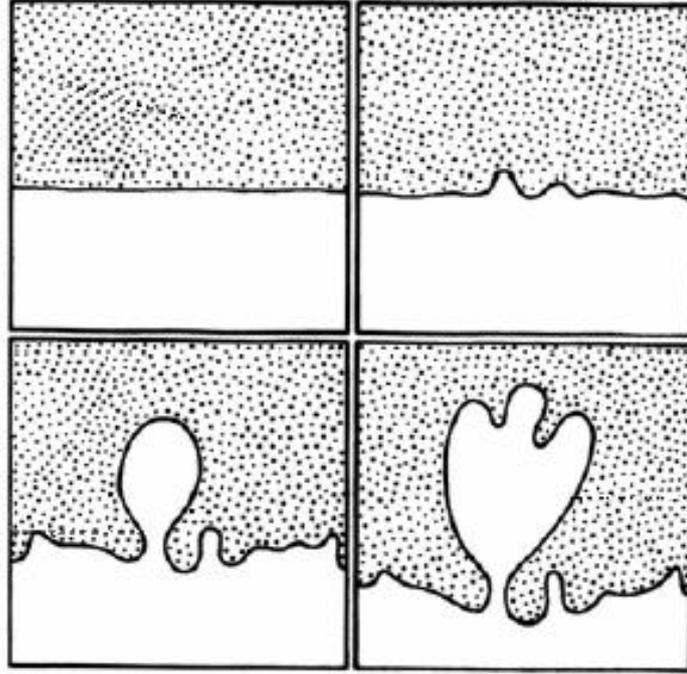


Figura 2.11: Teoria linear de Rayleigh-Taylor

Ilustração didática da evolução de uma instabilidade gerando as bolhas ionosféricas segundo a teoria linear Rayleigh-Taylor. Onde a parte superior de cada painel representa o meio de maior densidade, e a área branca de menor densidade. FONTE: Kelley (1989) [46].

(γ_{GRT}) da bolha através da seguinte expressão (2.15), considerando a força gravitacional (Sultan, 1996).

$$\gamma_{GRT} = \frac{g}{\nu_{in}} \frac{1}{\eta_0} \frac{\partial \eta_0}{\partial h} - R \quad s^{-1} \quad (2.14)$$

onde η_0 é a densidade eletrônica inicial, h a altura em relação a Terra, ν_{in} a frequência de colisão entre íons e partículas neutras, g a aceleração gravitacional (positivo para cima) e R a taxa local de recombinação química.

2.4.2 Teoria Linear da instabilidade Rayleigh-Taylor generalizada

Acredita-se que as irregularidades de poucas dezenas a poucas centenas de quilômetros sejam geradas pela instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor colisional (CRT), a qual opera sob a influência da gravidade na base da região F noturna. (Zalesak et al.,

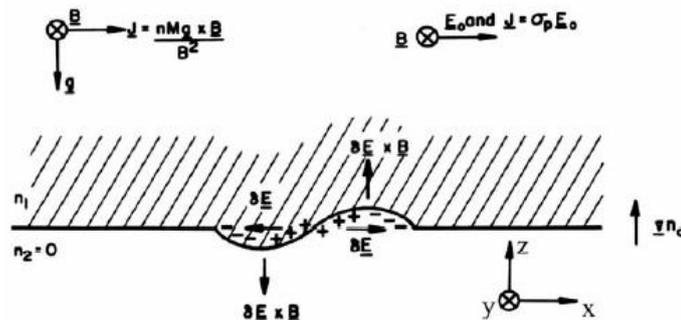


Figura 2.12: Evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor

Evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor em uma geometria equatorial. FONTE: Kelley (1989 [46].

1982 e Sekar et al.,1995).

Estendendo a teoria GRT para os parâmetros mencionados, podemos calcular a taxa de crescimento da instabilidade Rayleigh-Taylor supondo uma pequena perturbação na densidade de plasma e no campo elétrico. Partindo das equações básicas de fluido, equação da continuidade e do momento, obtém-se a taxa de crescimento (γ_{RT}) da instabilidade dada por (2) (Zalesak et al., 1982 e Stephan et al., 2002), mais completa:

$$\gamma_{GRT} = \frac{\sum_P^F}{\sum_P^{E,N} + \sum_P^F + \sum_P^{E,S}} (\vec{V}_P - \vec{U}_N - \frac{\vec{g}}{\nu_{in}}) \frac{\nabla n}{n} - R \quad s^{-1} \quad (2.15)$$

onde g é a aceleração gravitacional, ν_{in} é a frequência de colisões das partículas, \vec{V}_P ($\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$) a velocidade de deriva de campo elétrico das partículas, R a taxa de recombinação química, \vec{U}_N a velocidade do vento neutro, $\sum_P^{E,N}$, $\sum_P^{E,N}$ e $\sum_P^{E,S}$ as condutividades Pedersen integradas ao longo do tubo de fluxo na camada F, e na camada E, nos pontos conjugados ao norte e ao sul do mesmo tubo de fluxo, respectivamente. Destes últimos termos se conclui que com o aumento da condutividade na camada E, por exemplo, com o aparecimento da camada E esporádica, aumentaria o denominador do termo relacionado com as condutividades, diminuindo a taxa de crescimento da instabilidade. Por outro lado, para valores muito baixo de condutividade da camada E, esse termo tenderia para um, aumentando dessa forma a taxa de crescimento.

Como se pode perceber, são muitos os parâmetros que contribuem para o desenvolvimento das irregularidades de plasma ionosférico, dificultando enormemente a análise de sua causa e desenvolvimento (Abdu,1999 e 2001).

De fato, as bolhas são observadas em maior número de ocorrência logo após o pôr-do-sol, quando reúne as condições favoráveis. Mas lembrando que não são somente esses os indicadores para a ocorrência do spread F.

Capítulo 3

Tempestades Magnéticas, Índices Geomagnéticos

3.1 Erupções Solares

As tempestades solares influem na propagação das ondas de rádio perturbando o campo geomagnético que se estuda com os índices, compreendendo eventos mais explosivos das manifestações de atividade solar, entre estes as ejeções de massa coronal e os eventos de partículas solares.

Ejeções de massa coronal (EMC)

Este fenômeno consiste em nuvens do plasma que são expulsas da coroa solar para o espaço, e pela energia que carregam e ao ir-se expandindo no meio interplanetário se convertem em uma das estruturas de maior escala dentro do vento solar.

A velocidade com que são expulsas do sol é de 200 até 2000 km/s ou mais. Se é considerado que o vento solar em média tem uma velocidade de 400km/s, se deduz que as EMC com velocidades maiores à do vento solar ambiente gerará ondas de choque durante sua trajetória.

As EMC seguem o ciclo solar, durante o máximo solar e ocorrem várias num dia só, enquanto que no mínimo solar ocorre em média, uma a cada quatro ou cinco dias.

Explosões Solares

Erupção solar é uma violenta explosão na atmosfera do sol, com uma energia equivalente a dezenas de milhões de bombas atômicas de hidrogênio. As erupções solares acontecem na coroa solar e na cromosfera, aquecendo o plasma a dezenas de milhões de Kelvin e acelerando os elétrons, prótons e íons mais pesados. Produzem radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A maioria das erupções ocorre ao redor de manchas solares, onde emergem acelerando as partículas mais pesadas à velocidades próximas da luz, com intenso campo magnético da superfície do sol até a coroa. A maioria das erupções solares, tarda alguns minutos em liberar energia.

3.2 Tempestades Magnéticas

Nosso planeta constantemente é atingido por jatos de plasma provenientes de eventos solares, que afetam o campo magnético da Terra em sua geometria, composição e estrutura. Esses eventos solares podem ser emissões como ejeções de massa coronal, as quais provêm do Sol ou erupções solares, que são conduzidas por ondas de choque ou vento solar. A magnetosfera que se origina do campo magnético interno da Terra nos protege destas emissões.

A principal característica de uma tempestade magnética é um decréscimo na intensidade horizontal do campo geomagnético e sua subsequente recuperação. Atualmente, sabe-se que este decréscimo é devido a um aumento na população de partículas magnetosféricas capturadas [Gonzalez, 1994 [40]] pela corrente de anel.

O vento solar arrasta consigo o campo magnético do sol. Este campo magnético do meio interplanetário (IMF - Interplanetary Magnetic Field) tem uma orientação particular para o norte ou para o sul. Se o campo magnético do meio interplanetário está apontando na direção sul e o vento solar se cruza com a Terra, durante longos períodos de tempo ou durante interações breves mas energéticas (explosões solares, ejeções de massa coronal e buracos coronais), espera-se uma maior interação que originariam as tempestades geomagnéticas. Isto ocorre quando o plasma do vento solar tem suficiente pressão dinâmica e o campo magnético do meio interplanetário está dirigido para o sul,

dá origem a uma reconexão magnética na magnetopausa diurna (ver figura 3.1), que rapidamente injeta na magnetosfera da Terra energia e partículas. As linhas de campo magnéticas reconectadas são arrastadas pelo mesmo vento solar para a cauda magnética onde voltam a se reconectar.

Os processos de reconexão aceleram partículas para o interior da magnetosfera; há um incremento da população de partículas magnetosféricas capturadas. Quando estas partículas energéticas chegam à magnetosfera do lado noite, os arrastes devidos ao gradiente do campo magnético e curvatura, assim como os efeitos de órbita levam os íons a mover-se desde a meia noite para o entardecer e os elétrons desde a meia noite ao amanhecer (Fedrizzi, 2003 [31]), modificando o anel de corrente ao redor da Terra em grande escala, induzindo um campo magnético que se opõe à direção do campo geomagnético e o decréscimo na componente horizontal da intensidade do campo magnética, o que chamamos de tempestade magnética (GONZALES et al., 1994 [40]).

Uma tempestade magnética tem efeitos mundiais, produzindo; dependendo da hora UT da fase principal; um efeito positivo na formação de irregularidades tanto como uma inibição de irregularidades equatoriais em faixas de latitudes limitadas o que dependeria da hora (LT) do pôr-do-sol para a região E e F da região em estudo [Sunanda et al., 2001 [15]].

As derivas devido ao gradiente do campo magnético da Terra e a sua curvatura produzem a "Corrente de Anel". Essa corrente é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, sendo que prótons derivam para o leste e elétrons para o oeste, dando uma distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. Esta corrente diminui a intensidade do campo magnético terrestre e um aumento na sua intensidade é o primeiro indicador de uma tempestades magnética. Considera-se que uma tempestade é fraca quando o Dst apresenta valores que variam entre 30 nT e 50 nT; moderada quando o Dst varia entre 50 nT e 100 nT; intensa para valores entre 100 nT e 250 nT e muito intensas as tempestades com valores menores (mais negativos) ou iguais a 250 nT conforme mostrado na tabela-E, no Apêndice 8.3.

Um dia com grande atividade magnética é referido como tempo de tempestade magnética. Tempestades magnéticas são eventos frequentes que acontecem repentinamente no mundo todo ao mesmo tempo.

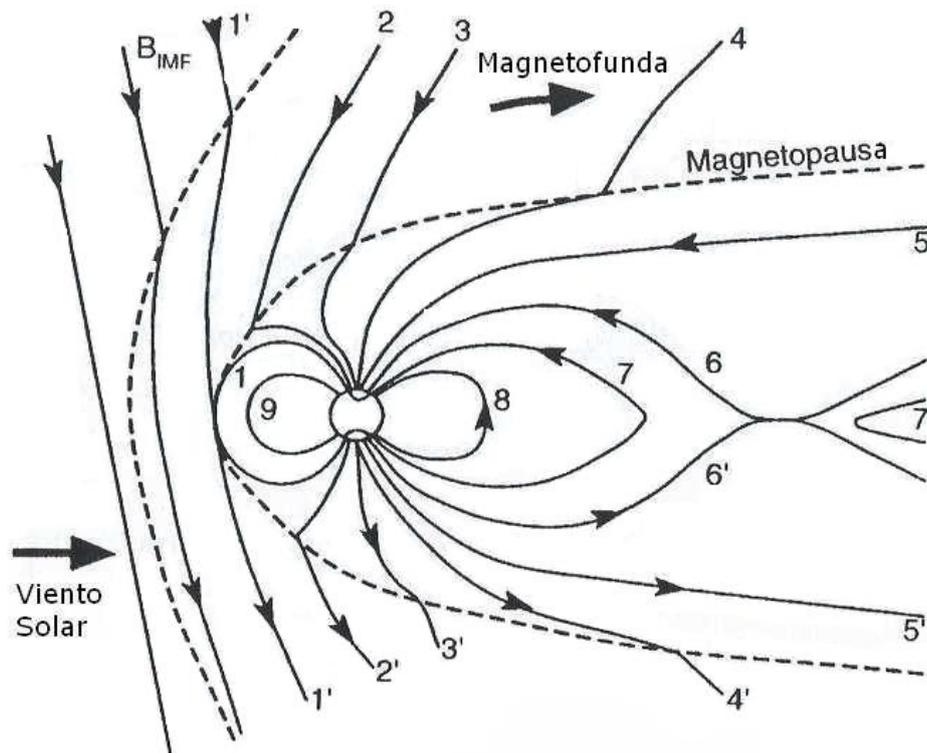


Figura 3.1: Reconexão magnetosférica
 Representação da reconexão magnetosférica. Adaptada de [Gombosi, 1998]

Numerosos estudos delimitaram as maiores características de tempestades ionosféricas, as quais resultaram de grandes entradas de energia na alta atmosfera associadas com grandes tempestades magnéticas [FOSTER, 1993 [38]; MENDILLO et al., 1970 [53]].

3.2.1 Fases de Tempestade Magnética

Uma tempestade magnética caracteriza-se por três fases:

(1) Um início súbito ou repentino (sudden commencement) ou fase inicial, está associado ao aumento da pressão dinâmica, incidência de partículas do vento solar; que comprime a magnetosfera, indicando um aumento brusco no campo magnético. A duração da fase inicial pode variar desde minutos até algumas horas, quando o Dst aumenta para valores positivos e pode alcançar algumas dezenas de nT.

(2) Fase principal (main phase) é caracterizada por uma redução na intensidade do campo magnético na superfície terrestre, e essa redução está associada à Corrente de Anel.

Nesta fase principal, a corrente de anel é intensificada causando um decréscimo no índice Dst que pode alcançar valores negativos de centenas de nT. A fase principal tem uma duração que varia desde meia hora até várias horas.

(3) Uma fase de recuperação (recovery phase) caracterizada pela diminuição e eliminação gradual da pressão, passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel. Após um período variando entre dezenas de horas e uma semana, o Dst gradualmente retorna ao nível normal na fase de recuperação.

A figura (3.2) mostra as fases de uma tempestade magnética.

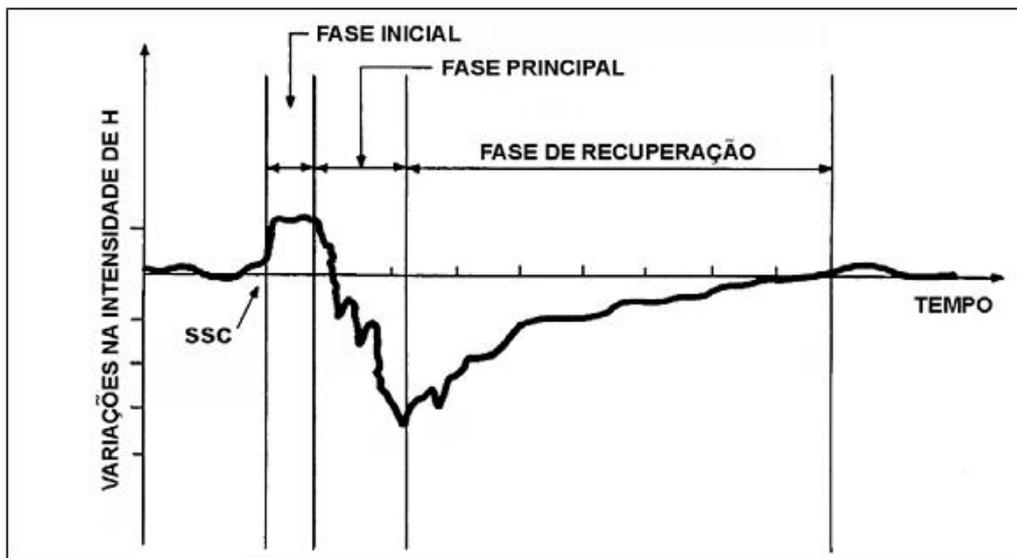


Figura 3.2: Fases de tempestade magnética

Fases características de uma tempestade magnética. FONTE: de Paula (1987, p. 11). [?]

3.3 Índices Geomagnéticos

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética em alguns de seus componentes como o nível de atividade geomagnética e são de grande importância nos estudos das relações Sol-Terra. Os índices magnéticos usados são Disturbance Storm-Time(Dst-L) tomado de Tamerin and Xinlin Li (2002) [49] e Planetrisceh Kennziffer ou índice planetário (Kp), O primeiro monitora efeitos isolados como a corrente de anel, e o segundo estima a entrada global de energia na magnetosfera e por esse motivo é chamado de índice planetário.

3.3.1 Índice Dst

O Dst é um índice magnético que monitora o nível magnético mundial de tempestade em latitudes baixas. É construído calculando a média da componente horizontal(H) do campo magnético terrestre da superfície fornecida por estações localizadas em baixas latitudes (pelo mínimo três), e magnetogramas equatoriais pelo mundo inteiro, em unidades de nanotesla(nT) e resolução temporal de uma hora. Os valores negativos de Dst indicam que uma tempestade magnética está em progresso. O Dst mais negativo é referido a uma tempestade magnética mais intensa. Existe uma escala oferecida pela NOAA e por Xinlin Li (página pessoal de Xinlin Li). As deflexões negativas no índice Dst são causadas pela corrente de anel do tempo da tempestade (storm time ring current) que flui em torno da Terra de leste para oeste no plano equatorial.

Derivas devido ao gradiente do campo magnético da Terra e a sua curvatura produzem a Corrente de Anel na região próxima da terra e sua força é acoplada às condições do vento solar. Só quando há um campo elétrico para leste no vento solar que corresponde a um campo magnético interplanetário ao sul (IMF) há uma significativa injeção de corrente de anel, tendo por resultado uma mudança negativa no índice Dst. Assim, conhecendo as condições do vento solar e forma da função de acoplamento entre vento solar e corrente de anel, uma estimativa do índice Dst pode ser feita. Em resumo, o índice Dst é utilizado para dar uma indicação da intensidade da corrente de anel.

3.3.2 Índice Kp

O índice Kp, que é o índice da atividade magnética planetária é determinado como o valor médio dos níveis de distúrbio nas duas componentes do campo horizontal, K, observado em 13 estações sub-aurorais selecionadas e contém contribuições do eletrojato auroral, bem como do eletrojato equatorial e da corrente de anel (de Paula, 1986 [?]), daí sua importância.

O índice K é um índice local quase-logarítmico que contém as variações ocorridas na atividade magnética (em intervalo de 3 horas) relativas à curva do dia quieto para um determinado observatório magnético (Fedrizzi, 2003 [31]). Tais medidas variam de 0 a 9, sendo mais calmo para valores mais baixos. Os valores de Kp representam uma média de valores obtidos no espaço de tempo de três horas, começando à zero hora.

Maiores informações acerca dos índices geomagnéticos e sua evolução podem ser encontradas em M. Menvielle(2002 [55], 2001 [54]).

Capítulo 4

Resenha Bibliográfica

Este capítulo está dirigido aos resumos dos artigos que serviram de base ao desenvolvimento desta dissertação. Começando com o artigo de Enivaldo Bonelli, por ser a idéia com a qual começamos, podendo com isto fazer previsão de cintilação com o método aqui aplicado. Utilizando a seguir os artigos de Birsá e Aarons, devido à caracterização de nossas tempestades em estudo dentro de categorias já estudadas, e logo algumas que não encaixam nestas categorias. Por último temos Anderson(2004) que nos ajuda à entender como fazer para poder prever a presença ou não de cintilações em função da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$.

4.1 Bonelli, 2005

Forecasting GPS Scintillations For Low Latitude Stations, in Brazil, using Real-Time Space Weather Data

Enivaldo Bonelli, 2005

Em baixas latitudes magnéticas os sinais de satélites GPS são afetados pela cintilação ionosférica, pela presença de irregularidades de plasma na ionosfera, entre o pôr-do-sol e o amanhecer.

O método aqui utilizado é para poder prever qual noite será calma, em termos de cintilações, utilizando para este fim dados de Kp dos alertas de clima espacial na internet, em NOAA/SEC. E o método aplicado diz: Quando, durante o dia, prévio ao pôr-do-

sol, a atividade magnética é relativamente alta, com respeito ao dia anterior, o índice de cintilação cai com respeito ao dia anterior.

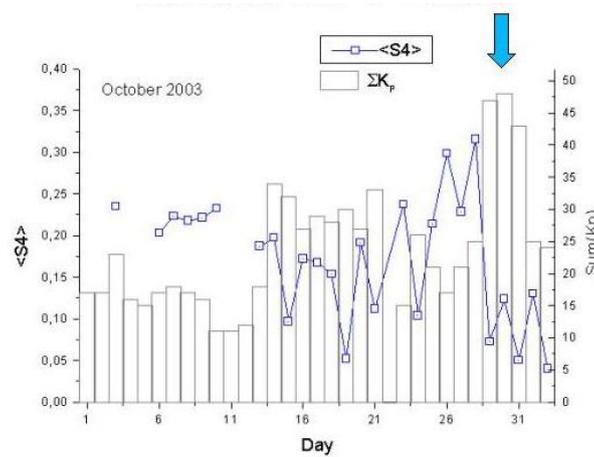


Figura 4.1: Comportamento de cintilação. Bonelli 2005
 Comportamento de cintilação para Outubro/2003. Gráfico de Bonelli2005 [23]

Dados foram coletados com o receptor GPS de frequência única (L1), na estação de Natal, Brasil, localizada em 5.84°S e 35.20°W. A declinação magnética é 21°W e o dip magnético é de 20°.

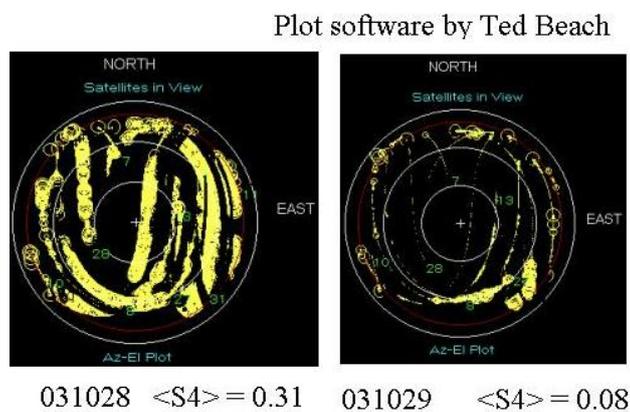


Figura 4.2: Gráfico do Scanfile
 No gráfico superior temos o Plot do software desenvolvido por Ted Beach.
 Gráfico de Bonelli2005 [23]

Da Fig. 4.1 podemos ver uma tempestade magnética acontecendo no dia 29 de Outubro, 2003, tendo um valor muito alto de Kp (=9) prévio ao pôr-do-sol. Analise-se a potência do sinal de GPS obtida do satélite PRN 02 e se obtém a fig. 4.2 que para o

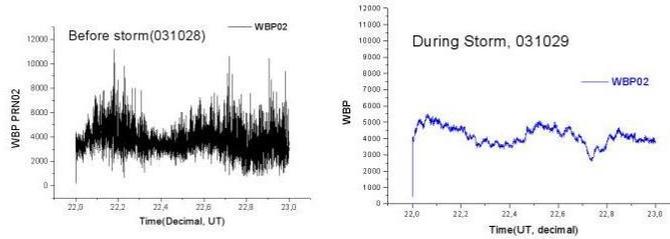


Figura 4.3: Noite calma vs noite perturbada. Bonelli 2005
 Noite calma versus ativa, em termos de cintilação. 28 de outubro, 2003
 (ativo) e 29 de Outubro (calmo). Gráfico de Bonelli2005 [23]

dia 28/10, com $\langle S4 \rangle = 0.31$, uma alta flutuação do sinal (cintilação). Enquanto, o dia da tempestade, 29/10, com um valor de $\langle S4 \rangle = 0.08$ praticamente não teve cintilação do sinal GPS.

Outros exemplos são apresentados, que mostram que durante o dia, prévio ao pôr-do-sol, a atividade magnética é relativamente alta, no dia da tempestade magnética o índice de cintilação cai com respeito ao dia anterior.

Com isto o autor mostra a anticorrelação apresentada nesta tão estudada tempestade, assim como também coloca outros exemplos ao longo do máximo solar do ciclo solar 23, provando que em presença de tempestades magnéticas fortes se apresenta atenuação de cintilação na fase principal da tempestade ($Kp > 30$).

Então, com dados GPS e índices magnéticos (NOAA/SEC) para o período em estudo foi possível determinar a atenuação¹ no sinal GPS em presença de tempestades magnéticas fortes no máximo do ciclo solar, e ainda não podemos generalizar que para todas as tempestades com um Kp alto vamos ter atenuação no sinal, já que foram estudadas apenas algumas tempestades magnéticas.

¹Utiliza-se o termo atenuar devido ao fato que sempre temos irregularidades, e que elas produzem cintilação, mesmo sendo baixo, e não é zero (como dados do mínimo solar).

4.2 Birsa, 2002

Scintillation response of Global Positioning System signal during storm time conditions

R. Birsa, E.A. Essex, R.M Thomas and M.A. Cervera

Workshop on the applications of Radio Science. WARS02. 2002

A atividade de cintilação monitorado em Vanimo (de coordenadas magnéticas 2.4°S, 141.24°E, -26.6 dip de latitude) em Papua Nova Guiné, utilizando um monitor de cintilações - receptor GPS de frequência única (L1), próximo da fase máxima do ciclo solar é analisada.

Se apresenta os resultados do estudo da tempestade magnética do dia 22 de Setembro, 1999, com a atividade de cintilação para dia calmo, dia perturbado (fase principal) e dia da fase de recuperação da tempestade magnética.

A fig. 4.4, mostra as fases da tempestade magnética do dia 22 de Setembro, e a variação de Kp (para cada 3 horas) versus o tempo. Com Dst máximo de -164, para um valor de Kp de 8, com uns minutos de retardo. Para esta estação em Vanimo UT+10=LT.

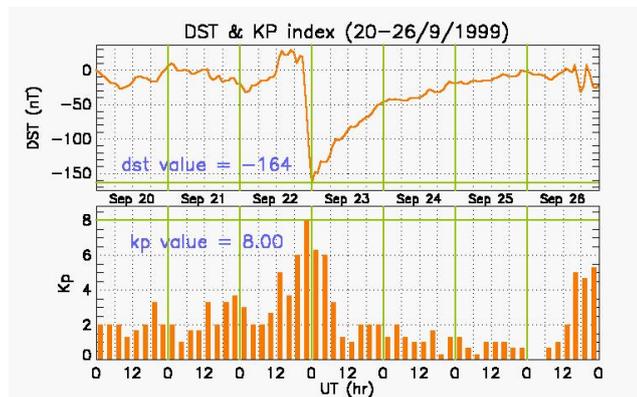


Figura 4.4: Índices magnéticos. Birsa, 2002
Índices magnéticos Dst e Kp, para 20-26 de Setembro 1999.

Então, podemos observar que o dia 21 é um dia em condições normais, sem perturbação. O dia 22 aparece o início súbito, ou fase inicial da tempestade, terminando com o dia 23 sendo o dia da fase principal. Os efeitos observados nestes dias, para esta tempestade magnética, foram:

Dia 21: Dia típico de noite de equinócio. Acontece um aumento de atividade de cintilação, mas em termos gerais é menos intenso e de curta duração que num dia perturbado.

Dia 22: Valores de S4 raramente excedem 0.25, indicando que atividade de cintilação foi essencialmente inativo.

Dia 23: Esta noite (LT) se apresentam altos valores de S4 (chegando até a unidade) nos 4 satélites utilizados.

O estudo se baseou nos três (03) critérios propostos por Aarons (1991) para o efeito da corrente de anel na geração o inibição de irregularidades na camada F durante atividade magnética, que são:

1. Se a incursão Dst acontece durante as horas de dia e bem antes do pôr-do-sol, a elevação normal da camada F é perturbada e irregularidades são inibidas esta noite.
2. Se grandes incursões ocorrem no período da meia noite até após meia noite, a camada se eleva em altura e logo cai, criando irregularidades.
3. Se a grande incursão de Dst toma lugar depois do pôr-do-sol e antes da meia noite, a camada se eleva em altura e não é perturbada e irregularidades se formam na mesma forma como uma noite não perturbada.

Mas, o resultado não esteve de acordo com o critério proposto por Aarons (1991). Entanto, há um número de estudos (Aarons, 1991; Kumar and Gwal, 2000; Bonole et al., 2001) que reportam a observação de inibição antes da meia noite e aumento após meia noite de cintilação durante incremento de atividade magnética.

O mecanismo agora proposto no artigo para explicar este comportamento se focaliza na altura da camada F. Cintilação de após meia noite pode ser atribuível ao acoplamento de latitudes altas e sistemas de correntes magnetosféricas com o campo elétrico equatorial e causa a reversão da direção oeste para leste. Do contrário, decréscimo do campo elétrico para o leste reduz a altura da camada no período de geração após pôr-do-sol criando condições não favoráveis à formação de irregularidades.

4.3 Aarons, 1991

The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storms.

Aarons, 1991

Radio Science, 26:11311149, July-Aug. 1991.

No presente artigo estudam-se um número grande de tempestades magnéticas no período de Dezembro 1971 à Novembro de 1981, durante um ciclo solar completo encontrando-se nesta pesquisa que as tempestades magnéticas podem se encaixar em três (03) categorias segundo a hora de início da fase principal da tempestade, que serão descritas mais embaixo.

A base de dados utilizada para comparar com os índices geomagnéticos (Dst e Kp) são flutuações de sinal de rádio (cintilação) obtidas em estações magnéticas, coletando dados de satélites como o MARISAT (Huancayo, Manila e Islas Ascensión), FLTSAT (Huancayo) e ETS-2 (Lunping). Todas as estações estão localizadas perto do equador magnético (dip).

O autor enfatiza que a corrente de anel durante tempestades magnéticas parece ter um papel direto ou indireto no estabelecimento de condições necessárias para a geração ou inibição de irregularidades na camada F equatorial, pois tem a ver com o levantamento ou na queda desta camada. Por exemplo. quando estamos na fase principal (máximo valor negativo do Dst) há um pico de excursão da corrente de anel, que afeta o campo elétrico equatorial e por tanto a altura da camada F.

Tempestades magnéticas foram correlacionadas com o incremento em altura da camada F durante o período meia noite e até após meia noite; depois do incremento em altura, a altura da camada cai e irregularidades são geradas. Isto é similar ao que acontece em períodos magneticamente quietos quando a altura da camada se levanta após o pôr-do-sol e logo cai em horas de após pôr-do-sol com irregularidades sendo geradas.

A hipótese proposta é que a mudança do valor do Dst (da fase principal à fase de recuperação) indica uma mudança no movimento normal da camada F. Perturbando a

altura da camada (por meio de ingresso de campos elétricos) nas horas da tarde e inibirá a formação de irregularidades. Perturbando a altura da camada em horas de meia noite e após meia noite faria que a altura da camada F se eleve e como esta perturbação dura pouco, então a altura da camada cai e geraria irregularidades. Perturbando a altura da camada depois que esta cai depois do pôr-do-sol, não mudará o padrão normal da ocorrência de irregularidades.

Depois de analisar a resposta de cintilação dia a dia na presença de tempestades magnéticas (índice Dst) em quatro (04) diferentes estações magnéticas o autor obtém as seguintes hipóteses:

1. Se a máxima excursão Dst acontece durante as horas de dia e bem antes do pôr-do-sol, a elevação normal em altura da camada F é perturbada e irregularidades são inibidas esta noite (categoria 1).
2. Se grande excursão ocorre no período de tempo da meia noite e após meia noite, a camada se eleva em altura e logo cai, criando irregularidades (categoria 2).
3. Se a grande excursão de Dst toma lugar depois do pôr-do-sol e antes da meia noite, a elevação em altura da camada não é perturbada e irregularidades se formam do mesmo jeito como uma noite não perturbada.

O que foi resumido graficamente (4.5) e que é um resultado muito importante para o estudo de tempestades magnéticas:

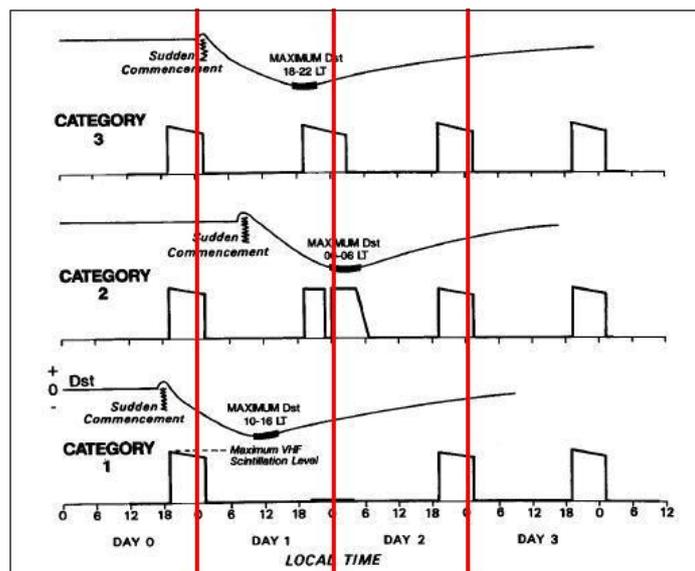


Figura 4.5: Representação gráfica. Aarons1991
 Uma representação gráfica da hipótese.

4.4 Anderson, 2004

Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis

David N. Anderson, Bodo Reinisch, Cesar Valladares, Jorge L. Chau, Oscar Veliz

Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 66 (2004) 15671572

O artigo discute dados obtidos na região Perú-Chile (Ancon - Antofagasta), para o ano 1998 - 1999, medindo o índice S4 para frequências UHF e a velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$, com finalidade de previsão (forecasting).

Pesquisas recentes abrem a questão científica de que talvez uma subida na deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ é necessária e suficiente ou simplesmente necessária para criar condições ambientais que conduzem à atividade de cintilação. Isto foi discutido por Fejer et al.,(1999) [36] e Fagundes et al.,(1999), que mostram a necessidade científica de maior investigação na variabilidade dia-a-dia em atividade de cintilação e aumento da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ utilizando uma maior base de dados.

Sendo o objetivo criar uma habilidade para prever a atividade de cintilação UHF em estudo noite-a-noite. Com isso seria possível determinar se o pico pré-reversão na deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ para cima é ambas necessário e suficiente, ou simplesmente necessário. O estudo se realiza na costa oeste da região sul americana onde sensores apropriados são localizados para (1) inferir a velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ depois do pôr-do-sol e (2) observar o índice de cintilação S4 na frequência UHF.

A altura de uma densidade de eletrons de 2×10^5 como o observado pelo ROJ está em 200 Km às 1800LT durante o equinócio, e condições de máximo solar (Cramer, 1992 [?]). Como um exemplo, mostrado no artigo: se o valor da altura "verdadeira" de $2 * 10^5 el/cm^3$ foi observado um incremento de 200 a 300 Km entre 1800 e 1900 UT, isto implicaria que a velocidade de deriva para cima $\vec{E} \times \vec{B}$ foi próximo de 28 m/s. Uma deriva desta magnitude criaria as condições ionosféricas conducivas ao início de instabilidades de plasma via o mecanismo de instabilidade R-T (Basu at al., 1996 [13]).

A fig. 4.6 mostra um exemplo do perfil da parte baixa visto pela Digissonda de Jicamarca em 1900 e 1930 LT em 13 de dezembro, 1999. A elevação em altura da camada de aproximadamente $2 * 10^5 el/cm^2$ neste periodo de tempo de 30 minutos é 100 Km, ou o equivalente em velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ de 55m/s.

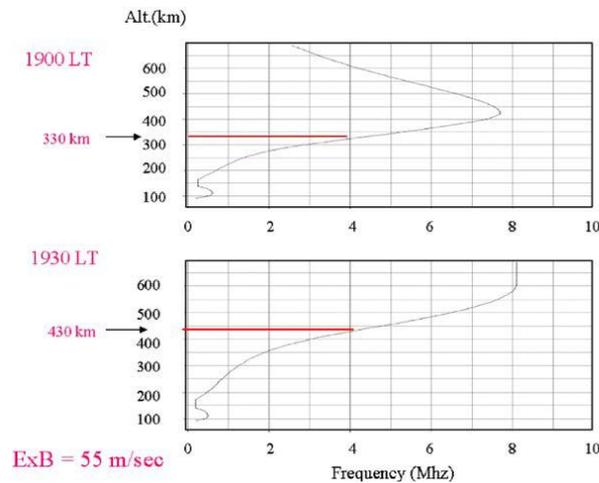


Figura 4.6: Deriva vertical. Anderson, 2004
 Estimando a velocidade da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ em 4MHz.

Da fig. 4.7 (3, 4, 5 e 6 do artigo), cada ponto representa uma noite específica quando a Digissonda de Jicamarca foi utilizada para inferir a velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ entanto que o valor de índice S4 (máximo) foi observado pelo receptor de cintilação em

UHF de Antofagasta, que pega dados do satélite Fleetsat 7.

Em abril,1998, os valores de S4 para as noites quando a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ é maior que 20m/s, são todos maiores que 0.8. Correspondentemente, quando a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ é menor que 20m/s, todos os valores de S4 foram menores de 0.4. Similarmente para Julho, 1999, quando só uma noite com a deriva vertical excedeu a velocidade de 20m/s, o valor S4 foi de 0.7 para esta noite. Nas outras noites a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ foi menor que 20m/s e os valores S4 menores que 0.3.

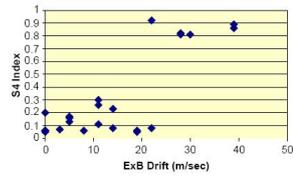


Fig. 3. Observed E x B drifts and subsequent S4 values for several days in April, 1998.

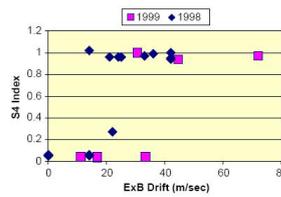


Fig. 5. Same as Fig. 3 for October, 1998 and 1999.

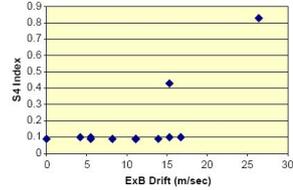


Fig. 4. Same as Fig. 3 for July, 1999.

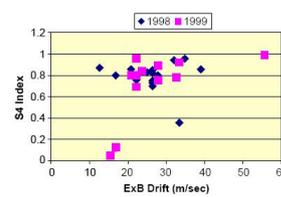


Fig. 6. Same as Fig. 3 for December, 1998 and 1999.

Figura 4.7: S4 vs $\vec{E} \times \vec{B}$. Anderson, 2004

Deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ observada e subsequente valores S4 para vários dias.

Dos gráficos anteriores e das figuras 5 e 6 (que não estamos mostrando) se pode concluir que por alguma razão, existe uma velocidade limiar de 20m/s, pois das 24 noites (Dezembro 1998 e 1999) com $S4 > 0.7$, a velocidade de deriva foi maior que 20m/s em 22 destas noites.

O fato que exista um limiar na deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ que determina talvez a subsequente atividade de cintilação para ocorrência ou não ocorrência implica que: (1) a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ precisa estar acima de um valor antes que a parte baixa do Spread-F possa percolar para cima e formar as “bolhas” equatoriais, e (2) o mecanismo “semente” está sempre presente e todo o que é requerido (necessário e suficiente) é para que a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ seja maior que algum valor crítico.

Capítulo 5

Instrumentação

Para o estudo no período de Outubro 2006 à Fevereiro 2007 foram utilizados, além dos índices Kp e Dst, dados obtidos por diferentes equipamentos (de pesquisa ionosférica) em locais diferentes, mas localizados abaixo da anomalia equatorial. Tendo como dados da variação de amplitude do sinal na banda de frequência L, com o receptor GPS da estação de Natal-RN; dados de luminescência adquiridos com o All Sky e um Fotômetro na estação de São João do Cariri-PB, e como último, dentro destes dados observacionais temos a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ que obtemos de análises de h'F obtido na estação de Fortaleza-CA, com a Digissonda.

5.1 GPS(L1) - Natal

O sistema de monitoramento ionosférico das cintilações eletromagnéticas através de receptor GPS, chamado de SCINTMON (Monitor de Cintilações Ionosféricas), consiste de um computador com placa conversora de 12 canais para processamento do sinal de satélite desenvolvida pela GEC Plessey. Um software desenvolvido na universidade de Cornell permite obter a amplitude do sinal recebido em banda L1 com a alta taxa de 50 amostras por segundo. Os sinais são recebidos através de uma antena GPS tipo ANP-C 114 com filtro: 3.0" *diam.* \times 0.66" altura, que utiliza polarização circular à direita, sintonizada para recepção de frequências de 1575 ± 5 MHz, com ganho de 26 dB.

Nós, do grupo de Física da Ionosfera da UFRN estamos desenvolvendo pesquisa baseada no estudo das bolhas através do monitoramento da cintilação do sinal recebido

dos satélites GPS. Estas são regiões de rarefação do plasma ionosférico, as quais causam mudanças no índice de refração no meio, sendo capazes de dispersar ondas de rádio transionosféricas como o sinal emitido pelos satélites GPS. Quando estas flutuações são devido ao efeito das bolhas de plasma sobre os sinais de GPS elas são denominadas "cintilações ionosféricas", mas não necessariamente elas são as únicas a produzir cintilações.

O aparecimento destas bolhas tende a seguir um determinado padrão sazonal. A época de observação das bolhas ionosféricas normalmente tem início em setembro e segue até março [R.T. Medeiros (1985) [70]] na região brasileira. Com relação ao horário de ocorrência, elas são observadas nos períodos entre às 1800 até 0300 horas LT. O fato de tomar como hora de início às 1800 horas LT tem sido utilizado nesta estação desde o ano 1975 quando se utilizava uma grande antena de 28 ft de diâmetro [J. Aarons, 1977 [?]] recebendo em 254 MHz. Entretanto, as bolhas ionosféricas podem ser observadas em outras estações do ano em períodos magneticamente perturbados devido à penetração no equador magnético de campos elétricos de origem magnetosférica. Através do processamento destes dados, obtemos a elevação de cada satélite no campo de vista do receptor e os valores de potência de sinal recebido. A partir deste último, identificamos a ocorrência ou não de cintilação do sinal.

O SCINTMON é um software computacional desenvolvido a partir de um kit GEC Plessey. Ele permite monitorar a frequência L1 transmitida pelo GPS, e é capaz de amostrar simultaneamente 11 satélites, porém somente coleta dados de satélites com uma elevação superior a 10° , sendo que para este trabalho foi utilizado um ângulo de elevação de 30° , por T.L.Beach(1998) [17].

O programa é executado em ambiente DOS e permite ao usuário definir um modo de operação no qual o sistema opera de forma automática. Futuramente instalaremos o SCINTMON para rodar no ambiente Linux e permitirá visualização do S4 e outros parâmetros como azimute e elevação em tempo real. O usuário deve apenas definir os horários de início e fim de gravação de dados. Como as irregularidades formam-se no período do anoitecer e permanecem até aproximadamente meia-noite local, em períodos magneticamente calmos, e até, em algumas vezes, o amanhecer, para períodos magneticamente perturbados, são feitas observações entre as 18h00min e 06h00min horas

locais para esta estação GPS.

As características do GPS da estação de Natal podem-se encontrar na Tabela 8.1, no Apêndice.

A cada período de observação o programa SCINTMON gera dois arquivos com as informações dos satélites observados, que são .FSL e .N da forma:

- "AAMMDD.FSL": que contém informações da amplitude do sinal recebido de todos os satélites rastreados.

- "AAMMDD.N": que contém informações gerais sobre cada satélite rastreado.

Estes arquivos são necessários para rodar o aplicativo SUM.EXE (arquivo sumário da atividade de cintilação). O arquivo resultante é AAMMDD.SUM que carrega a posição de satélite, índice de cintilação, e potência do sinal de cada satélite observado durante o período de coleta, com intervalos de um minuto. Este arquivo .SUM é pequeno (150 KB).

Após este passo, utilizamos o comando SCANFILE para inspeccionar o conteúdo dos arquivos de dados (.FSL e .N) do período coletado. Uma vez que o programa está rodando poderemos ver gráficamente a passagem dos satélites no céu (ionosférico), recebendo o sinal de cada um deles em forma gráfica como cintilações ao longo do tempo, posição no céu destes satélites (PRN).

A seguir, escolheremos satélites em particular que apresentaram cintilações (segundo o observado no SCANFILE), isto para obter as informações da flutuação de potência do sinal. Isto o fazemos no DOS com o comando EXTRACT, obtendo um arquivo .DAT.

Agora já estamos prontos para poder processar a informação obtida (.SUM, e .DAT) e iniciar o procedimento desejado.

Utilizaremos o aplicativo S4WRITE1.EXE (autoria do Prof. E. Bonelli, UFRN) que nos gera um gráfico em 3D (precisando de óculos 3D) e observamos as trajetórias percorridas pelos satélites, assim como quais apresentaram cintilações. E obtemos um arquivo com o índice de cintilação (índice S4, desvio da intensidade) para o período coletado, ou (segundo a instrução fornecida) para cada hora. Sendo possível ter informações para cada pequeno intervalo de tempo desejado. Instruções e comandos podem ser encontrados no Apêndice 8.6.

5.2 All Sky - Campina Grande

O Imageador All Sky (ou céu todo) é um instrumento que faz fotografias de alta resolução das emissões de luminiscência.

Nesta seção colocaremos o princípio do Imageador e detalhamos um pouco a estrutura deste equipamento.

5.2.1 Descrição geral do instrumento

O imageador All Sky é um instrumento contituido por uma lente de olho de peixe, uma câmara CCD, um sistema ótico, uma roda de filtros de interferência, um sistema de refrigeração e um micromputador. Este sistema é capaz de detetar variações de aerolumiscência noturna e registrá-las através de imagens como arquivos digitais.

Na figura 5.1 pode ser vista um esquema do imageador All Sky instalado na estação de São João do Cariri-PB ¹, contendo as partes principais que possibilitam seu funcionamento, e uma foto (5.2) do equipamento utilizado na estação de São João de Cariri-PB.

Como foi indicado por Igo Paulino (comunicação pessoal), com o imageador podem-se registrar imagens e pode-se ainda monitorar em tempo real as variações do airglow ².

O sistema consiste de uma lente olho de peixe ($f/4$) com um campo de visão de 180° , obtendo uma imagem completa do céu acima dela. Esta imagem passa através de um sistema ótico telecêntrico (que leva a imagem o mais perpendicular possível). A trajetória ótica é interrompida por uma roda de filtros (ver espedificações em Medeiros, 2001 [52]), que é controlado por um sistema de computador.

A imagem filtrada passa através de um outro sistema de lentes que reproduz a imagem no CCD (o CCD é basicamente uma matriz de células sensíveis à luz), e a imagem é captada através de células individuais, cada uma é denominada píxel.

As imagens que passam pelo filtro possuem aproximadamente 75mm de diâmetro e têm que ser projetadas sobre o CCD que possui 24 mm de diâmetro.

¹7.38°S, 36.5°O

²airglow: fraca emissão de luz da atmosfera da Terra. Luminiscência

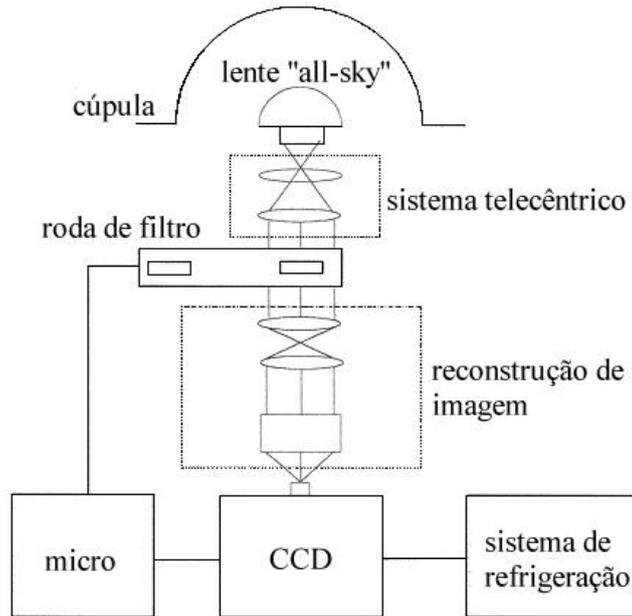


Figura 5.1: Diagrama de blocos, Imageador
 Diagrama em blocos do imageador “all sky” com câmara CCD. FONTE:
 Medeiros (2002).

5.2.2 Dados de imagens

As imagens foram coletadas em São João do Cariri-PB no laboratório de Vagalume da Universidade de Campina Grande. As imagens digitais de luminiscência coletadas pelo imageador são transformadas em arquivos de imagens com extensão “.tif” (no programa IDL 6.2). Cada uma destas imagens é uma matriz 512×512 elementos.

Linguagens de programação são utilizados para manusear estas imagens. Antes de poder estudar efetivamente os comportamentos dos fenômenos observados é preciso fazer alguns tratamentos nas imagens. E resumindo o procedimento de linearização das imagens da seguinte forma (Pimenta, 2002 [59]):

- Escolher uma boa imagem com muitas estrelas próximas ao zênite.
- Identificar as estrelas (coordenadas x,y) na imagem original, através de uma rotina apropriada.
- Usar o aplicativo “Sky-map” e identificar as estrelas da imagem original (obter os parâmetros azimute e elevação).

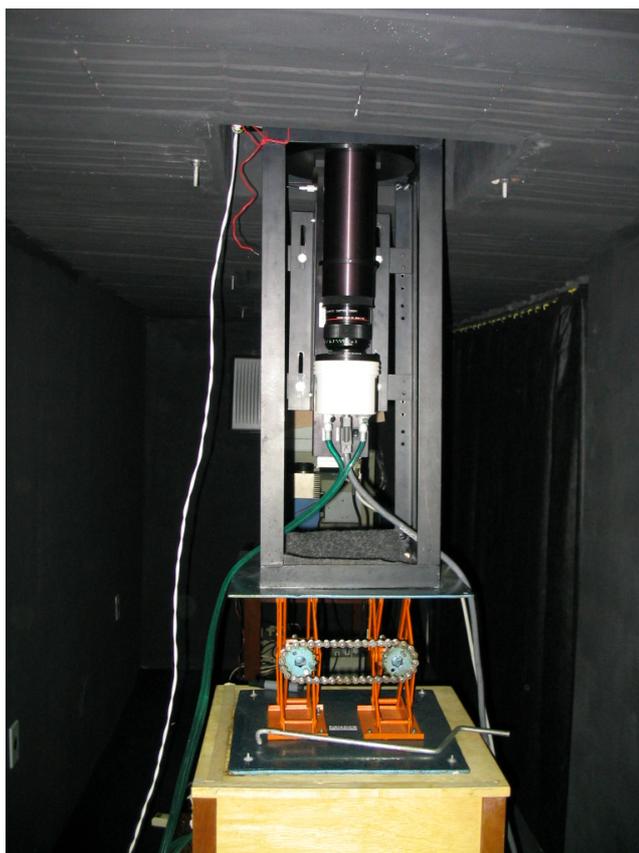


Figura 5.2: Imageador All Sky
Imageador All Sky de São João de Cariri - PB.

- Fazer a correção das coordenadas X e Y obtidas no ítem (b), através de uma segunda rotina.
- Criar um arquivo de dados com os valores para azimute, elevação e coordenadas corrigidas de cada estrela.
- Obter o zênite real da imagem, o azimute corrigido e os coeficientes da função da lente "all sky" através de uma terceira rotina.
- Logo gerar os mapas de correção.

Claro que tudo isto foi desenvolvido no laboratório de Vagalume, e nós pegamos os dados já processados, e utilizando o software IDL 6.2 conseguimos gerar as imagens a partir de arquivos de dados já processados.

Uma condição necessaria é que o céu na média esteja limpo, sem nuvens, podendo-se coletar dados quando estamos em Lua nova, isto para evitar toda luminosidade e reflexões

de luz natural.

5.3 Digissonda - Fortaleza

A Digissonda é, essencialmente, um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética verticalmente, de alta frequência, em relação ao solo, com varredura em frequência tipicamente entre 1 e 25 MHz. O sistema opera como uma sonda de incidência vertical proporcionando informações sobre a ionosfera local (altura virtual em função da frequência, a fase e amplitude do sinal refletido e a variação Doppler devido ao movimento do refletor, em uma ou uma série de frequências) (Neto B., 1999 [58]).

Em geral, como a ionosfera é um meio iônico e magnetizado, a onda emitida divide-se em dois modos de propagação: onda ordinária e onda extraordinária. A onda ordinária é refletida nas alturas onde o índice de refração μ é nulo. Isso ocorre quando a frequência da onda é igual à frequência de plasma naquela altura. Portanto, emitindo-se ondas em frequência diferentes, que serão refletidas em alturas diferentes, pode-se construir o perfil de densidade da ionosfera, na região abaixo do pico de densidade eletrônica (Pimenta 2002) [59].

Os dados coletados pela digissonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. A sequência destes ecos recebidos, organizados adequadamente, produz um registro denominado ionograma, que é um gráfico da variação da altura virtual de reflexão em função da frequência do sinal emitido.

São obtidos diferentes parâmetros que determinam alguma propriedade para ser estudada, como:

- foF1, frequência crítica da onda ordinária da camada F1;
- foF2, frequência crítica da camada F2. É a frequência máxima de reflexão da onda eletromagnética na ionosfera;
- h'F, altura virtual mínima da camada F: este parâmetro representa a altura da base da camada F da ionosfera, sem levar em conta o atraso de propagação da luz no meio magneto iônico, e é obtido através de leitura direta nos ionogramas;
- h'F2, altura virtual mínima do traço ordinário da camada estável mais alta na região F;

- h_pF2 , é uma estimativa da altura do pico da camada F2 obtida a partir de uma aproximação parabólica para a forma dessa camada; e
- h_mF2 , altura do pico da camada F.

E nós utilizamos o $h'F$ para estudar a velocidade de deriva e elevação da camada F depois do pôr-do-sol.

Temos como uma boa referência a tese de F. Celso (2004) que tem uma explicação detalhada do processo de obtenção das derivas de ionossonda, e digissonda.

Capítulo 6

Resultados

Os resultados apresentados a seguir, são relativos ao período Outubro 2006 à Fevereiro 2007, que corresponde ao período de mínima atividade solar, do ciclo solar 23. Em termos sazonais o período escolhido está de acordo com estudos realizados na região brasileira (T. M. Rui, 1985 [70]) assim como em vários países da América do Sul ao longo de muitos anos (Rastogi, 1980 [61]; Abdu et al., 1981 [5]; Abdu et al., 1992 [4]), encontrado-se que este período corresponde à probabilidade de maior presença de irregularidades ionosféricas sazonal, e latitudinal.

Para a região nordeste, foi encontrado que a máxima ocorrência de ESF (irregularidades) é no período de outubro à março, tanto para máximo como para mínimo solar. Com dados de ionogramas das estações de Natal e Fortaleza foram obtidas as ocorrências de cintilações (ver Fig. 6.1) para máximo solar, que estão em concordância com um trabalho recente da estação de Fortaleza e Cachoeira Paulista (Abdu et al., 1992 [4]), obtido com dados de deriva vertical.

Para o estudo das tempestades que aconteceram neste período utilizaremos os índices K_p e Dst , dados diariamente colocados na internet por estações magnéticas ao redor do globo, e o índice S_4 coletado na estação de Natal-RN. Tentaremos explicar o comportamento da ionosfera com dados de GPS, na banda de frequência L1, dados do Imageador All Sky e Fotômetro, ambos da estação de São João do Cariri-PB, junto com dados da Digissonda instalada na estação ionosférica de Fortaleza-CE.

Colocamos um mapa ilustrativo (ver Fig. 6.2), para poder ter em mente uma imagem gráfica das posições geográficas das estações de onde estamos coletando os dados. Com isto

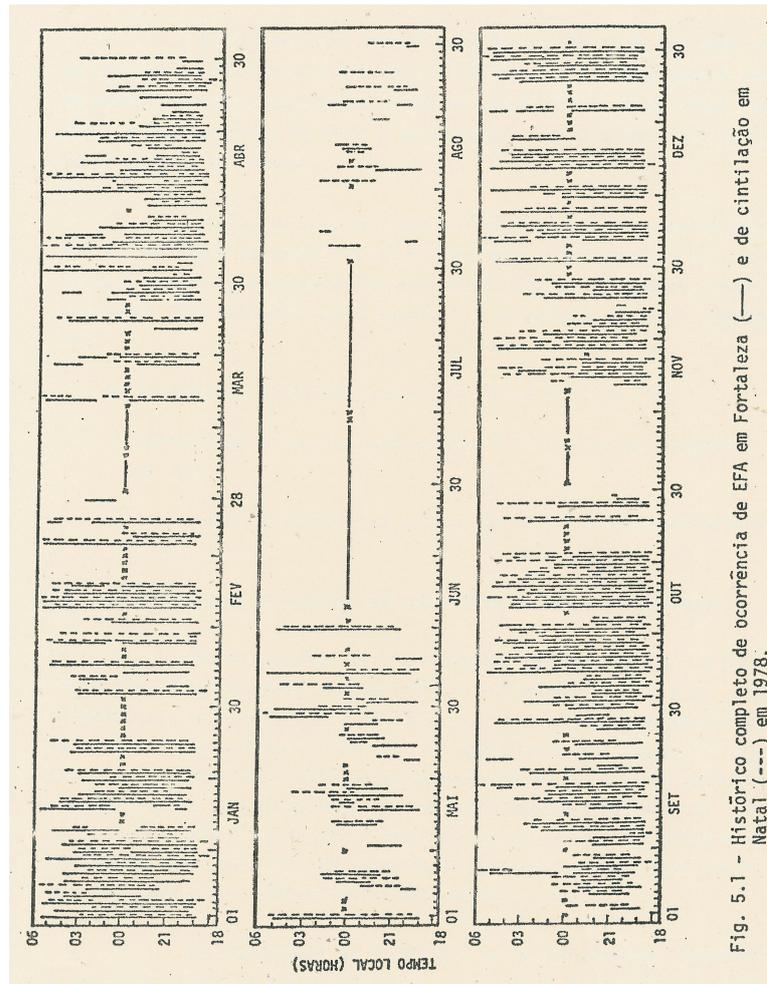


Fig. 5.1 - Histórico completo de ocorrência de EFA em Fortaleza (—) e de cintilação em Natal (---) em 1978.

Figura 6.1: Ocorrência de cintilação em Natal

Gráfico mostrando a ocorrência de cintilações para a estação de Natal, no ano 1987. adquirido de T. M., Rui 1985 [70]

podemos compreender, que, por mais que estas estações estejam em cidades separadas, elas ainda estão dentro de regiões que envolvem o estudo das mesmas irregularidades - dimensões ionosféricas-, porque a velocidade das bolhas para leste é de aproximadamente de 150m/s no início da noite, entretanto cai com o passar do tempo como foi estimado com a técnica de Antenas espaçadas em Natal no ano 1979 (Yeh et al. (1979) [77]), e estas são alinhadas com as linhas do campo magnético, com praticamente a mesma longitude magnética. Com umas dimensões para o GPS de aproximadamente uns 400 m, e as bolhas vistas pelo Imageador All Sky são de dezenas de Kms, com uma forma esticada na direção do campo magnético. O movimento das bolhas está ligado ao movimento leste-oeste do plasma ionosférico.

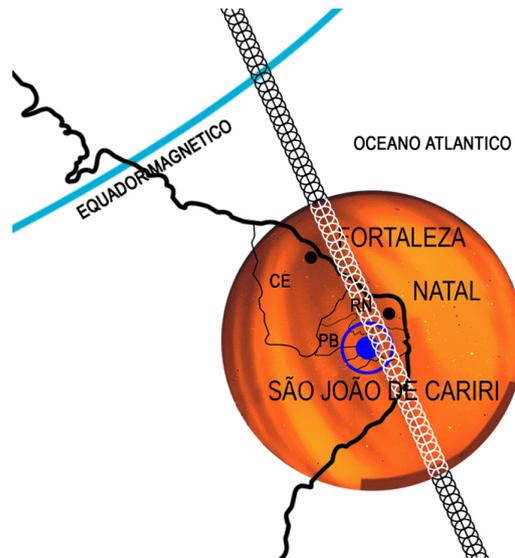


Figura 6.2: Mapa das estações

Mapa geográfico mostrando as estações de Natal, Fortaleza e São João de Cariri. A circunferência centrada na Paraíba, simboliza o campo de visão do Imageador All Sky, e mostrando a observação de uma bolha típica-real, observada na estação da Paraíba no mês de dezembro 2006. (Gráfico preparado pelo Desenhador gráfico J. J. De La Cruz C.)

A metodologia aplicada é simples, e didática. Começamos analisando dias que cumpram a condição do raciocínio de Bonelli (no artigo Bonelli, 2005 [23]), com $K_p > 30$, e valor de K_p até o pôr-do-sol em relação com K_p do dia anterior, que mostra uma anti-correlação entre atividade magnética e índice S4 para tempestades magnéticas no máximo solar, ou seja, escolhemos os dias para nosso estudo. Em seguida, vemos o comportamento do índice Dst nestes dias escolhidos, e o comparamos com os índices K_p e S4, ao longo deste dias. Veremos se corresponde com o desenvolvimento de uma tempestade magnética, logo tomamos dias adiante e atrás do dia principal que está de acordo com o raciocínio de Bonelli, para poder obter maior informação.

A seguir, utilizamos informação fornecida pelo GPS (banda L1), como são os sinais dos satélites, analisamos os sinais para estes dias envolvidos nas já determinadas fases das tempestades e observamos o comportamento do sinal, do qual podemos obter conclusões. Sendo um deles, que estas tempestades estariam se encaixando na categoria I de Aarons, 1991 [1]. A categoria I de Aarons indica em termos gerais, que quando ocorre o máximo Dst -fase principal- nas horas de dia, então teremos inibição de cintilação durante esta noite.

Tentando terminar esta primeira análise, veremos como foi o comportamento da ionosfera no momento que aconteceu este fenômeno observado, fazemos uso da velocidade de deriva, altura virtual da camada F ($h'F$), o que poderemos comparar com o resultado obtido em Anderson(2003 [7] e 2004 [8]) o qual explica que há uma velocidade limiar de 20m/s, na deriva vertical que determina a formação ou não de irregularidades.

Terminado este procedimento, passamos a procurar o que aconteceu com as outras tempestades que se desenvolveram neste mesmo período, mas não foram consideradas pelo método aplicado (Bonelli2005). Para isto pegamos estas “novas”tempestades (segundo o Dst) e comparamos os valores Dst durante suas fases, com os índices Kp e S4 (diário e horário). Observamos o comportamento, e analisamos o sinal dos satélites observados nestas noites para analisar o que aconteceu em comparação com o primeiro método.

Vamos precisar fazer uso da altura da camada F ($h'F$), a velocidade com que ela subiu antes do pôr-do-sol, e veremos se tivemos ou não bolhas comprometidas (dados do fotômetro). Com isto podemos tirar conclusões da hora de subida da camada, a fase da tempestade e presença ou não de cintilação. Segundo estas análises, as tempestades analisadas foram colocadas dentro das categorias correspondentes, segundo Aarons(1991) [1]. Se tivermos tempestades que não se encaixam nestas categorias então seria bom começar a explicar que faltou o que tinha demais para que ela não cumprisse condições físicas que a colocassem dentro das categorias que estamos considerando.

A tabela abaixo mostra as coordenadas magnéticas das estações utilizadas no período em estudo, e o equipamento do qual foram pegos os dados:

Tempestades Magnéticas,		
	Coordenadas Magnéticas	Cidade
GPS(L1)	5.84°S, 35.20°O	Natal-RN
All Sky Fotômetro	7.38°S, 36.5°O	São João do Cariri - PB
Digisonda	3.8°S, 38°O	Fortaleza-CE

Tabela 6.1: Coordenadas geográficas das estações ionosféricas

6.1 Anti-correlação

6.1.1 Um critério para previsão de cintilação

Com o objetivo de fazer a previsão de cintilação na região equatorial, é que utilizamos o critério de E. Bonelli, que funciona observando o desenvolvimento do índice Kp ao longo do dia, e antes do pôr-do-sol, que é quando a camada F começa a elevar-se. A finalidade é poder prever a intensidade de cintilação (atenuação) para a noite em estudo. O método Bonelli2005 [23] pode assim ser resumido:

- Quando, durante o dia, antes do pôr-do-sol, a atividade magnética (Kp) é alta, com respeito ao dia anterior, o índice de cintilação cai, também com respeito ao dia anterior. (Bonelli, 2005 ¹ [23]).

Isto nos representa a ocorrência de uma Tempestade magnética, já que o Kp alto refere-se a um Kp>30 no artigo de Bonelli (2005), e neste caso utilizaremos só uma razão.

Utilizaremos a fórmula 6.1 que representa o método Bonelli2005, para previsão de diminuição do índice S4. Sendo que a equação 6.1 é a expressão quantitativa que melhor representa o método, com isto escolhemos o dia em que, com alta probabilidade, vamos ter atenuação de cintilação.

$$\frac{\Sigma_{Kp}Total^{-1}}{\Sigma_{Kp}Prévio} < 0.5 \quad (6.1)$$

Onde, $\Sigma Total^{-1}$ é a soma de Kp total do dia anterior, e $\Sigma Prévio$ é a soma do índice Kp até o pôr-do-sol para o dia em estudo. Se a equação acima é verdadeira então temos que no dia em estudo a média do índice de cintilação vai ser baixo (atenuação), significa que será uma noite calma.

¹web page: <http://agu2005.ponta-negra.com/>

Aplicamos o raciocínio para procurar em cada dia do mês se vai ter ou não efeito segundo a equação 6.1. Podemos resumir o resultado deste passo nas tabelas 6.1.1. São realizadas as somas dos K_p , do dia em estudo até o pôr-do-sol, e soma K_p total para o dia anterior, para poder apreciar bem o comportamento do índice K_p e a resposta do $S4$. Estas tabelas saem da análise dos gráficos 6.3 até 6.7, que representam $\Sigma_{K_p}Prévio$ e $\Sigma_{K_p}Total^{-1}$ para cada dia do mês.

Os dias que aparecem nas tabelas são colocados segundo os gráficos, e aplicamos a fórmula de Bonelli2005. Também estão dias antes e dias depois do dia em estudo, isto para fins didáticos. Aplicando a fórmula nos dias escolhidos temos que para os dias envolvidos na diminuição do índice $\langle S4 \rangle$ o valor da razão é sempre menor de 0.5.

Observando as tabelas apreciamos que dois dias (Outubro 20, e Dezembro 14) apresentam uma diminuição no dia seguinte, ao dia esperado. Vamos precisar obter maior informação destes dias para explicar o acontecido.

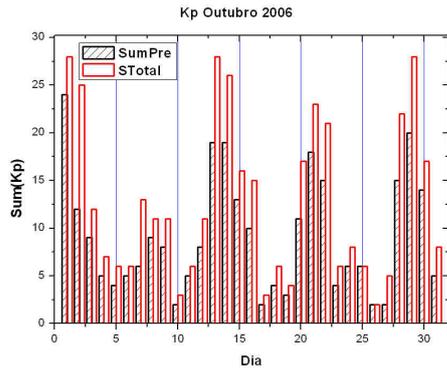


Figura 6.3: Outubro 2006

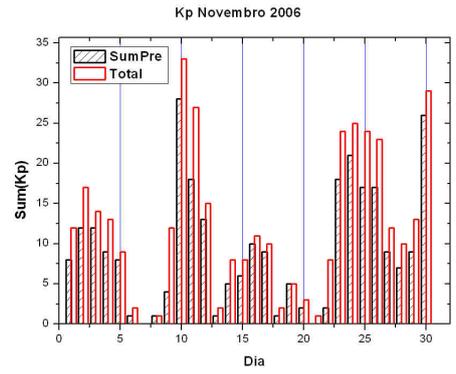


Figura 6.4: Novembro 2006

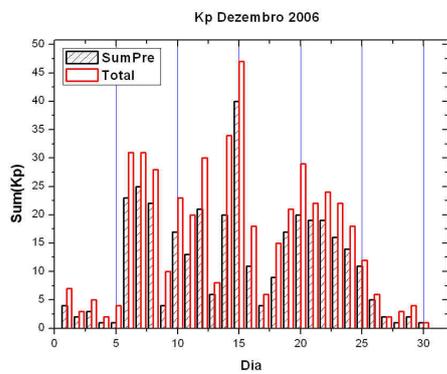


Figura 6.5: Dezembro 2006

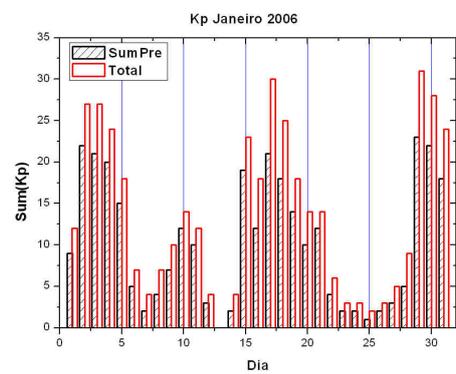


Figura 6.6: Janeiro 2007

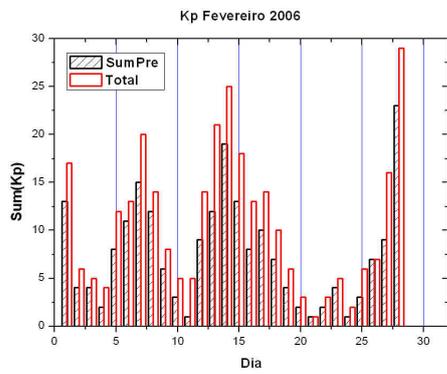


Figura 6.7: Fevereiro 2007

Tempestade, Outubro-2 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
19	3	4	0.085158	
20	11	17	0.104206	0.36
21	18	23	0.043817	0.94
22	15	21	0.067399	0.153
23	4	6	0.102382	5.25

(Temp. Outubro)

Tempestade, Novembro-1 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
08	1	1	0.174438	
09	4	12	0.074429	0.25
10	28	33	0.037411	0.4285
11	18	27	0.105093	1.83
12	13	15	0.0.168741	2.0769

(Temp. Novembro)

Tempestade, Novembro-2 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
21	0	1	0.060441	
22	2	8	0.098236	0.5
23	18	24	0.040662	0.4
24	21	25	0.092837	1.1428
25	17	24	0.126017	1.4706

(Temp. Novembro)

Tempestade, Dezembro-1 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
04	1	2	0.152872	
05	1	4	0.137953	2
06	23	31	0.086713	0.1739
07	25	31	0.102204	1.24
08	22	28	0.085227	1.409

(Temp. Dezembro)

Tempestade, Dezembro-2 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
13	6	8	0.061534	
14	20	34	0.071758	0.4
15	40	47	0.040476	0.85
16	11	18	0.047846	4.27
17	4	6	0.092176	4.5

(Temp. Dezembro)

Tempestade, Janeiro-2 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
13	0	0	0.052186	
14	2	4	0.072633	0
15	19	23	0.040399	0.2105
16	12	18	0.061053	1.916
17	21	30	0.052536	0.857

(Temp. Janeiro)

Tempestade, Janeiro-3 2006				
Dia	Σ Pré.	Σ T.	$\langle S4 \rangle$	Critério
27	3	5	0.049542	
28	5	9	-	1
29	23	31	0.043504	0.3913
30	22	28	0.058904	1.409
31	18	24	0.039234	1.5

(Temp. Janeiro)

(Tabelas mostrando Σ Prévio; que é a soma Kp antes do pôr-do-sol, e Σ Total; é a soma de Kp para o dia todo. Nos meses de outubro à Janeiro, nos meses que cumprem o critério de Bonelli2005)

O método utilizado para prever se vamos a ter diminuição de cintilação frente a uma tempestade magnética está sendo sempre eficaz, abre o caminho da escolha para analisar e poder prever a inibição da cintilação ($S4$) no dia em estudo.

É também importante analisar todas as tempestades que se apresentam neste período de estudo, e onde não necessariamente está se apresentando a resposta do método aplicado. Para compreender melhor e tentar encontrar outros fatores que dêem mais suporte para fazer a previsão do índice de cintilação para todo evento de tempestade magnética é que partimos para outras análises, na seção seguinte.

6.1.2 Determinando se há Anti-correlação

Uma vez que 6.1 é verdade procuramos dentro dos dados do índice Dst fornecido pelo modelo de previsão de clima espacial de Colorado [69]^{1 2} para comparar com o $S4$ destes dias encontrados nas tabelas acima mostradas. Obtemos os gráficos 6.8 até 6.14, onde se pode observar o seguinte:

- Os dias escolhidos concordam com a presença de uma tempestade magnética.
- O índice $\langle S4 \rangle$ é uma média horária para a noite coletada, desde as 2100 até 2900 TU.
- Observa-se as três fases da tempestade magnética.
- Os dados das noites dos dias 17 de Dezembro e 28 de Janeiro foram perdidos.
- Durante a fase principal da tempestade magnética o índice $\langle S4 \rangle$ diminui muito em comparação às outras noites envolvidas nas fases da tempestade.
- Em meses em que a fase principal permanece mais tempo (Outubro-2, Janeiro-1) temos que o $\langle S4 \rangle$ também continua sendo pequeno.

¹Dst, http://lasp.colorado.edu/space_weather/

²Este Dst de Colorado é chamado de Dst-L, devido aos trabalhos previos desenvolvidos por Xin Li anos previos.

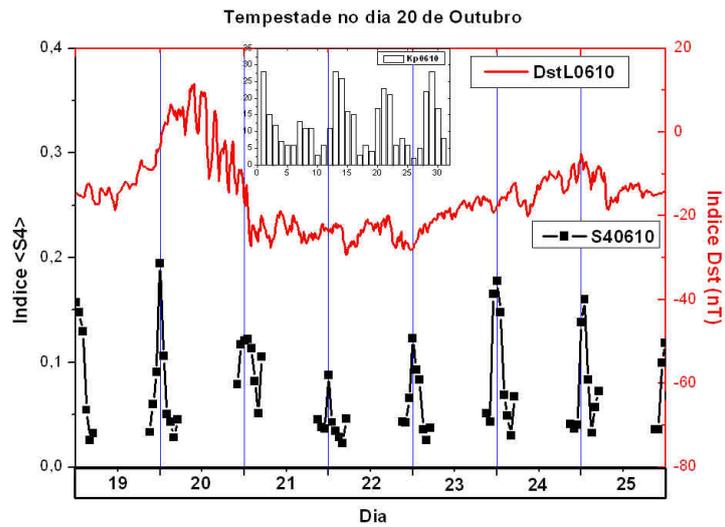


Figura 6.8: Dst-S4, Tempestade-2 Outubro 2006
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 19 até 25 de Outubro.

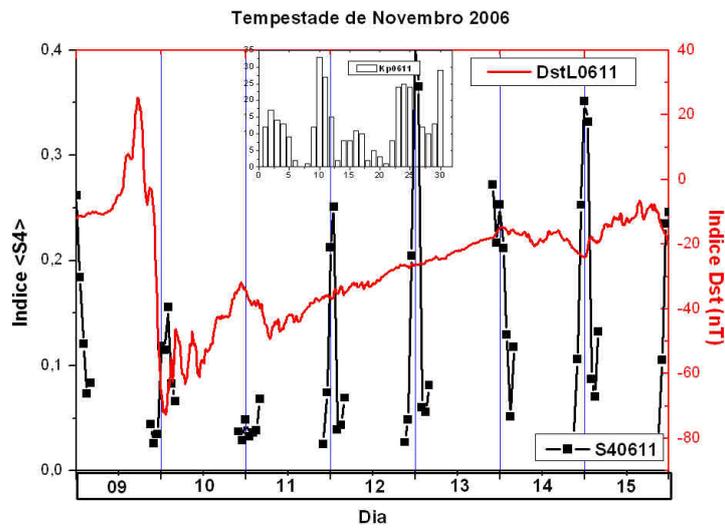


Figura 6.9: Dst-S4, Tempestade-1 Novembro 2006
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 09 até 15 de Novembro.

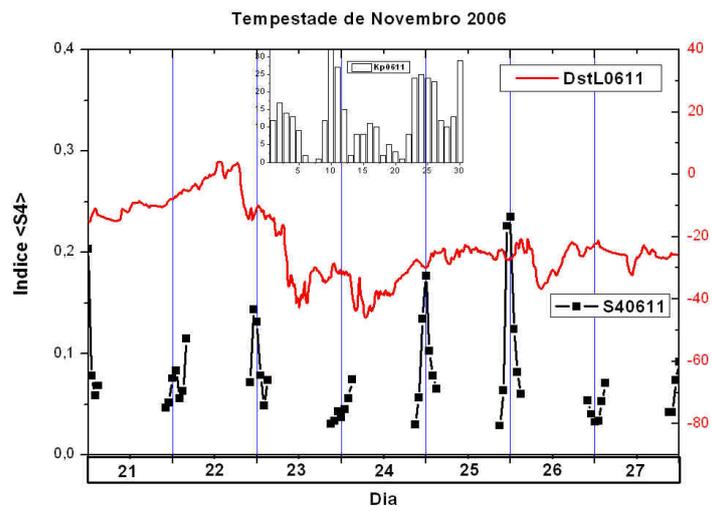


Figura 6.10: Dst-S4, Tempestade-2 Novembro 2006
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 21 até 27 de Novembro.

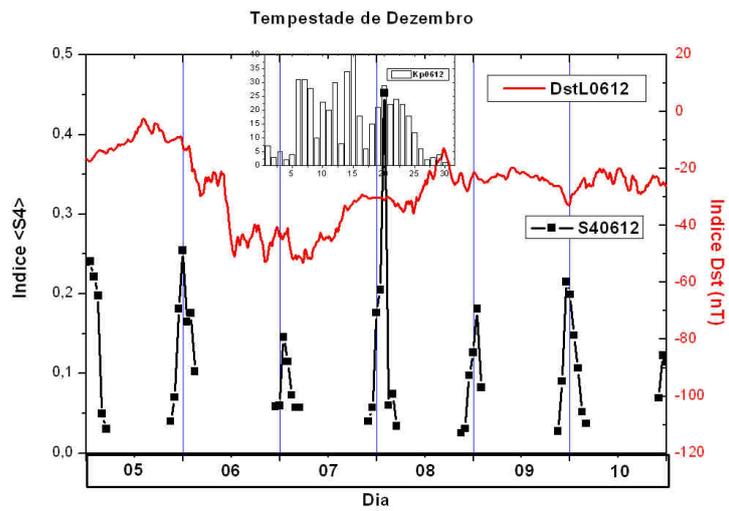


Figura 6.11: Dst-S4, Tempestade-1 Dezembro 2006
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 05 até 10 de Dezembro.

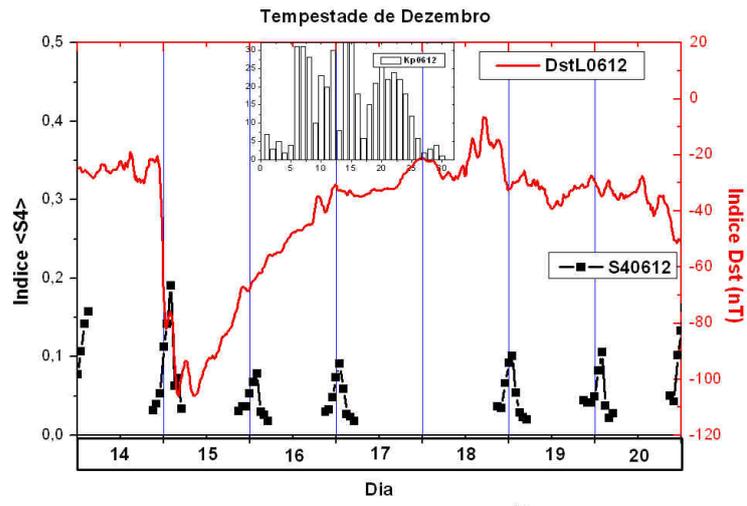


Figura 6.12: Dst-S4, Tempestade-2 Dezembro 2006
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 14 até 20 de Dezembro.

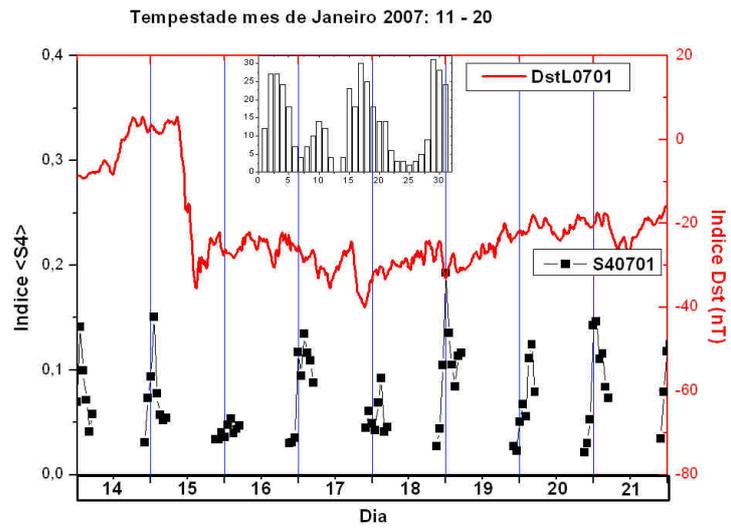


Figura 6.13: Dst-S4, Tempestade-1 Janeiro 2007
Dst-L (cada 10 minutos) e < S4 > horário vs hora, nos dias 14 até 21 de Janeiro.

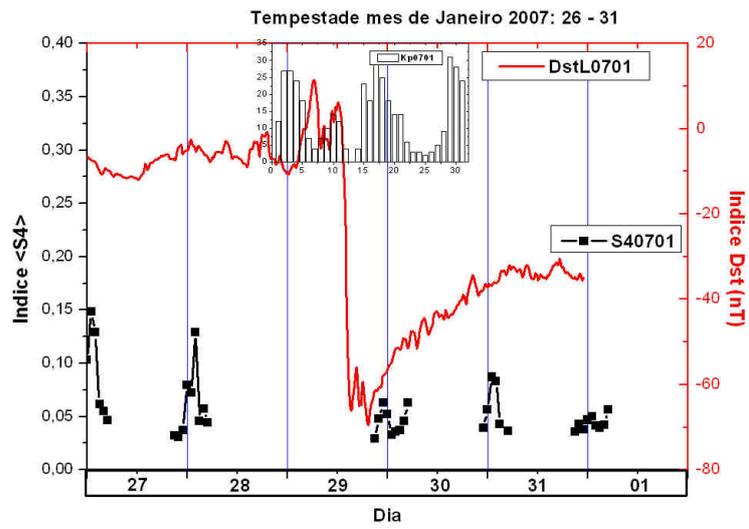


Figura 6.14: Dst-S4, Tempestade-2 Janeiro 2007
Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 27 de Janeiro até 01 de Fevereiro.

Coloca-se o gráfico K_p vs Dias dentro dos gráficos acima mostrados, sempre para se ter uma referência de onde estamos e como é a atividade magnética nesses dias.

Continuando, utilizamos o índice ΣK_p , por ser quem representa a atividade magnética, representado nos gráficos 6.15 a 6.18, encontramos as seguintes características:

- Existem mudanças bruscas no índice $\langle S4 \rangle$ diário ao longo de cada mês em estudo.
- Quando os valores K_p são grandes (observados ao longo do mês) então observamos mudanças grandes de $\langle S4 \rangle$, sendo que quando os K_p se mantêm pequenos (tempo calmo) o valor de $\langle S4 \rangle$ não flutua bruscamente, isto em dias não perturbados assim como na fase de recuperação.
- O índice $\langle S4 \rangle$ médio diário para estes meses é sempre menor ou igual, mas nunca superior (segundo os resultados deste período) que 0.20.
- É evidente que no dia em que acontece a fase principal da tempestade, e no qual temos diminuição de cintilação obtemos um alto valor de K_p . Sempre acima de 20.
- Resumimos como tendo uma anti-correlação entre o índice $\langle S4 \rangle$ e K_p , para dias de tempestade magnética.

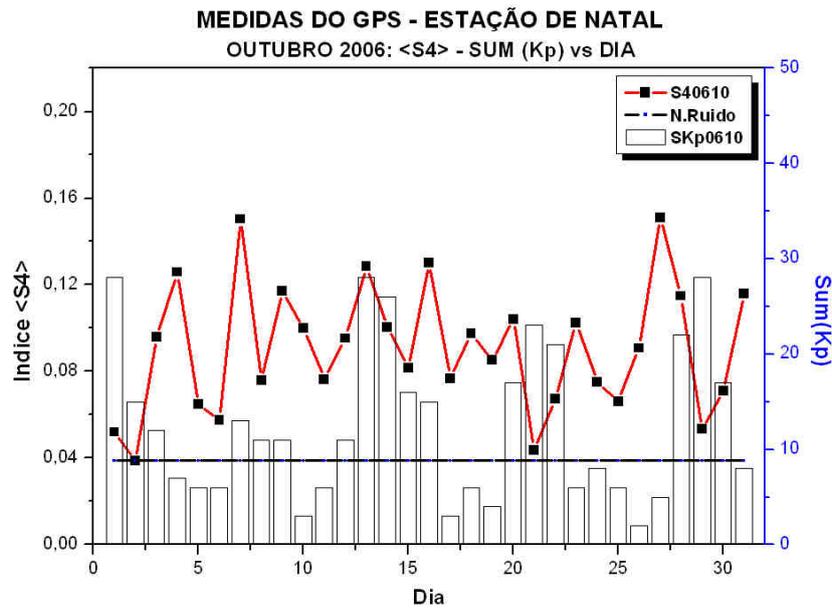


Figura 6.15: S4-Kp, Outubro 2006

Gráfico mostrando os índices $\langle S4 \rangle$ e $\Sigma(Kp)$ vs dia para o mês de Outubro 2006. Podendo-se ver os dias 13 e 29 com um índice Kp alto, pela presença de tempestades magnéticas esses dias.

6.1.3 Sinais de Satélites

Ao rodar o Scanfile¹ (programa² do GPS), podemos ver o céu que é vista via GPS na frequência de trabalho (L1). Utilizaremos isto mesmo para ver o passagem dos satélites com suas respectivas cintilações no sinal emitido (GPS).

Pelo fato, que temos alguns arquivos danificados, é que mostramos só alguns dias - que pudemos resgatar - das tempestades em estudo, nas figuras 6.19 a 6.22. Podemos observar:

- Estes gráficos são obtidos ao rodar o Scanfile (programa que extrai os dados de cintilação a cada minuto), sendo necessários os arquivos **.N** e **.FSI** obtidos dos

¹Scanfile é um programa que analisa médias de 1 minuto do S4 e os mostra contra a abóboda celeste local. Ao contrário de cartas astronômicas, o ponto de vista é de cima, olhando para baixo.

²Desenvolvido por Theodore Lyman Beach, 1998

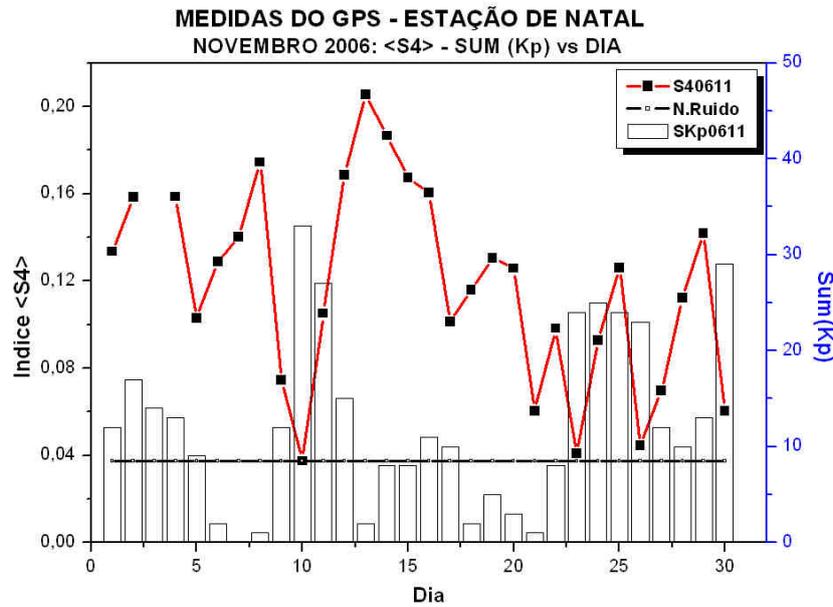


Figura 6.16: S4-Kp, Novembro 2006

Gráfico mostrando os índices $\langle S4 \rangle$ e $\Sigma(Kp)$ vs dia para o mês de Novembro 2006. Mostrando o dia 10 com um índice Kp alto, assim como o dia 24.

registros mais completos, obtidos do receptor de GPS.

- Na passagem dos satélites (reconhecidos pelo PRN) pelo céu deixam no campo de visão do receptor um traço do sinal que é recebido, este pode apresentar fraca, forte, ou também não apresentar cintilação durante a noite de coleta.
- Para evitar os erros de multi-caminho só consideramos os satélites com elevação acima de 30° .
- Pode-se observar que no dia (aliás, noite) da fase principal das tempestades magnéticas em estudo, temos uma atenuação de cintilação do sinal recebido no GPS, o que chamamos de atenuação de cintilação.

Por último vamos analisar o sinal de cada satélite que passa mais tempo no céu, e no zênite. Apartir dos gráficos 6.23 a 6.24, observa-se:

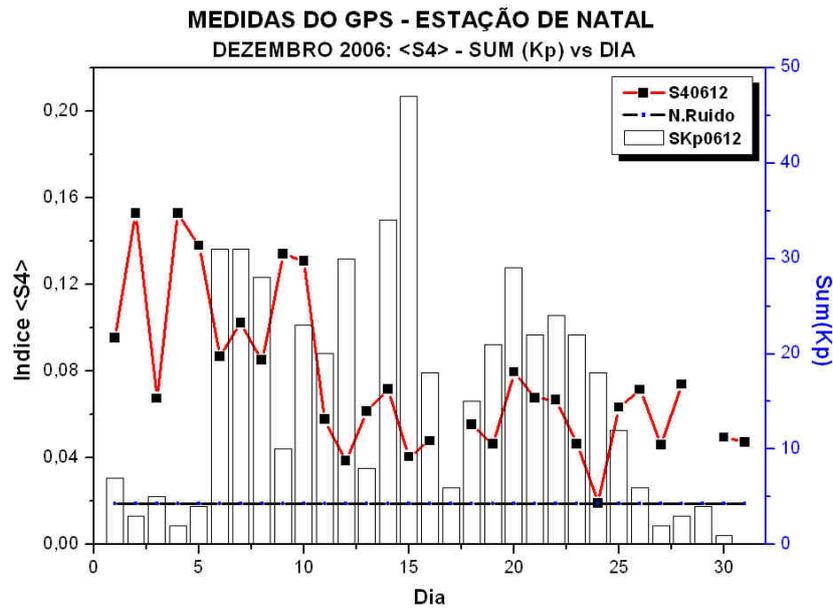


Figura 6.17: S4-Kp, Dezembro 2006

Gráfico mostrando os índices $\langle S4 \rangle$ e $\Sigma(Kp)$ vs dia para o mês de Dezembro 2006. Evidente Kp alto o dia 15 pelo ingresso de tempestade magnética forte.

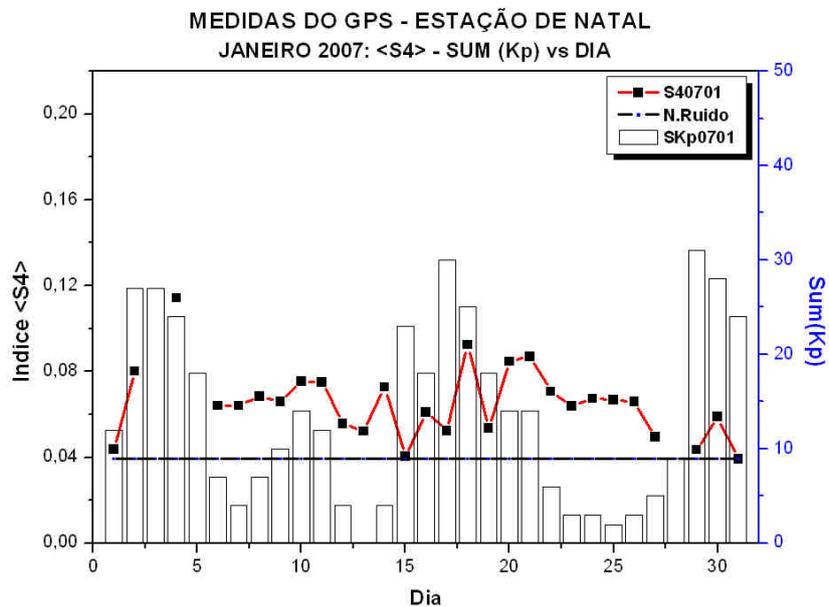


Figura 6.18: S4-Kp, Janeiro 2007

Gráfico mostrando os índices $\langle S4 \rangle$ e $\Sigma(Kp)$ vs dia para o mês de Janeiro 2007. Vemos os dias 15 e 29 com Kp alto.

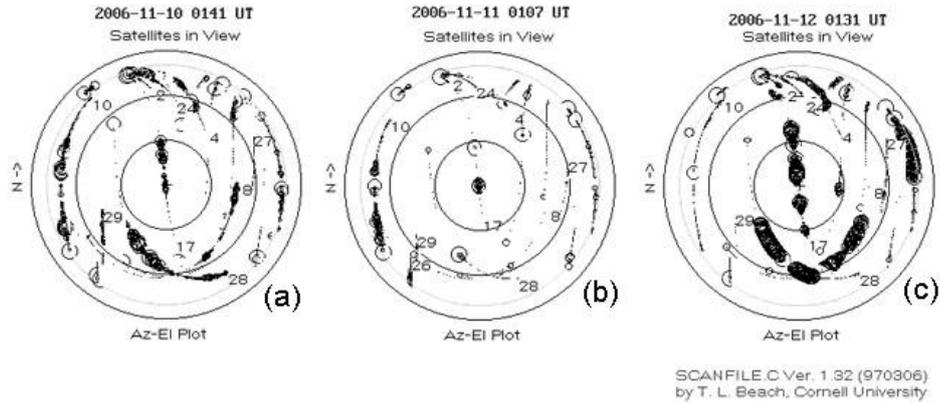


Figura 6.19: Scanfile Novembro-1
 Scanfile do mês de Novembro. Dias 09 ao 11. (a) Início da fase de recuperação, (b) recuperação com pequena intensidade, e (c) recuperação.

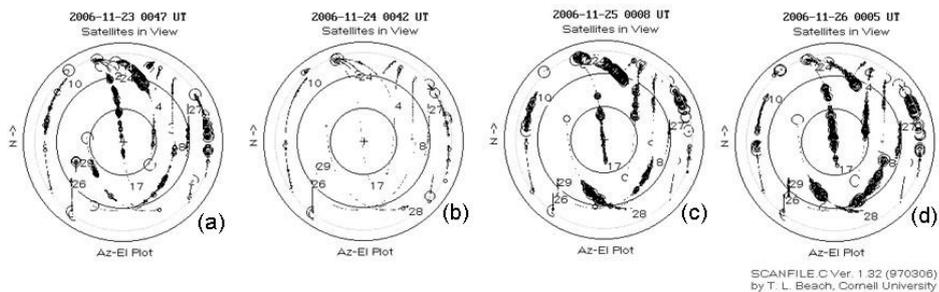


Figura 6.20: Scanfile Novembro-2
 Scanfile do mês de Novembro. Dias 22 ao 25. (a) Fase principal, (b) fase de recuperação, (c) recuperação, e (d) intensificação da tempestade

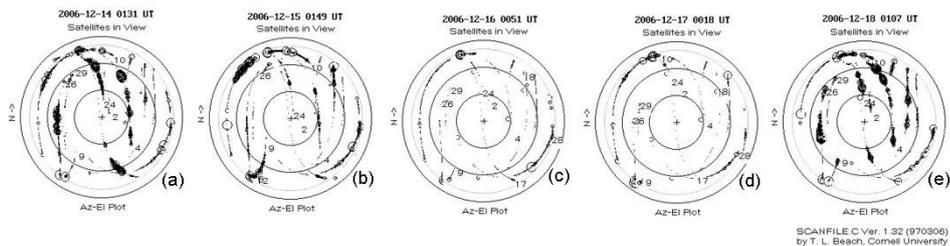


Figura 6.21: Scanfile Dezembro-1
 Scanfile do mês de Dezembro. Dias 13 ao 17. (a) Fase inicial, (b) fase principal, (c) recuperação, (d) recuperação, e (e) recuperado.

- Uma geometria característica do sinal de cada satélite, que é dessa forma devido aos erros (Apêndice) principalmente de multi-caminho.
- Altos valores em amplitude do sinal de alguns satélites, de aproximadamente

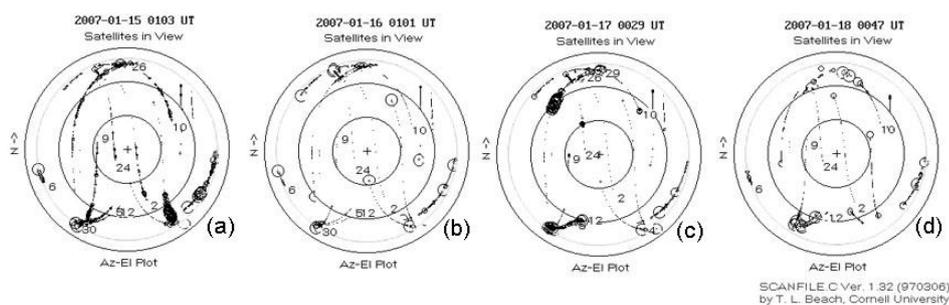


Figura 6.22: Scanfile Janeiro-1

Scanfile do mês de Janeiro. Dias 14 ao 17. (a) fase principal, (b) fase principal, (c) fase principal, e (d) fase de recuperação. Nesta tempestade a fase principal foi longa.

1000 unidades relativas em banda larga, principalmente dias prévios e posterior à tempestade magnética.

- Valores altos de WBP na fase de recuperação e na fase inicial.
- Diminuição considerável dos traços no sinal dos satélites apresentados no dia da fase principal das tempestades magnéticas, o que parece como se o céu tivesse sido limpo (acima de 30° do horizonte).
- Nos dias que correspondem à fase de recuperação a cintilação aumenta consideravelmente, mostrando muita perturbação no sinal.
- No dia 17 de Janeiro 2007, durante a parte final da fase principal da tempestade magnética, o sinal para todos os satélites neste dia, diminui muito. Praticamente não temos flutuação no sinal, e com uma amplitude pequena em comparação com o resto dos dias que envolvem a tempestade.

Percebemos que há um atraso de algumas horas para que aconteça o efeito de atenuação. Temos que ver a hora de início do SC, do Kp grande, e a hora em que começa a aparecer a atenuação do $\langle S4 \rangle$.

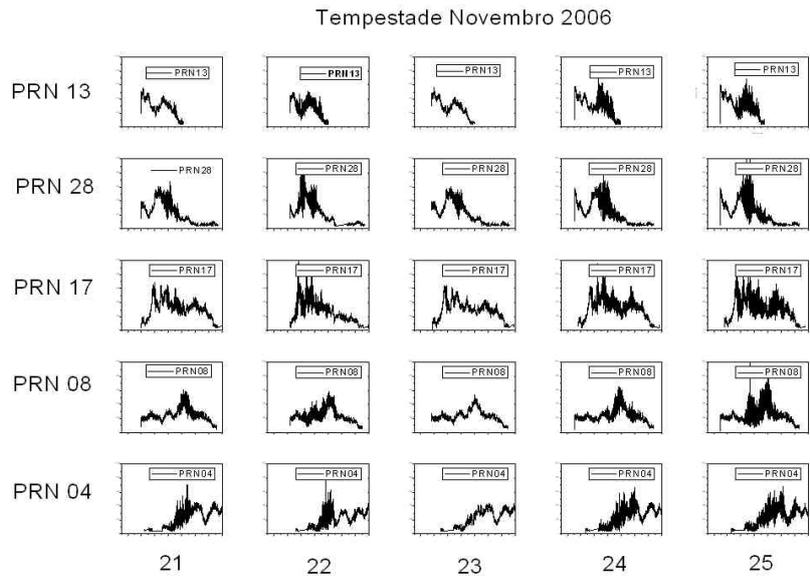


Figura 6.23: sinais-nov06
Sinais do mês de Novembro. Dias 21 ao 25. As unidades é em WBP(Unidades relativas) vs Tempo Universal (h)

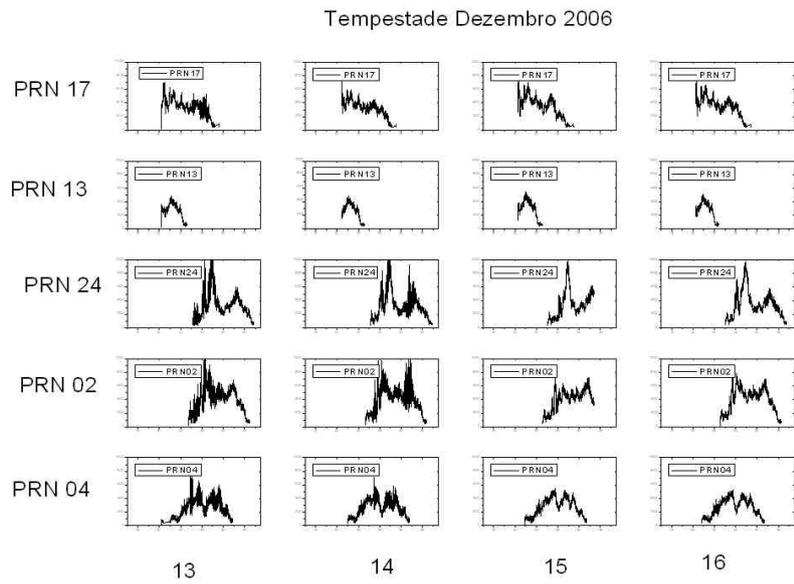


Figura 6.24: sinais-dez06
Sinais do mês de Dezembro. Dias 13 ao 16

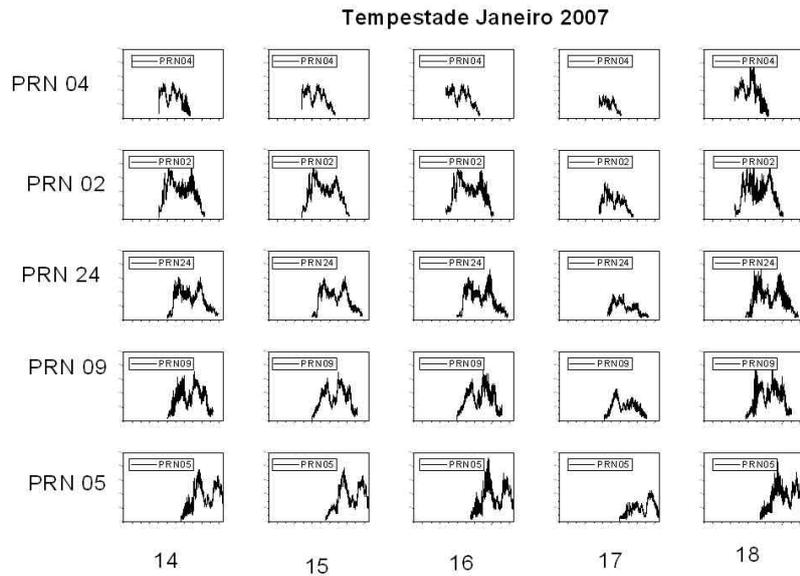


Figura 6.25: sinais- jan07
Sinais do mês de Janeiro. Dias 14 ao 18

Superficialmente com uma simples olhada podemos ver que todas as tempestades magnéticas têm uma diminuição do índice de cintilação durante a noite posterior ao desenvolvimento da fase inicial da tempestade. E estas correspondem à Categoria I, dentro da caracterização de Aarons(1991) [1].

6.1.4 Estudo da Deriva Vertical $\vec{E} \times \vec{B}$

Dados simultâneos da digissonda, obtida em Fortaleza, durante o período de coleta para intervalo de 10 minutos, são usados para o estudo dos efeitos de variação $h'F$ sobre atividade de cintilação durante as fases das tempestades dentro do período em estudo.

Se pode observar dos gráficos mostrados de $h'F$ (da Digissonda) que para a estação localizada em baixo do vale da anomalia equatorial, ao redor das 1130 LT temos um levantamento da camada F que é representado por uns picos nos gráficos $h'F(\text{Km})$ vs Tempo. Com um evento já conhecido que acontece depois do pôr-do-sol local (2100 UT) onde devido à direção do campo elétrico para o leste, a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ leva o plasma para

cima, alcançando o pico F em 300-350 Km.

São colocados os gráficos de presença de bolhas obtidos com o Fotômetro (cortesia do prof. Ricardo Burity) no OI 630nm, sendo que os dias mostrados tiveram presença de bolhas. Assim como também colocamos o background, ao lado da figura. Estes gráficos de background fazem confiáveis as medidas, e a partir do momento em que se observa uma alta oscilação (flutuação) nestes dados, então os dados OI 630nm seriam pouco confiáveis a partir do tempo local em que começou este evento. Dados do Imageador All Sky estão no Apêndice 7.5, organizado por mês e dia.

Dados de Fotômetro não foram obtidos para todas as noites que envolvem a tempestade, isto pelo fato que é necessário estar em lua nova para que o OI 630nm possa ser medido sem (ou com pouco) erro, devido à luz natural da Lua, e a reflexão da luz natural nas nuvens.

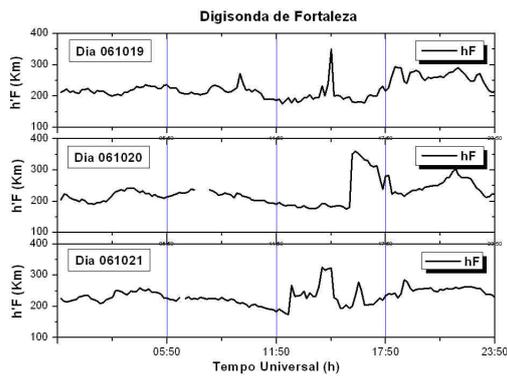


Figura 6.26: Digisonda 0610(19-21)
Dados da Digisonda para a Tempestade de Outubro

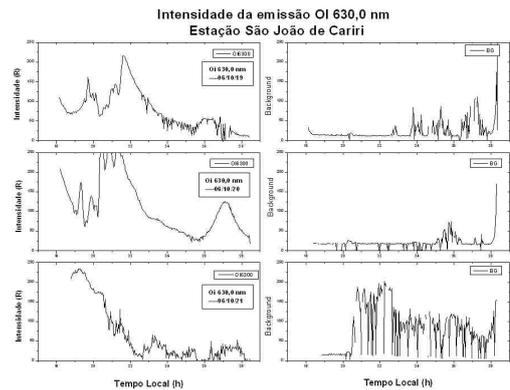


Figura 6.27: Fotômetro 0610(19-21)
Dados do Fotômetro para a tempestade de Outubro

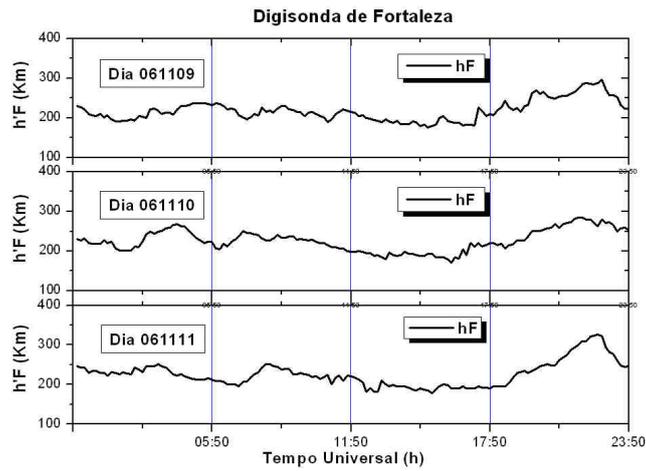


Figura 6.28: Digisonda 0611(09-10-11)
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Novembro

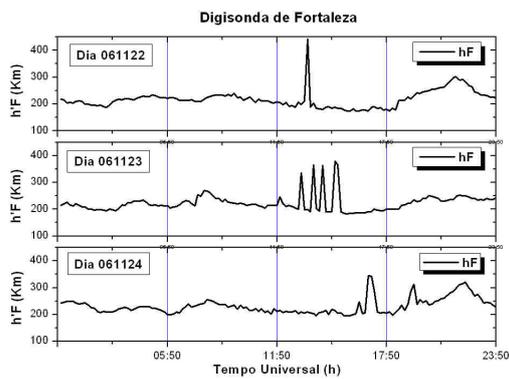


Figura 6.29: Digisonda 0611(22-23-24)
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Novembro.

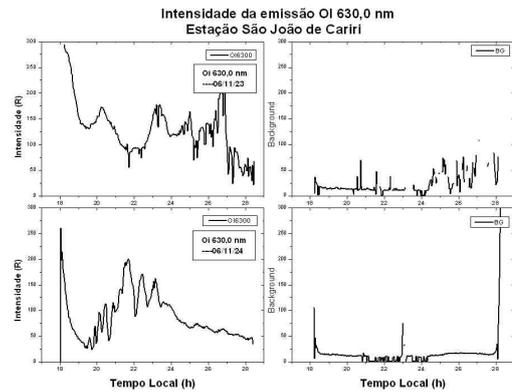


Figura 6.30: Fotometro 0611(23-24)
 Dados do Fotômetro para a Tempestade de Novembro.

6.2 Não Anti-correlação

Temos a presença de tempestades magnéticas ao longo do período em estudo, e presença de irregularidades ionosféricas que produzem cintilação no sinal do GPS. Por esta razão achamos necessário estudar também as outras tempestades que não foram consideradas com o procedimento exposto anteriormente, devido à alta porcentagem de

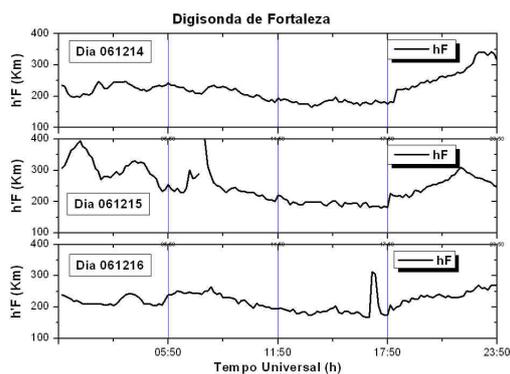


Figura 6.31: Dados da Digisonda para a Tempestade de Dezembro
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Dezembro.

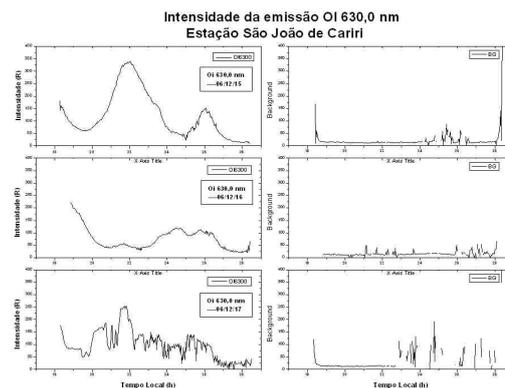


Figura 6.32: Dados do Fotômetro para a Tempestade de Dezembro
 Dados do Fotômetro para a Tempestade de Dezembro.

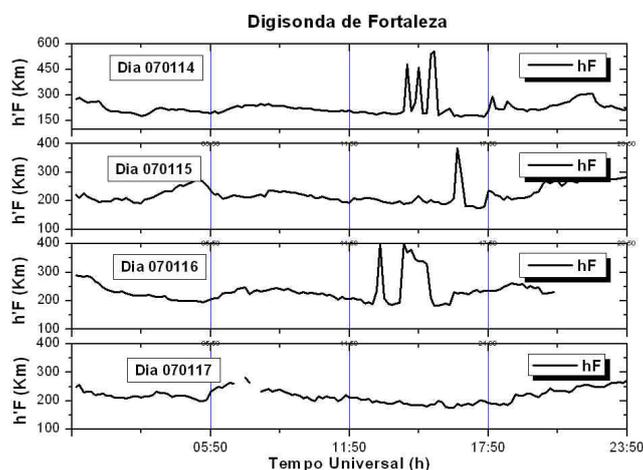


Figura 6.33: digisonda 0701(14-15-16-17)
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Janeiro

ocorrência de irregularidades nestes meses, com uma máxima de 80% de ocorrência de bolhas entre às 2200-0100 LT. Durante este intervalo de tempo local, bolhas ocorrem mais do 50% das noites entre aproximadamente meados de Outubro e meados de Fevereiro, como é mostrado no artigo de Abdu et al., 1992 [4].

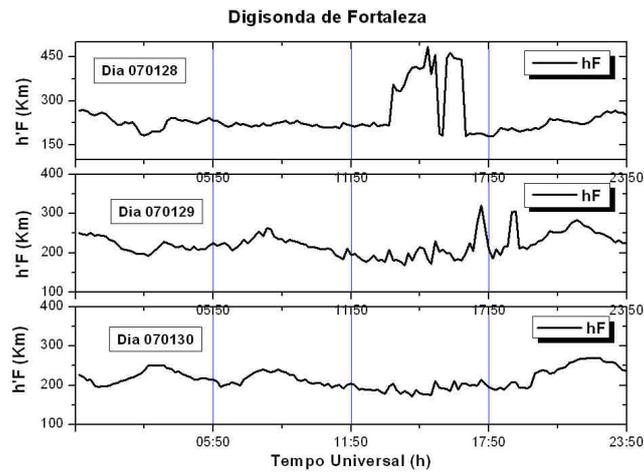


Figura 6.34: Digisonda 0701(28-29-30)
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Janeiro

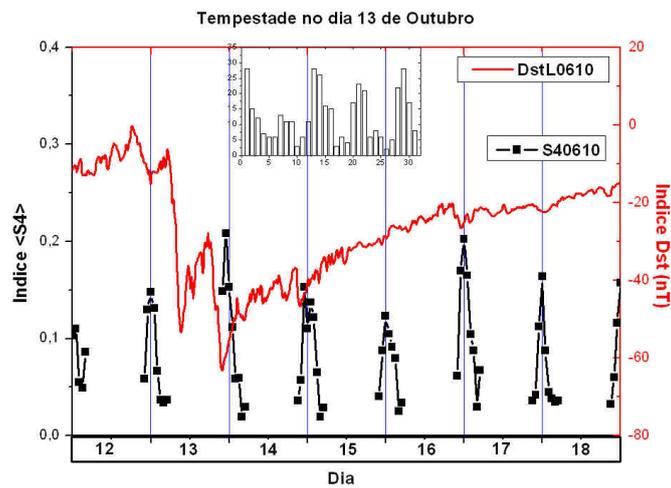


Figura 6.35: Dst-S4, Tempestade-1 Outubro 2006
 Dst-L (cada 10 minutos) e $\langle S4 \rangle$ horário vs hora, nos dias 12 até 18
 de Outubro, cobrindo as fases da tempestade.

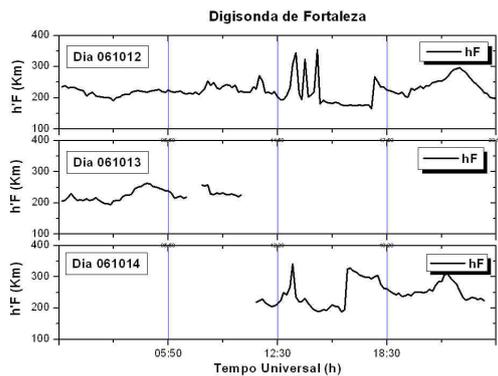


Figura 6.36: Digisonda 0610(12-13-14)
 Dados da Digisonda para a Tempestade de Novembro.

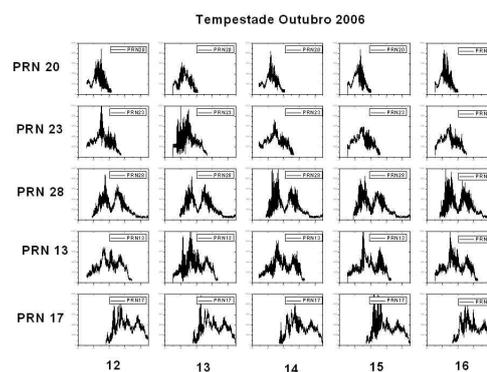


Figura 6.37: Sinais Outubro 14
 Sinais dos satélites Outubro 2006.

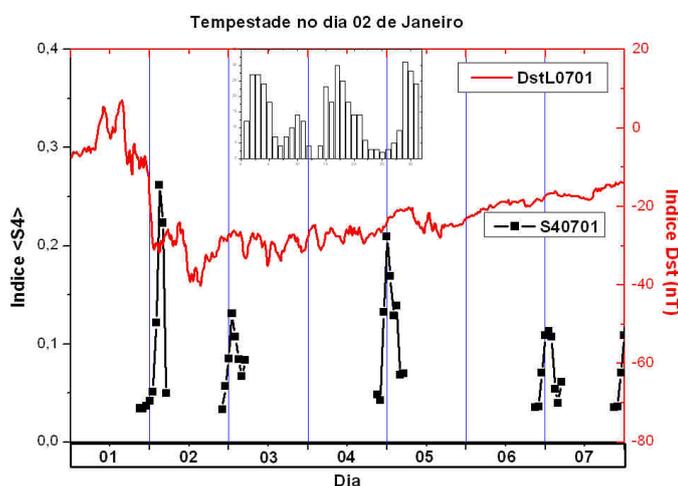


Figura 6.38: Tempestade Janeiro 02
Tempestade Janeiro 2007

Agora estamos pegando as tempestades que não estão de acordo com o método Bonelli2005, e para isto observamos o índice Dst ao longo dos meses de Outubro 2006 à Fevereiro 2007, e tomamos os dias de tempestades sem analisar para poder levantar informação, e escolher os dados da Digisonda, Fotômetro (dados do All Sky não temos para estas tempestades) e do GPS.

O fato de não ter colocado dados do All Sky não é necessariamente por não ter dados, se não porque o dia desejado para estudo teve presença de muitas nuvens, o que dificultou

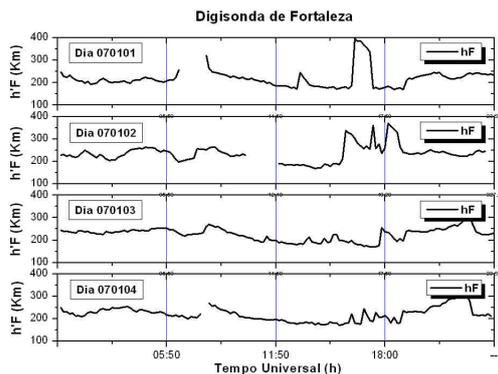


Figura 6.39: Digisonda 0701(01-02-03-04)
Dados da Digisonda para a Tempestade de Janeiro.

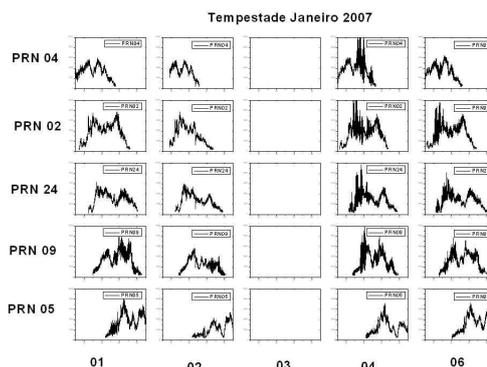


Figura 6.40: Sinais Janeiro 02
Sinais dos satélites Janeiro 2007.

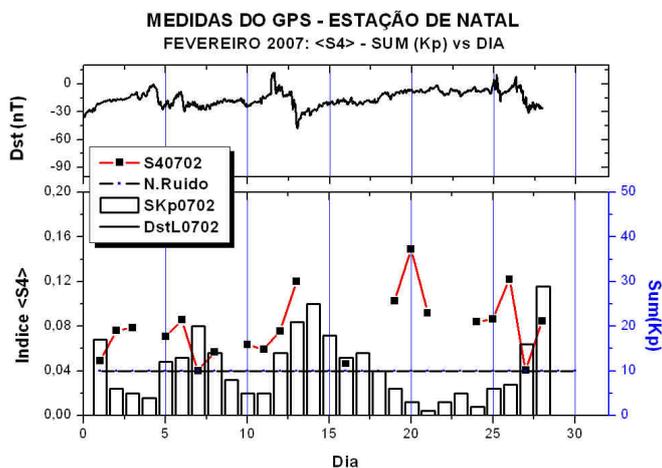


Figura 6.41: S4-Kp, Fevereiro 2007
Gráfico mostrando os índices $\langle S4 \rangle$ e $\Sigma(Kp)$ vs dia para o mês de Fevereiro 2007. Dias 13 e 14 com alto Kp.

a observação de bolhas.

Nossos gráficos de $h'F$ vs Tempo Universal, nos mostra a altura virtual da camada F, podendo-se ver o comportamento geral da ionosfera ao longo do dia. Entre às 2100-2200 hora (UT) pode-se ver uma elevação característica, que é o aumento pre-reversão da camada.

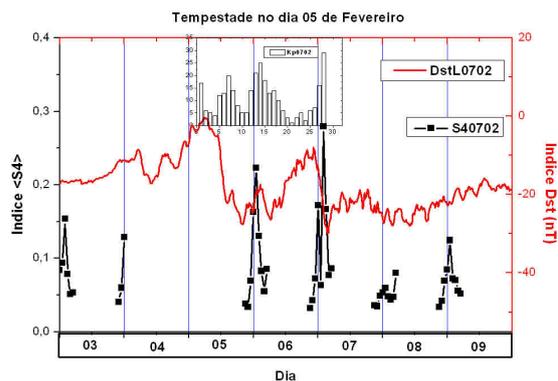


Figura 6.42: Tempestade Fevereiro 05
Tempestade Fevereiro 2007.

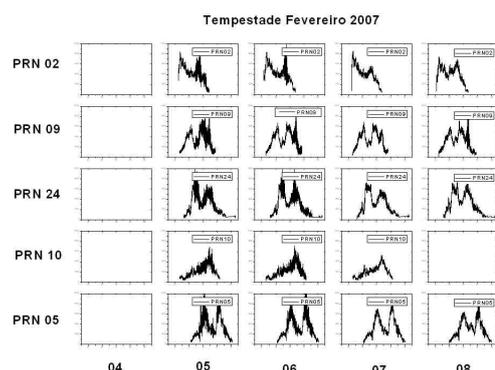


Figura 6.43: Sinais Fevereiro 05
Sinais dos satélites Fevereiro 2007.

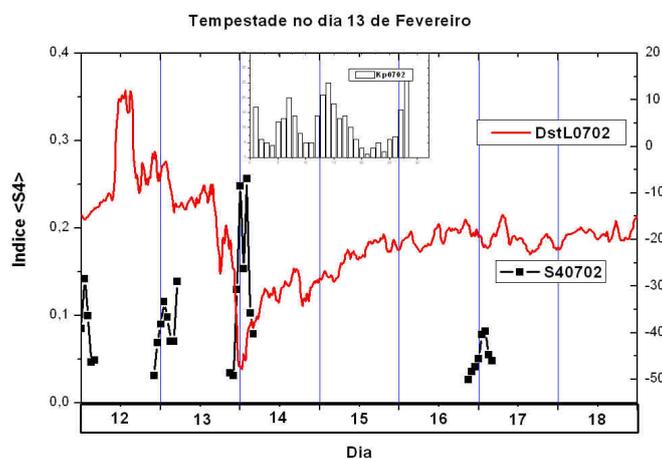


Figura 6.44: Tempestade Fevereiro 13
Tempestade Fevereiro 2007

Tempestade, Outubro-1 2006		
Dia	Σ Total	$\langle S4 \rangle$
12	11	0.095276
13	28	0.128587
14	26	0.10034
15	16	0.081635

Tab-out06(Temp. Outubro)

Tempestade, Janeiro-1 2006		
Dia	Σ Total	$\langle S4 \rangle$
01	12	0.043753
02	27	0.080245
03	27	0.123003
04	24	0.114329

Tab-jan06-a(Temp. Janeiro)

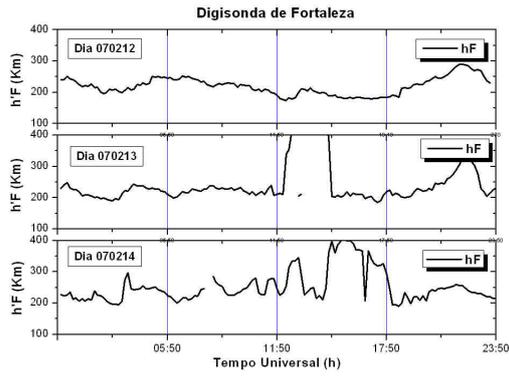


Figura 6.45: Digisonda 0702(12-13-14)
Dados da Digisonda para a Tempestade de Fevereiro.

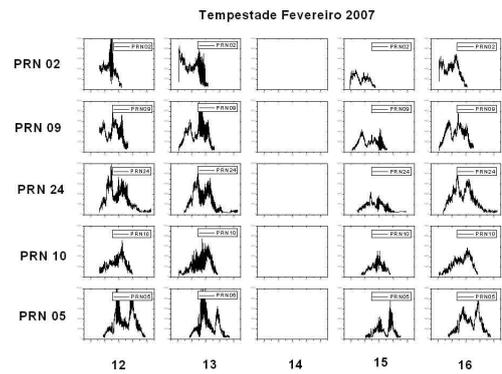


Figura 6.46: Sinais Fevereiro 13
Sinais dos satélites Fevereiro 2007.

Tempestade, Fevereiro-1 2007		
Dia	Σ Total	$\langle S4 \rangle$
04	04	—
05	12	0.070809
06	13	0.085663
07	20	0.040077

Tab-fev07a(Temp. Fevereiro)

Tempestade, Fevereiro-2 2007		
Dia	Σ Total de Kp	$\langle S4 \rangle$
12	14	0.075872
13	21	0.12041
14	25	—
15	18	—

Tab-fev07b(Temp. Fevereiro)

Tabela-não anticorrelação/(Tabela mostrando dias das tempestades que não apresentaram anticorrelação.)

Capítulo 7

Conclusões e Discussões

7.1 Discussão

Temos analisado mais de 45 dias distribuídos ao longo do período Outubro 2006 à Fevereiro 2007, quando se desenvolveram tempestades magnéticas de diferentes magnitudes, e os dados obtidos são do receptor de cintilação que registra a intensidade do sinal de GPS (L1) de Natal-RN, um Imageador All Sky vendo a emissão nightglow de OI 630nm e um multi-canal, multi-filtro, fotômetro zenite escolhendo também OI 630nm em São João do Cariri-PB, unindo também dados do sondador ionosférico digital localizado em Fortaleza-CE.

Tempestades - Anticorrelação

- A tempestade ocorrida nos dias 19-24 de outubro 2006 (figura 6.8), sendo um exemplo de tempestade fraca. O começo súbito desta é o dia 20 às 0933 horas (UT), com um Dst de 11.5nT, com uma fase principal que alcança seu máximo o dia 21 com um Dst de -27.3nT às 0143 horas (UT) e -27.6nT às 0723horas (UT), com um Kp variando de 3 à 4 no pôr-do-sol do dia 21. O dia da fase inicial o ΣKp de 17, enquanto que na fase principal ΣKp é de 23, e se observa um incremento

de atividade magnética. No dia 22 permanece a fase principal ativa, apresentando um Kp de 5 entre 0300-0600 UT, o que manteve o efeito da perturbação –ionosfera perturbada– por muitas horas.

O dia 19, às 1810UT, a deriva vertical ($\Delta hF/\Delta t$) $\vec{E} \times \vec{B}$ é de 33.5m/s, mantendo-se alto até 1900 horas (18.25m/s). Logo se inverte a velocidade às 2150 UT, pôr-do-sol local (aumento pré-inversão). Esta velocidade é uma condição suficiente para a produção de irregularidades devido à rápida subida da camada F (Anderson, 2004 [8]), pela entrada de campos elétricos produzindo aumento de cintilação no sinal.

O dia 20 temos um pequeno aumento na velocidade vertical de 22.1m/s às 1750horas(UT), ao pôr-do-sol local é de 14.1m/s. No dia 21 a velocidade flutua entre 2.7m/s (1930UT) e 2.4m/s (2050UT). E às 2220 horas a velocidade é nula. Este é um dia em que a velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ não favorece a produção de irregularidades. O índice de cintilação foi de 0.043.

Como resultado à diminuição em altura da camada F no pôr-do-sol, e à presença da fase principal da tempestade magnética durante o dia 21 e 22 é que isto leva a uma ionosfera sem irregularidades, devido à diminuição de ocorrência de bolhas, que atenua a cintilação do sinal GPS em comparação aos dias 20 e 19. Ingressando na categoria I de Aarons.

- Em Novembro, 09-14 (figura 6.9), 2006 uma tempestade é desenvolvida com um SC ¹ bem pronunciado o dia 09 com um Dst de 23.5nT às 1723UT (22.25m/s na deriva $\vec{E} \times \vec{B}$) com aumento de Kp de 3 até 4 nesta hora deixando a ionosfera perturbada, que é observada no índice S4 para este dia de 0.7. E a h'f às 2100 UT esteve praticamente no pico de ionização, 250 Km.

O dia 10, umas 7 horas depois do SC, o Dst alcança um máximo de -72.7nT, um Kp oscilando entre 6 e 5 durante o dia. O Dst tem varias entradas com valores de -46.1nT (0403 UT), -46.9nT (0843 UT), e às 2200UT o Dst esta em -31.6nT, como podemos observar, a fase principal se desenvolveu ao longo do dia,

¹O SSC (Sudden Storm Commencement) é uma conseqüência do aumento da pressão dinâmica do vento solar na Magnetosfera no lado diurno e caracteriza o início da fase inicial de uma tempestade magnética.

e a $h'F$ permaneceu abaixo de 250Km neste dia. Às 1930 UT a deriva teve seu máximo que foi 11.95m/s, e no pôr-do-sol local (2130 UT) de 5.55m/s, o que não propicia a formação de irregularidades. Conclui-se que esta tempestade começou apresentando um comportamento para formar parte da categoria III, mas segundo seu desenvolvimento passou a ser parte da categoria I, com um índice S4 de 0.037 neste dia, o que é uma atenuação em comparação à cintilação da noite anterior (0.07) e da seguinte (0.1).

- Na tempestade de novembro 22-25 (figura 6.10) se apresenta sub-tempestade magnética que similarmente à última tempestade magnética estudada não é fácil prever o comportamento da ionosfera, e muito menos lhe caracterizar. O SC de -4.0nT (1313 UT) o dia 22, e nessa hora em 10 minutos $h'F$ passa de 200 Km para 440 Km, e logo cai para 185 Km. Este grande levantamento em Km se entende que é devido ao aparecimento da camada E_s , prejudicando os dados do $h'F$. Por essa razão são tirados estes pontos no cálculo da velocidade vertical. E o Kp se manteve entre 0 e 1.

O dia 23 se alcança a fase principal com Dst de -42.8nT (1153 UT, 16.25m/s na deriva vertical), uma atividade (Kp) entre 4 e 5 nessa hora, e segundo o comportamento de $h'F$ que se mantém (depois do pôr-do-sol) abaixo de 250 Km, com uma velocidade de 7.58m/s às 1840 UT, e no pôr-do-sol local (2140 UT) é de 7.3m/s. Então não favorece à formação de irregularidades; mas temos presença de bolha segundo o fotômetro, sendo que ainda é necessário conhecer a densidade desta (Abdu et al., 1992 [4]). Por conseguinte o índice S4 é de 0.04, que experimenta uma atenuação em comparação ao dia anterior (0.09) e nos dias seguintes (0.09 dia 24, e 0.126 dia 25). Pela altura da camada F e a hora de máximo Dst é que esta tempestade magnética se encaixa no critério I de Aarons.

- Não contamos com muita informação para a análise da tempestade de 05-09 de Dezembro (figura 6.11), e só com dados que geram o gráfico do Dst, Kp, e S4, podemos inferir a categoria à que pertence. O SC de -2.5nT (1423 UT) no dia 05, Kp de 0 durante a maior parte do dia, e S4 de 0.14. A fase principal alcança um máximo de -50.8nT (1243 UT) e -52.8nT (2033 UT), com uma atividade magnética

entre 5 e 3 neste dia06, conseqüentemente pela hora de desenvolvimento da fase principal se encaixa na categoria I, o que se corrobora com um índice S4 de 0.08 que é menor que o dia prévio (0.138) e o próximo (0.1).

- Uma tempestade intensa se apresenta no período 14-17 de Dezembro 2006 (figura 6.12). Um SC de -20.4nT (2203 UT, dia 14) com uma elevação de h'F (300 Km), e de imediato a fase principal se desenvolve alcançando um máximo de -105.8 nT (0813 UT, dia 15) o que produz um pico no h'F de 402 Km, e diminuindo rapidamente, permanecendo abaixo de 210 Km durante o dia. A fase de recuperação se apresenta de maneira imediata também. Como a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ não foi alta, oscilando entre 10.8m/s (1910 UT) e 2.5m/s (2140 UT) no pôr-do-sol local, então teremos uma noite com atenuação de cintilação. E esta tempestade se encaixa na categoria I, pelo fato de velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ ter sido baixa, e porque a hora da fase principal é durante horas de dia.
- Mês de janeiro (figura 6.13), o SC é de 5.2nT entre 1803 (dia 14) à 0803 UT (dia 15), e imediatamente se desenvolve a fase principal com -35.4nT (1443 UT) de intensidade no dia 15, experimentando uma perturbação no h'F às 1600 UT, e se assume que seja novamente a E esporádica. Sendo esta considerada uma tempestade magnética fraca, temos atenuação de cintilação durante a noite, isto já que a altura da camada F foi perturbada durante horas de dia, o que produz uma alteração no desenvolvimento normal da camada, tendo esta camada F um levantamento com uma velocidade abaixo do limiar (<22m/s definido em Anderson, 2004) no pôr-do-sol, com 19.25m/s às 2010UT e 10.85m/s no pôr-do-sol. E encaixando-se perfeitamente na C-I de Aarons.

Se prestamos atenção no dia 17, veremos que acontece uma penetração de campos elétricos (o que assumimos) que perturba o comportamento da corrente de anel, com um Dst (como resposta) de -40nT às 2123 UT. Podendo ser devido à uma perturbação devido ao ingresso de ondas de gravidade vindo dos pólos ou uma sub-tempestade, o que levou a uma diminuição na densidade das irregularidades (afirmamos a existência de irregularidades porque o Fotômetro mostra sua presença) que produziu uma diminuição no valor do S4. A velocidade de deriva máxima foi

às 1850 UT de 19m/s, e no pôr-do-sol local de 10m/s em média. O comportamento do h'F foi como de um dia sem perturbações. No gráfico dos PRNs do dia 17 se observa também esta grande diminuição na amplitude do sinal (WBP), como um sinal mais fraco (diminuição de cintilação).

- A tempestade magnética do dia 29 de Janeiro (figura 6.14) está classificada como uma tempestade moderada. O SC inicia-se as 0613 UT com 11.5 nT. Observando-se algumas perturbações que surgem na altura da camada F (1840 UT), isto pode ser devido à penetração súbita que altera a direção leste-oeste, produzindo um $\langle S4 \rangle$ médio nessa hora de 0.02, que é um valor muito fraco no índice de cintilação. Sendo que as 1800 LT a altura da camada eleva-se e continua a cair, mas produziu um $\langle S4 \rangle$ médio de 0.02 nessa hora.

A fase principal se desenvolve com dois picos, de -66.2 nT (1513 UT) e -69.5 nT (1923 UT), e como estão nas horas de dia, e segundo a C-I, temos atenuação de cintilação com um $\langle S4 \rangle$ médio para esta noite de 0.04.

Tempestades - Não Anticorrelação

- Tempestade de Outubro (figura 6.35), o dia 12 temos o início do SC com -0.2nT às 1803 UT ($K_p=2$), no dia 13 se apresenta a fase principal desta tempestade moderada. Com -53.4nT às 0913 UT ($K_p=4$) e -63.3 às 2143 UT ($K_p=5$), não temos dados de h'F, mas devido ao primeiro ingresso na corrente de anel durante horas de dia (0613 UT) e a altura da camada F estar elevada, o que formaria uma tempestade de categoria I, mas logo no pôr-do-sol local temos o ingresso de uma sub-tempestade, o que faz com que a camada se levante justo quando ela normalmente se levanta (em altura). Então esta seria uma noite com irregularidades da mesma forma que um dia normal, sem perturbações. O que se encaixa na categoria III. Observamos no sinal dos satélites que o comportamento do sinal é praticamente o mesmo ao dia 12 e 14, mas com um ligeiro aumento (em flutuação) nos PRN 23 e 20.
- Tempestade magnética fraca, em Janeiro 2007 (figura 6.38). Apresenta uma fase de recuperação alongada em vários dias. A fase inicial é de 7.1 nT às 1533 UT do

dia primeiro. Fase principal tem presença de sub-tempestade, um Dst de -31.7nT às 0243 UT (dia 02) e -40.2nT às 1523 UT do mesmo dia.

A primeira excursão já tem categoria de tempestade e a hora desta determina que a tempestade pertence à categoria II, mas logo se torna difícil de interpretar com o ingresso da sub-tempestade, de -40.2nT (1523 UT). Temos preferido deixar esta tempestade fora das categorias de Aarons por não contar com suficiente argumento. Dados da Digissonda, e dos satélites são colocados para o bom entendimento do leitor. No pôr-do-sol a camada teve uma deriva abaixo de 6m/s .

- Uma tempestade fraca é analisada. No dia 05 de Fevereiro (figura ??) durante as primeiras horas o índice Kp se manteve em 1, e o SC alcança -0.3nT (0543 UT). A fase principal com um Dst de -22.2nT às 1413 UT (Kp=2), logo temos uma complexa instabilidade com o -27.6nT alcançado às 2003 UT, o que produziria irregularidades como o que se mostra na categoria III, tal como aconteceu. Logo o dia 06 temos um Dst de -8nT (2213 UT), com uma excursão do Dst de -30nT às 0333UT do dia 07. Isto torna esta tempestade complexa. A fase de recuperação se estende praticamente ao longo de três (03) dias, o que se pode ver no gráfico dos satélites (PRNs). Os dias 07 e 08, as flutuações no sinal são menores que os dias 05 e 06 em todos os satélites mostrados. Com os dados do PRN10 no dia 08 com problemas, e o dia 04 foi perdido o .FSL.
- Tempestade do dia 13 de Fevereiro (figura 8.4) teve um desenvolvimento em forma de degrau (complexo). O SC de 12nT às 1313 UT (dia 12) com Kp de 3, logo -10nT às 1723 UT (dia 12), caindo a -14.2nT às 0353 UT (dia 13) e Kp de 2. Durante estas excursões no Dst, a altura de $h'F$ permanece como um dia sem perturbação. A fase principal tem o desenvolvimento às 0023 UT com -47.8nT do dia 14, um Kp que passa de 5 para 4.

A hora do máximo Dst é às 0023 UT, produzindo no mesmo momento altos valores no índice S4 horário. Às 2300 UT foi de 0.13 ($< S4 >$), às 0000 UT foi de 0.25, mantendo-se até 0200 UT (dia 14) com estes altos valores.

Durante o dia (dia 13) tivemos muita instabilidade, mas com pouca força como para

perturbar a altura da camada, o que não dá para ver dessa forma no gráfico $h'F$ do dia 070213, ao redor das 1200 UT. Às 0000 UT já devemos ter irregularidades com alta densidade, porque só isso esclareceria os altos valores no índice S4, com um aumento de cintilação em comparação aos dias prévios e durante a fase de recuperação (ver dias 15 e 16 no gráfico de satélites). Podendo esta tempestade entrar na categoria II, assim como ficar fora das categorias, mas pela ambiguidade no raciocínio colocamos na categoria II. Informação é apresentada para que o leitor tenha um critério.

Geral

- Se define forte uma tempestade magnética com um $\Sigma Kp > 30$ [Bonelli (2005) [23]].
- Durante eventos de tempestades sobre densidade de elétrons e irregularidades ionosféricas, a ionosfera apresenta uma variedade de efeitos, os quais podem depender da estação, latitude geográfica, tempo local e o tempo de início da tempestade.

Efeitos dinâmicos podem influenciar ainda mais a ionosfera durante estes eventos como a penetração direta de campos elétricos e a posterior entrada de campos elétricos de altas latitudes devido ao dínamo perturbado.

- O estudo destas perturbações geradas pelas tempestades magnéticas (produzindo tempestades ionosféricas) é de importância prática devido as telecomunicações satelitais, já que são severamente degradadas durante algumas das fases destas perturbações.
- Efeito de perturbações sobre cintilação ionosférica em baixas e latitudes equatoriais deram como resultado, que com incremento na atividade magnética, a probabilidade de ocorrência de cintilação sobre sinais de satélite incrementa durante o período após meia noite em todas as longitudes, enquanto que a ocorrência pré-meia noite depende tanto da estação como também da longitude [Aarons et al.,1980 [3]; Rastogi et al., 1981 [?]].
- Trabalhos como de Prasad et al., 2005 [60] falam de uma inibição de irregularidades,

mas se isto acontece, então deveríamos poder observar bolhas no céu com o fotômetro. E durante as tempestades em estudo sempre tivemos a observação de presença de bolhas observadas no OI 630 nm com o fotômetro e all sky (só com lua nova, e sem nuvens). O que significa que não há condição para dizer que há uma inibição de irregularidades, já que o valor do índice S4 se vê unicamente diminuído, mas não some por completo; isto na categoria I. O que neste trabalho colocamos como atenuação de cintilação.

- Não é unicamente a hora de início da tempestade que fará com que a tempestade encaixe em alguma categoria de Aarons, temos que prestar atenção no desenvolvimento da altura de $h'F$, já que ele responde ao ingresso de campos elétricos que perturba o dínamo F.
- Já Prasad et al., 2005 [60] mostra, depois de estudar umas 60 tempestades magnéticas do tipo SC, que o 71% destas cumpre a categoria I de Aarons (grande excursão de Dst acontecendo antes das horas do pôr-do-sol), seguido por um 69% na categoria II e um 62% na categoria III. Mas com um remanescente de 30 a 40% de casos que não satisfazem estas categorias.
- Banola et al., (2001) [11] estudou o efeito de atividade geomagnética sobre cintilação VHF obtido em uma estação equatorial, Trivandrum e uma estação de baixa latitude, Mumbai durante alta atividade solar no período de 1989-91 com umas 77 tempestades utilizando o critério de Aarons. E reportou que uma porcentagem alta (de 70%) de tempestades satisfaz o critério de Aarons quando uma grande entrada do Dst (corrente de anel) acontece durante meia noite e pós-meia noite (categoria II), comparado às outras duas categorias (I e III) na região Índia durante este período, mas perto do 40% de casos não satisfazem a geração ou inibição de atividade nas outras duas categorias (I e III).
- Aarons (1977) cita que Koster (1972) já tinha mostrado a existência de uma correlação negativa entre o índice magnético (Kp) e cintilação (SI), em presença de fortes tempestades magnéticas.
- Se apresenta a anti-correlação de Kp e S4. E é necessária ainda, dados da camada

F ($h'F$). Assim poderemos deduzir quando a camada F se eleva, em presença de tempestade magnética teremos as condições para a formação de instabilidades e presença de cintilação, que poderemos comparar com o K_p . Agora, se a tempestade se desenvolve de dia, ou quando a camada F esta em presença da deriva vertical negativa, então não favorecerá a formação de instabilidades. Sendo então inibidas, e neste caso não necessariamente estará errada a relação de anti-correlação entre K_p e S4. Poderemos também colocar com a tabela de Birsa(2002).

7.2 Conclusão

O importante objetivo deste trabalho foi poder fazer as previsões de cintilação observando dados de índices magnéticos (obtidos da internet) e o índice de cintilação, obtido na estação de Natal; partindo do método de Bonelli2005.

Foi possível fazer estas previsões, e enquanto estávamos desenvolvendo o método percebemos que chegávamos ao resultado já obtido por Aarons (categoria I), então reanalizando os dados e também os que não foram tomados em conta (limitação do método), encontrando tempestades magnéticas que correspondiam às outras duas categorias de Aarons.

Tendo uma tempestade que não encaixa nestas categorias, e este resultado concorda com um trabalho prévio de Birsa, que também a tempestade analisada por ele discordou das categorias.

Logo tentando avançar um pouquinho mais nas análises, tomamos os dados da digissonda ($h'F$), e obtivemos a velocidade de deriva vertical $(\Delta hF/\Delta t)\vec{E} \times \vec{B}$. Já que anteriormente (2004) foi desenvolvido um modelo na estação de Jicamarca que atualmente serve para fazer previsão de cintilação com o método desenvolvido por Anderson et al., 2004, no qual utiliza justamente a velocidade de deriva vertical. Nós utilizamos este método e podemos ter um suporte a mais que está de acordo com o resultado obtido no método de Bonelli2005 aqui aplicado.

Os estudos futuros têm que ser focalizados em estudar as mudanças do campo elétrico local que se acredita, que seja fortemente responsável pela cintilação ionosférica em latitudes equatorial e baixas.

A mais, estudo morfológico geral baseado em Kp também indica que cintilação tende a decrescer com um alto Kp nas primeiras horas da noite [Groves *et al.*, 1997 [41]].

Podem existir bolhas ionosféricas, mas se sua densidade é baixa então não causaria cintilação na faixa de Gigahertz [Sunanda et al., 2001 [15]].

Resultados como os obtidos por Sunanda et al., 2001 [15] embora limitados a só duas tempestades de equinócio, mostra que as irregularidades equatoriais podem ser aumentadas ou inibidas, dependendo o UT da intensificação da tempestade e duração

da fase principal.

Na fase de recuperação o nível de cintilações vai se recuperando, o que representa um aumento do índice de cintilações em comparação ao dia de tempestade. O nível que se alcança em geral é o mesmo de dias sem perturbação. Isto na categoria I.

Foi definido como magneticamente quieto quando $Kp < 3$, e magneticamente perturbado com $Kp > 3$. Assim como também foi feito em Groves et al, 1997.

Nem todas as tempestades magnéticas apresentam uma forma ideal desejada, tendo algumas a presença de subtempestades que dificultam o estudo, e mesmo a determinação do início e final de uma fase.

Com dados adquiridos durante meses como abril, maio e outros temos a presença de cintilações então isto nos leva a dizer que cintilações podem acontecer frequentemente na presença de tempestades magnéticas em qualquer estação, com ocorrência máxima nos equinócios e menores em outras estações do ano.

Cintilações se apresentam em todos os satélites visíveis no SCINTMON em 30° de elevação acima do horizonte.

Não foi utilizado diretamente o índice Dst fornecido pelas páginas de Kyoto, sendo que Temerin e Li mostram um modelo onde o Dst de Kyoto converge ao novo Dst, Dst-L. Então para fins de previsão do clima espacial é mais útil um Dst que não mude com o tempo (já que os dados Dst de Kyoto ainda estaram passando por processamento para que logo de uns meses sejam finalmente fixos.). Por esta razão utilizamos durante toda esta dissertação o Dst-L.

Alguns autores utilizaram a palavra “suprimir” (Koster, 1972 [?]), que pode significar que as irregularidades uma vez formadas podem desaparecer, ser eliminadas. Logo temos a palavra “inibir” (Aarons, 1991 [1]), parecendo mais com o fato que não se formarão irregularidades. E, nós utilizamos o termo “atenuar”, devido ao fato que praticamente sempre temos irregularidades, que produzem uma variação na amplitude do sinal, mesmo sendo baixo, e é uma diminuição neste valor, em comparação com os dias prévios e posterior, no S4.

Caraterística individual de cada tempestade, o nível de Dst alcançado, e a soma de outras forças como ventos, penetração subida, dínamo perturbado devem ser tomados

em consideração se queremos poder prever a ocorrência de irregularidades, e o nível de cintilação.

Com o método Bonelli2005 encontramos que as tempestades que cumprem esta condição farão parte da primeira categoria de Aarons. E isto partindo de uma simples comparação entre valores de Kp. Sendo levada em conta a soma de Kp (para o dia em estudo) até o pôr-do-sol porque a necessidade é poder prever o que aconteceria nessa mesma noite para fins de previsão.

Quando temos presença da fase inicial (SC) de tempestade magnética que afeta de forma imediata a corrente de anel, observamos que apareceu uns picos no h'F, que dão uma velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ (se for considerado no cálculo) acima de 40m/s. Este valor está acima do valor médio da deriva, então é considerado como a intromissão da camada E esporádica, e retirado ao momento de calcular a velocidade.

A interpretação das tempestades mediante a velocidade de deriva vertical nos leva a precisar também da densidade das irregularidades apresentadas, já que o índice de cintilação assim como o de refração é proporcional à densidade do meio (e da frequência).

A velocidade limiar apresentada por Anderson et al.,(2004) não está correspondendo com a presença de irregularidades, onde deveria estar acima de 20m/s. Isto pode ser explicado em base a que estamos durante o mínimo ciclo solar, e que são poucas as tempestades observadas que estão fora do método Bonelli2005 que corresponde à atenuação.

Este estudo dia-a-dia parece ser um método ideal para poder encontrar as variações que nos levariam a fazer uma previsão da intensidade do índice de cintilação, com ajuda de dados do GPS, Digissonda, Imageador, e parece ser necessário dados de densidade das irregularidades também.

Apresentamos as tabelas com um resumo do resultado do estudo das tempestades neste período de estudo. Temos maior presença de tempestades que cumpriram a categoria I de Aarons, seguido pela categoria III, e por último a II.

Tempestades Magnéticas 2006 - 2007						
Mês	Dias Tempest.	F. Ini. (Dst)	F. Prin. (Dst)	F. Recup. (Dst)	Resultado	Categ.
Outub	[12-18]	12	13	[14-17]	Não antic.	C-III
	[19-25]	20	21	[23-25]	Anticorrelação	C-I
Novemb	[09-15]	09	10	[11-14]	Anticorrelação	C-I
	[21-27]	22	23	[25-27]	Anticorrelação	C-I
Dezemb	[05-10]	05	06	[07-10]	Anticorrelação	C-I
	[14-19]	14	15	[16-18]	Anticorrelação	C-I
Jane	[01-07]	01	02	[03-06]		nenhum
	[14-20]	14	15	[16-19]	Anticorrelação	C-I
	[27-31]	28	29	[30-31]	Anticorrelação	C-I
Fever	[03-09]	05	05	[07-09]	Não antic.	C-III
	[12-18]	12	13	[14-17]	Não antic.	C-II

Tempestades-resumo (Tabela mostrando o resultado do estudo das tempestades magnéticas acontecidas

no período de Outubro 2006 à Fevereiro 207)

Índices das Tempestades Magnéticas 2006 - 2007								
Mês	Fase Inicial	$\langle S4 \rangle$	Kp	Dia	$\langle S4 \rangle$	Kp	Dia	Fase Principal
Outub	[12-18]	0.095276	11	12	0.128587	28	13	[14-17]
	[19-25]	0.104206	17	20	0.043817	23	21	[23-25]
Novemb	[09-15]	0.074429	12	09	0.037411	33	10	[11-14]
	[21-27]	0.098236	08	22	0.040662	24	23	[25-27]
Dezemb	[05-10]	0.137953	04	05	0.086713	31	06	[07-10]
	[14-19]	0.071758	34	14	0.040476	47	15	[16-18]
Jane	[01-07]	0.043753	12	01	0.080245	27	02	[03-06]
	[14-20]	0.072633	04	14	0.040399	23	15	[16-19]
	[27-31]	–	09	28	0.043504	31	29	[30-31]
Fever	[03-09]		12	05	0.070809	12	05	[07-09]
	[12-18]	0.075872	14	12	0.12041	21	13	[14-17]

Tempestades-índices (Tabela mostrando um resumo das tempestades magnéticas ocorridas no período de Outubro 2006 à Fevereiro 2007. A metade da tabela são informações referentes à fase inicial, e a outra metade à fase principal.)

7.3 Perspectivas

- Estudar os efeitos de tempestades magnéticas sobre a ocorrência ou inibição de cintilação ionosférica em sinal UHF (em pequenas faixas), para as fases das tempestades.
- Falta fazer uma análise para cada 3 horas do índice Kp vs S4 horário. Isto porque parece que há uma certa dependência destes dois índices no desenvolvimento das fases da tempestade. Sendo primeiro positiva e a seguir negativa, isto entre as 1800 LT.
- Necessidade de dados de outras estações para este período em estudo para comprovar a anticorrelação nas estações de baixas latitudes magnéticas.

- Já foi demonstrado que as tempestades que cumprem a condição de Bonelli2005 [23] apresentam anticorrelação para máximo solar e para mínimo solar na estação de Natal, seria interessante poder comprovar isto para outras estações no território sulamericano, sob a anomalia equatorial.
- Agora, é difícil de estudar os efeitos de tempestades magnéticas só representando com o Dst, devido á presença e superposição de tempestades e sub-tempestades magnéticas. Para conseguir uma boa previsão de presença ou não de cintilações é necessário fazer mais estudos até mesmo em outras frequências durante as fases das tempestades no região equatorial para compreender melhor este comportamento das sub-tempestades magnéticas. E com a finalidade de poder prever a intensidade das cintilações (índice S4) é preciso fazer um modelo de obtenção do índice para esta estação.

Capítulo 8

APÊNDICE

8.1 Antena GPS da UFRN

GPS ANTENA

Active GPS Patch Antenna Model No: ANP-C-114

Tempestades Magnéticas, Novembro 2006- Janeiro 2007	
Fontes	Efeitos
Frequency:	<i>1570 +/- 5 Mhz</i>
Polarization:	Right Hand Circular (RHCP)
Input Connector:	SMAf, TNCf, pigtail
Operating Temperature:	<i>-40°C to + 85°C</i>
Weight:	<i>< 100grams</i>
Size:	<i>3.0diam., 0.66high</i>
Gain:	<i>26dB</i>

Antena GPS Características principais da Antena GPS da UFRN.

8.2 Erros no sinal

Fontes e efeitos dos erros no GPS	
Fontes	Efeitos
Satélite	Erro orbital Erro no relógio do satélite Atraso instrumental do satélite
Ionosférico - Troposférico	Multicaminho Perdas de ciclo Atraso do código e avanço da fase Deslocamento Doppler Cintilação na fase e amplitude do sinal
Receptor	Erro no relógio do receptor Centro de fase da Antena Atraso instrumental do Receptor Ruido do receptor

Tabela de Erros na sinal *Principais fontes de erros e seus efeitos no sinal GPS. Fonte: Monico 2000 [56]*

8.3 Tempestades Magnéticas

Caracterização feito por Gonzalez et al, 1994 [40]

Tempestades Magnéticas,	
Intensidade Magnética	Efeitos (nT)
Intensa	100 nT e 250 nT
Moderada	50 nT e 100 nT
Fraca	30 nT e 50 nT

Intensidade de Tempestade Magnética. *Caracterização das tempestades magnéticas pelo Dst.*

8.4 Luminescência Atmosférica

Luminescência Atmosférica são emissões usualmente muito mais fracas que as auroras, causadas por decaimento dos constituintes atmosféricos. Ocorrem tanto do lado diurno como do lado noturno da atmosfera superior da Terra.

A luminescência atmosférica é definida por Pimenta(2002) [59] como uma radiação de natureza eletromagnética, tênue, amorfa e constante, cuja emissão é proveniente de átomos e moléculas excitadas existentes na atmosfera, principalmente nas altitudes entre 80Km e 400Km.

Na tabela 8.4 temos as emissões noturnas de luminescência atmosférica da região F mais estudadas, suas intensidades típicas e comprimentos de onda respectivos.

Emissão de Luminescência Atmosférica			
Emissão atmosférica	Intensidade típica (R)	Comprimento de onda (nm)	Altura da camada de emissão (Km)
OI 557,7 nm	60	557,7	250 - 300
OI 630,0 nm	300	630,0	250 - 300
OI 777,4 nm	20	777,4	300 - 400

Tab-luminescencia. *Tabela das principais emissões atmosféricas*

As características de cada emissão atmosférica (linha verde, vermelha, e OI 777,4), assim como mecanismos de recombinação, e outros podem ser encontrados com ampla explicação na Tese de Pimenta(2002) [59].

Para a investigação de flutuações nas intensidades das emissões (variabilidade temporal) utiliza-se a fotometria em solo [Medeiros(2001), Pimenta(2002)], sendo que as observações óticas são efetuadas no solo, a bordo de foguetes e com satélites, dependendo do objetivo da pesquisa.

Através da luminescência atmosférica podemos estudar:

- Os processos químicos, iônicos e dinâmicos que regem a distribuição vertical dos vários constituintes atmosféricos.

- Processos de excitação que geram emissões óticas.
- A geração e propagação de irregularidades no plasma da região F da ionosfera noturna.
- Os processos ligados à deposição de partículas neutras energéticas na alta atmosfera.
- O acoplamento entre a termosfera e ionosfera.
- As ondas atmosféricas.

8.5 Observação de bolhas no Imageador All Sky

Gráficos obtidos na estação de São João de Cariri, com o Imageador All Sky. Não são dados completos para todos os dias que involucram o desenvolvimento das fases da tempestade magnética, isto porque a condição para observar estas bolhas é que precisa-se de dias sem nuvens, e com lua nova.

Outubro 2006:

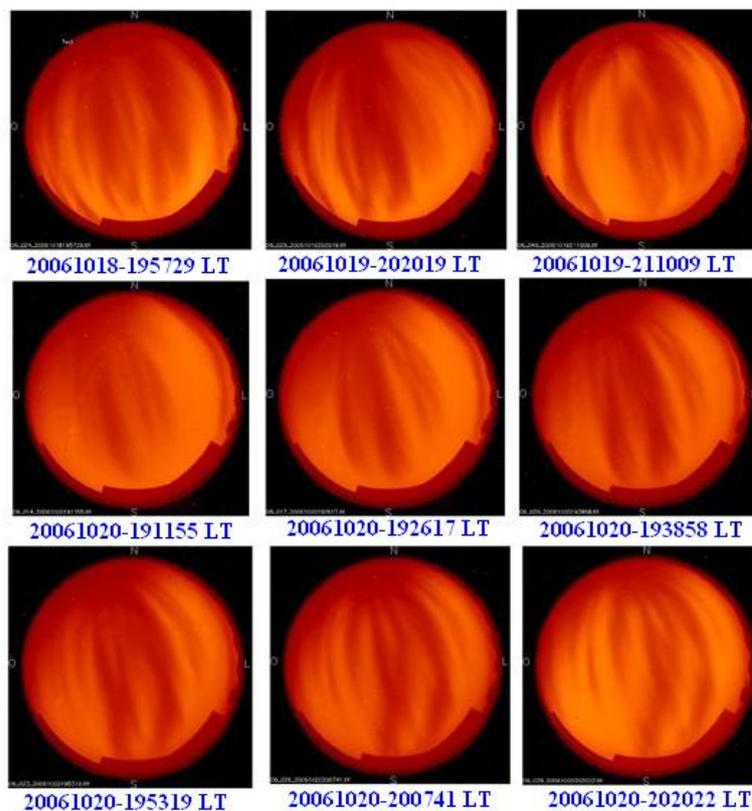


Figura 8.1: Bolhas outubro 2006

Bolhas observadas com o imageador All Sky, para o mês de Outubro 2006. Apresentando bolhas nos dias 18, 19 e 20.

Novembro 2006:

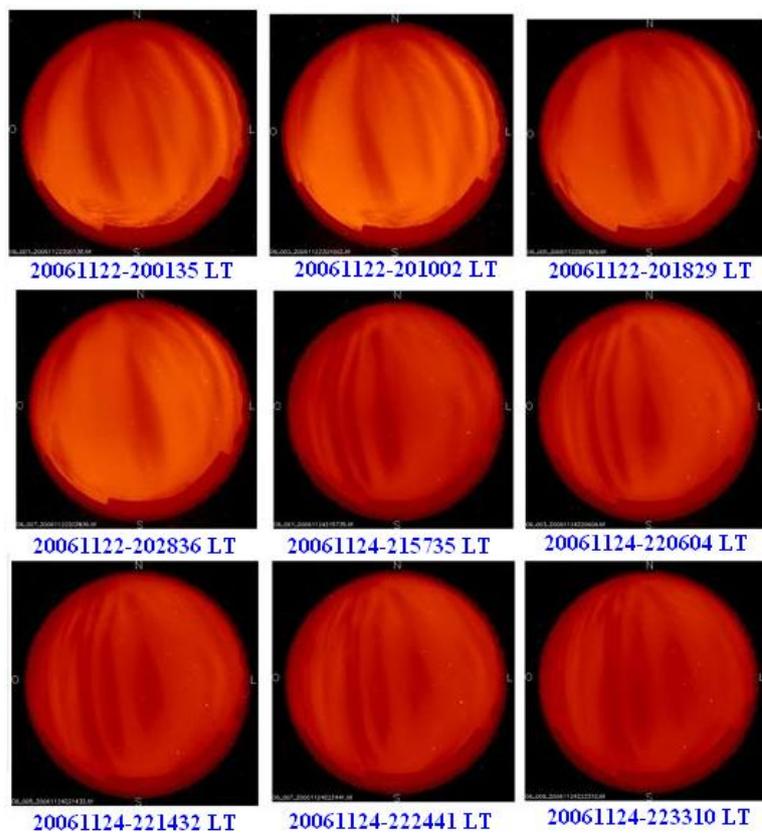


Figura 8.2: Bolhas novembro 2006

Bolhas observadas com o imageador All Sky, para o mês de novembro 2006. Apresentando bolhas nos dias 22 e 24.

Dezembro 2006:

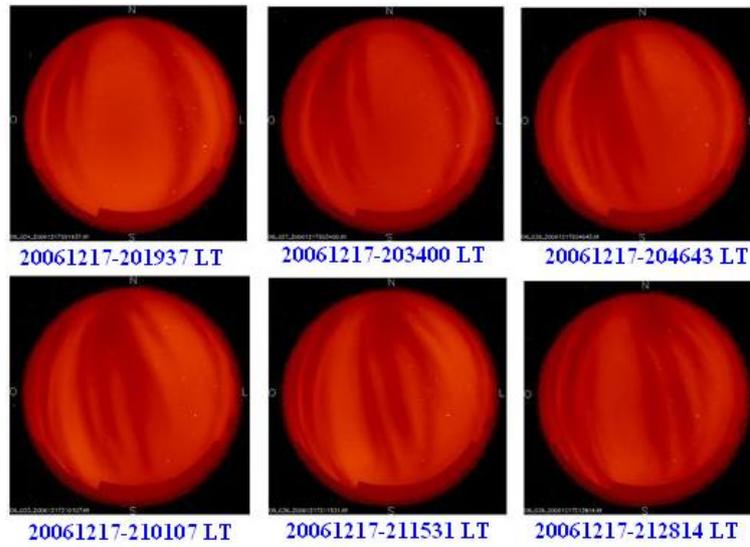


Figura 8.3: Bolhas dezembro 2006

Bolhas observadas com o imageador All Sky, para o mês de Outubro 2006. Apresentando bolhas do dia 17.

Janeiro 2007:

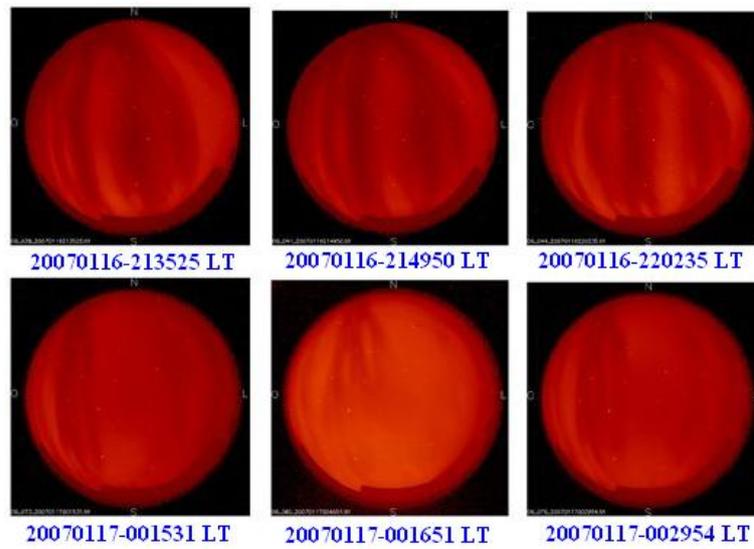
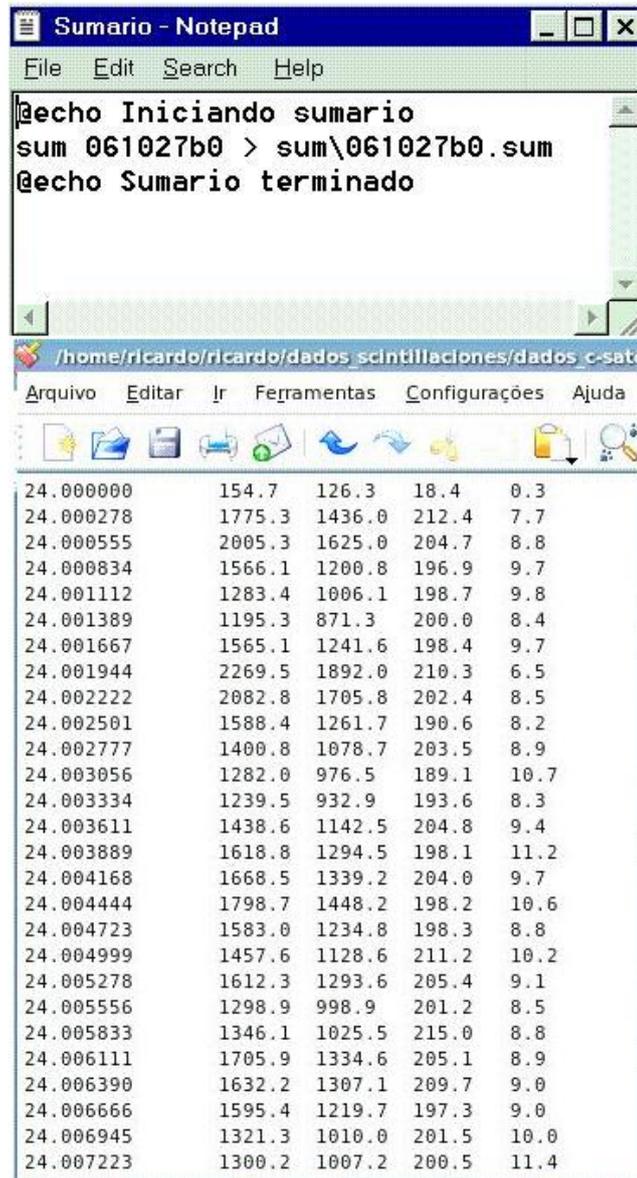


Figura 8.4: Bolhas janeiro 2007

Bolhas observadas com o imageador All Sky, para o mês de Janeiro 2007. Apresentando bolhas nos dias 16 e 17.

8.6 Procedimento, instruções do receptor GPS



```
Sumario - Notepad
File Edit Search Help
@echo Iniciando sumario
sum 061027b0 > sum\061027b0.sum
@echo Sumario terminado

/home/ricardo/ricardo/dados_scintillaciones/dados_c-sate
Arquivo Editar Ir Ferramentas Configurações Ajuda

24.000000    154.7   126.3   18.4    0.3
24.000278    1775.3  1436.0  212.4   7.7
24.000555    2005.3  1625.0  204.7   8.8
24.000834    1566.1  1200.8  196.9   9.7
24.001112    1283.4  1006.1  198.7   9.8
24.001389    1195.3  871.3   200.0   8.4
24.001667    1565.1  1241.6  198.4   9.7
24.001944    2269.5  1892.0  210.3   6.5
24.002222    2082.8  1705.8  202.4   8.5
24.002501    1588.4  1261.7  190.6   8.2
24.002777    1400.8  1078.7  203.5   8.9
24.003056    1282.0  976.5   189.1  10.7
24.003334    1239.5  932.9   193.6   8.3
24.003611    1438.6  1142.5  204.8   9.4
24.003889    1618.8  1294.5  198.1  11.2
24.004168    1668.5  1339.2  204.0   9.7
24.004444    1798.7  1448.2  198.2  10.6
24.004723    1583.0  1234.8  198.3   8.8
24.004999    1457.6  1128.6  211.2  10.2
24.005278    1612.3  1293.6  205.4   9.1
24.005556    1298.9  998.9   201.2   8.5
24.005833    1346.1  1025.5  215.0   8.8
24.006111    1705.9  1334.6  205.1   8.9
24.006390    1632.2  1307.1  209.7   9.0
24.006666    1595.4  1219.7  197.3   9.0
24.006945    1321.3  1010.0  201.5  10.0
24.007223    1300.2  1007.2  200.5  11.4
```

Figura 8.5: Arquivo sumário

O programa Sum, que realiza o sumário, mostrando as informações do arquivo.dat gerado.

Agora vamos a pegar os valores do índice $\Sigma(Kp)$, os quais procuramos no site NOAA,

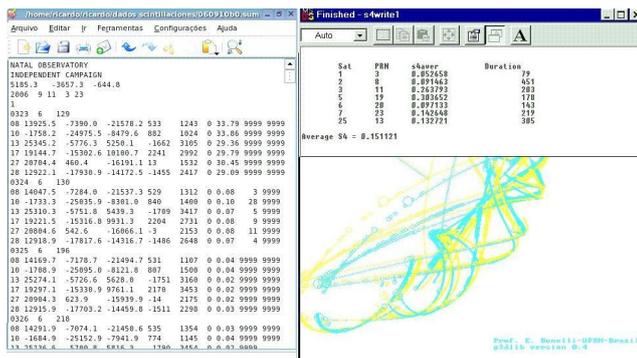


Figura 8.6: Animação gráfica do passo dos satélites
Animação gráfica 3D do passo dos satélites, que se obteve das posições destes obtidas no GPS, a partir do arquivo.sum gerado no passo anterior.
 Autoria Prof. Enivaldo Bonelli.

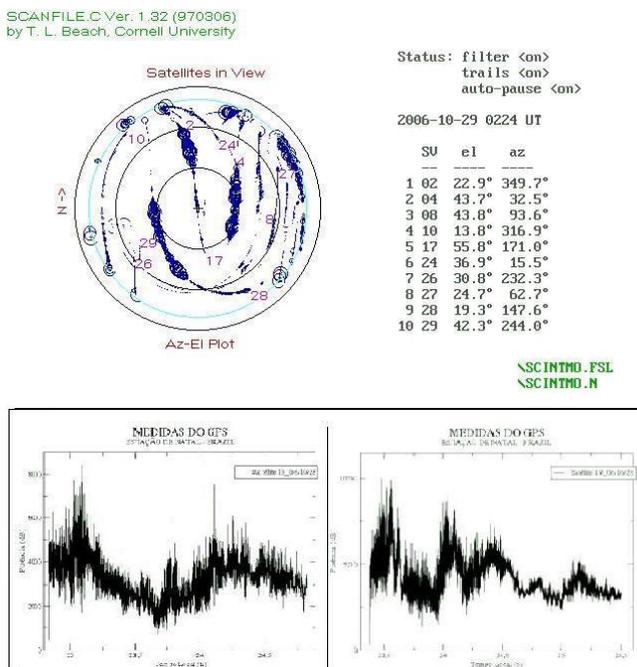


Figura 8.7: Scanfile mostrando os satélites no céu
Programa Scanfile mostrando o campo visual do GPS. Se entende as manchas como as perturbações no sinal experimentado pelas sinais dos satélites. Os gráficos inferiores mostram o padrão do sinal WBP(unidades relativas) dos satélites 13 (esquerda) e 17 (direita).
 Autoria de T.L.Beach

web ¹.

Fazemos uma tabela mostrando Dia, $S_4, \Sigma(Kp)$. Com todas estas informações já podemos fazer o gráfico $\Sigma(Kp)$ vs Dia, e S_4 vs Dia. A imagem que vamos obter nos permite encontrar um método para prever as cintilações para os próximos dias. Além

¹web page: http://sec.noaa.gov/ftpdir/warehouse/2006/2006_plots/kp/

disso, precisamos ter em mão índices em tempo real do clima espacial, que pode ser encontrado em NOAA/SEC, em Boulder, Colorado ou, mais especificamente, dentro do sumário Space Weather Alerts and Warnings Timeline (E. Bonelli, 2005 [23]).

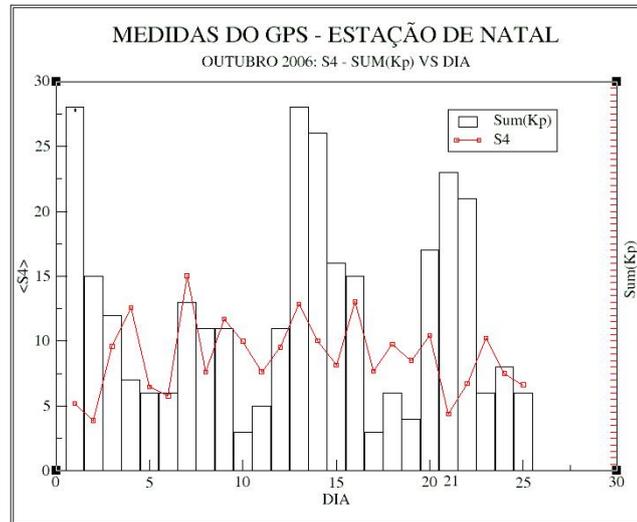


Figura 8.8: exemplo: S4-Kp vs Dia

Primeiro resultado gerado com os dados S4 obtidos no GPS, nos processos anteriores, vs o índice Kp, pego da internet.

8.7 Estação de Natal - UFRN

A estação de Natal esta localizada no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-RN. A imagem apresentada a seguir mostra uma foto vista do ar frente ao campus. O zoom é feito para mostrar a geografia ao redor da estação ionosférica. Temos a mata atlântica ao frente do campus, logo a avenida que vai para a praia Ponta Negra, entrando ao campus temos o laboratório de petroquímica, e logo a estação ionosférica que pertence ao departamento de física teórica e experimental, da UFRN.

ESTAÇÃO IONOSFERICA DE NATAL - UFRN



Figura 8.9: Campus UFRN, estação ionosférica

A estação ionosférica de Natal, localizada no Campus da UFRN-RN. Zoom que mostra a antena parabólica, e o laboratório, ao lado de uma caixa de água. Crédito da Foto: Diretor do Centro de Ciências Exatas e da Terra: prof. Jaziel Martins Sá - UFRN. Ajeitado por J.J. De La Cruz C.

Referências Bibliográficas

- [1] J. Aarons. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F layer irregularities during magnetic storms. *Radio Science*, 26:1131–1149, July 1991.
- [2] J. Aarons. The Longitudinal Morphology of Equatorial F-Layer Irregularities Relevant to Their Occurrence. *Space Science Reviews*, 63:209–243, September 1993.
- [3] J. Aarons, J. P. Mellen, J. P. Koster, R. F. DaSilva, J. R. Medeiros, R. T. Medeiros, A. Bushby, J. Pantoja, J. Lanat, and M. R. Paulson. Seasonal and geomagnetic control of equatorial scintillations in two longitudinal sectors. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42:861–866, 10 1980.
- [4] M. A. Abdu, I. S. Batista, and J. H. A. Sobral. A New Aspect of Magnetic Declination Control of Equatorial Spread F and F Region Dynamo. *J. Geophys. Res.*, 97:897–904, 5 1992.
- [5] M. A. Abdu, J. A. Bittencourt, and I. S. Batista. Magnetic Declination Control of the Equatorial F Region Dynamo Electric Field Development and Spread F. *J. Geophys. Res.*, 86:443–446, 5 1981.
- [6] M. A. Abdu, R. T. de Medeiros, J. A. Bittencourt, and I. S. Batista. Vertical Ionization Drift Velocities and Range Type Spread F in the Evening Equatorial Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 88:399402, 5 1983.
- [7] David N. Anderson. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis. *GPS Solutions*, 7:200–202, 12 2003.
- [8] David N. Anderson, Bodo Reinisch, Cesar Valladare, Jorge Chau, and Oscar Veliz. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial

- ionosphere on a day-to-day basis. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66:1567–1572, 11 2004.
- [9] Neil Ashby. Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 6, 2003.
- [10] N. Balan, G. J. Bailey, M. A. Abdu, K. I. Omayya, P. G. Richards, J. MacDouglass, and I. S. Batista. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F 3 layer. *J. Geophys. Res.*, 102:20472056, 4 1997.
- [11] S. Banola, B. M. Pathan, and D. R. K Rao. Strength of the equatorial electrojet and geomagnetic activity control on VHF scintillations at the Indian longitudinal zone. *Indian J. Radio Space Phys.*, 30:163–171, 5 2001.
- [12] S. Basu and A. Das Gupta. Latitude Variation of Electron Content in Equatorial Region under Magnetically Quiet and Active Conditions. *jgr*, 73:559, 9 1968.
- [13] S. Basu, E. Kundeki, S. Basu, C. E. Valladares, E. J Weber, H. P. Zingingonul, S. Bhattacharyya, R. Sheehan, M. A Meriwether, M. A. Biondi, H. Kuenzler, and J. Espinoza. Scintillations, plasma drifts, and neutral winds in the equatorial ionosphere after sunset. *J. Geophys. Res.*, 101:12,795–26,809, 10 1996.
- [14] Sunanda Basu and Santimay Basu. Equatorial scintillations: advances since ISEA-6. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 47:753–768, 8 1985.
- [15] Sunanda Basu, Santimay Basu, C. E. Valladares, H.-C Yeh, S.-Y Su, E. Mackenzie, P. J. Sultan, J. Aarons, J. Rich, P. Doherty, K. M. Groves, and T. W. Bullett. 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. Geophys. Res.*, 106:30,389–30,413, 6 2001.
- [16] I. S. Batista. Equatorial Ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. *Geophysical Research Letters*, 101:10887–10892, 3 1994.

- [17] T. L. Beach. *Global Positioning System studies of equatorial scintillations*. PhD thesis, CORNELL UNIVERSITY, 10 1998.
- [18] J. V. E. Bernardi and P. M. B. Landim. Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados. *UNESP/Rio Claro*, 10:31, 5 2002.
- [19] Fernando C. P. Bertoni. *Derivas ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem*. PhD thesis, INPE, 6 2004.
- [20] A. Bhattacharyya, T. L. Beach, S. Basu, and P. M. Kintner. Nighttime equatorial ionosphere: GPS scintillations and differential carrier phase fluctuations. *Radio Sci.*, 35:209224, 8 2000.
- [21] M. Blanc. Midlatitude Convection Electric Fields and Their Relation to Ring Current Development. *Geophys. Res. Lett.*, 5:203–206, 5 1978.
- [22] M. Blanc and A. D. Richmond. The ionospheric disturbance dynamo. *Journal of Geophysical Research*, 85:1669–1686, 5 1980.
- [23] E. Bonelli. Forecasting GPS Scintillations For Low Latitude Stations, in Brazil, using Real-Time Space Weather Data. *AGU Spring Meeting Abstracts*, pages A7+, 5 2005.
- [24] Enivaldo Bonelli. *Equatorial electric fields: A numerical model*. PhD thesis, CORNELL UNIVERSITY, 10 1985.
- [25] F. F. Chen. *Introduction to plasma physics*. New York: Plenum Press, 1974, 1974.
- [26] A. Dasgupta. Long-term control of solar activity on equatorial scintillations. In N. Gopalswamy and A. Bhattacharyya, editors, *Proceedings of the ILWS Workshop*, page 418, 2006.
- [27] Mahmoud Lotfy El-Gizawy. *Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users*. Dissertation, msc, Calgary university, 3 2003.
- [28] D. T. Farley, B. B. Balsey, R. F. Woodman, and J. P. McClure. Equatorial Spread F: Implications of VHF Radar Observations. *J. Geophys. Res.*, 75:7199–7216, 2 1970.

- [29] D. T. Farley, E. Bonelli, B. G. Fejer, and M. F. Larsen. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 91:13723–13728, 12 1986.
- [30] M. Fedrizzi. *Observações do Conteúdo Eletrônico Total com dados do GPS*. dissertação (mestrado em geofísica espacial), INPE, 11 1999.
- [31] M. Fedrizzi. *Estudo do efeito de tempestades magnéticas na ionosfera utilizando dados do GPS*. PhD thesis, INPE, 12 2003.
- [32] B. G. Fejer. Equatorial ionospheric electric fields associated with magnetospheric disturbances. *Solar Wind-Magnetosphere Coupling*, 519, 8 1986.
- [33] B. G. Fejer, D. T. Farley, R. F. Woodman, and C. Calderon. Dependence of Equatorial F Region Vertical Drifts on Season and Solar Cycle. *J. Geophys. Res.*, 84:57925796, 9 1979.
- [34] B. G. Fejer, E. R. Paula, S. A. Gonzalez, and R. F. Woodman. Average vertical and zonal Fregion plasma drifts over Jicamarca. *Journal of Geophysical Research*, 96:13901–13906, 6 1991.
- [35] B. G. Fejer and L. Scherliess. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields. *Journal of Geophysical Research*, 102:24047–24056, 4 1997.
- [36] B. G. Fejer, L. Scherliess, and E. R. de Paula. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 104:19,859–19,869, 6 1999.
- [37] J. M. Forbes. The Equatorial Electrojet. *Reviews of Geophysics*, 19:469–504, 3 1981.
- [38] J.C. Foster. Storm Time Plasma Transport at Middle and High Latitudes. *J. Geophys. Res.*, 98:1675–1689, 5 1993.
- [39] C. A. Gonzales, M. C. Kelley, B. G. Fejer, J. F. Vickrey, and R. F. Woodman. Equatorial Electric Fields During Magnetically Disturbed Conditions, 2. Implications of Simultaneous Auroral and Equatorial Measurements. *J. Geophys. Res.*, 84:58035812, 4 1979.

- [40] W. D. Gonzalez, J. A. Josleyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsuratani, and V. M. Vasyliunas. What is a Geomagnetic Storm? *J. Geophys. Res.*, 99:5771–5792, 3 1994.
- [41] K. M. Groves, S. Basu, E. J. Weber, M. Smitham, H. Kuenzler, C. E. Valladares, R. Sheehan, E. MacKenzie, J. A. Secan, P. Ning, W. J. McNeill, D. W. Moonan, and M. J. Kendra. Equatorial scintillation and systems support. *Radio Science*, 32:2047–2064, 1997.
- [42] W. B. Hanson and R. J. Moffett. Ionization Transport Effects in the Equatorial F Region. *J. Geophys. Res.*, 71:5559–+, 12 1966.
- [43] R. A. Heelis, P. C. Kendall, R. J. Moffett, D. W. Windle, and H. Rishbeth. Electrical coupling of the E- and F-regions and its effect on F-region drifts and winds. *Planetary and Space Science*, 22:743–756, 5 1974.
- [44] Y. Kamide and S. Matsushita. Penetration of high-latitude electric fields into low latitudes. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43:411–425, 5 1981.
- [45] M. C. Kelley. Explanation for anomalous ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field. *Geophysical Research Letters*, 6:301–304, 3 1979.
- [46] Michael C. Kelley. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press, San Diego, CA, 1989.
- [47] P. M. Kintner, B. M. Ledvina, and E. R. de Paula. An amplitude scintillation test pattern standard for evaluating GPS receiver performance. *Space Weather*, 3, 5 2005.
- [48] E. Kudeki. Interferometer studies of equatorial F region irregularities and drifts. *Geophysical Research Letters*, 8:377–380, 3 1983.
- [49] X. Li, M. Temerin, D. N. Baker, G. D. Reeves, D. Larson, and S. G. Kanekal. Dipole Tilt Effects on Radiation Belt Electrons and Dst Index. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages B8+, 12 2002.

- [50] Xiangqian Liao. *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. Dissertation, University of Calgary, 6 2001.
- [51] N. Maruyama, A. D. Richmond, T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, S. Sazykin, F. R. Toffoletto, R. W. Spiro, and G. H. Millward. Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the storm-time equatorial ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 32:17105, 10 2005.
- [52] Amauri Frogoso Medeiros. *Observações de onda de gravidade através do imageamento da aeroluminescência*. PhD thesis, INPE, 3 2001.
- [53] M. Mendillo, M. D. Papagiannis, and J. A. Klobuchar. Ionospheric Storms at Midlatitudes. *Radio Sci.*, 5:895–898, 3 1970.
- [54] M. Menvielle. Recent and future evolution in geomagnetic indices derivation and dissemination. *Geophysics and Geodesy*, 31, 5 2001.
- [55] M. Menvielle and J. Paris. The $a(\lambda)$ longitude sector geomagnetic indices. *Geophysics and Geodesy*, 31, 8 2001.
- [56] J. F. G. Monico. Posicionamento pelo Navstar-GPS: descrição, fundamentos e aplicações. *São Paulo: Editora UNESP*, page 287, 3 2000.
- [57] M. Muruyama. Interaction between direct penetration and disturbance dynamo electric fields in the storm-time equatorial ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 32:L17105, 3 2005.
- [58] Barbosa Neto and F. Paulo. A camada ionosférica F3. *Revista Brasileira de Geofísica*, 17:230 – 231, 11 1999.
- [59] Alexandre Álvares Pimenta. *Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical*. PhD thesis, INPE, São José dos Campos, 4 2002.
- [60] D. S. V. V. D. Prasad, P. V. S. R. Rao, G. Uma, S. G. Krishna, and K. Venkateswarlu. Geomagnetic activity control on VHF scintillations over an Indian low latitude station, Waltair (17.7N, 83.3E, 20N dip). *Journal of Earth System Science*, vol. 114, issue 4, pp. 437-441, 114:437–441, 8 2005.

- [61] R. G. Rastogi. Seasonal and solar cycle variations of equatorial spread-F in the American zone. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42:593–597, 7 1980.
- [62] A. Rigoti, F. H. Chamalaun, N. B. Trivedi, and A. L. Padilha. Characteristics of the Equatorial Electrojet determined from an array of magnetometers in N-NE Brazil. *Planets Space*, 51:115–128, 8 1999.
- [63] H. Rishbeth. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. *Planetary and Space Science*, 19:357–369, 3 1971.
- [64] H. Rishbeth and K. Owen Galrriot. *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic Press, New York, 1969.
- [65] J. H. Sastri, M. A. Abdu, I. S. Batista, and J. H. A. Sobral. Onset conditions of equatorial (range) spread F at Fortaleza, Brazil, during the June solstice. *Journal of Geophysical Research*, 102:24013–24021, 6 1997.
- [66] C. Senior and M. Blanc. On the control of magnetospheric convection by the spatial distribution of ionospheric conductivities. *Journal of Geophysical Research*, 89:261–284, 6 1984.
- [67] J. H. A. Sobral. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observations. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 64:1517–1524, 3 2002.
- [68] T. Tanaka. Severe Ionospheric Disturbances Caused by the Sudden Response of Evening Subequatorial Ionospheres to Geomagnetic Storms. *J. Geophys. Res.*, 86:11,335–11,349, 7 1981.
- [69] M. Temerin and X. Li. A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind. *J. Geophys. Res.*, 107:1472, 2 2002.
- [70] de Medeiros Rui Tertuliano. *Um estudo das irregularidades ionosféricas da região F, na ionosfera sobre fortaleza, natal e cachoeira paulista*. dissertação, mestrado em geofísica espacial, INPE, 2 1985.

- [71] Marco Antônio Timbó. Levantamento através do sistema GPS. *Universidade Federal de Mima Gerais*, 5 2000.
- [72] C. E. Valladares, S. Basu, K. Groves, M. P. Hagan, D. Hysell, A. J. Jr. Mazzella, and E. Sheehan. Measurement of the latitudinal distributions of total electron content during equatorial spread F events. *J. Geophys. Res.*, 106:29,133–29,152, 4 2001.
- [73] C. E. Valladares, R. Sheehan, S. Basu, H. Kuenzler, and J. Espinoza. The multi-instrumented studies of equatorial thermosphere aeronomy scintillation system: Climatology of zonal drifts. *J. Geophys. Res.*, 101:26,839–26,850, 8 1996.
- [74] C. E. Valladares, J. Villalobos, R. Sheehan, and M. P. Hagan. Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of GPS receivers. *Annales Geophysicae*, 22:3155–3175, 3 2004.
- [75] R. F. Woodman. Vertical Drift Velocities and East-West Electric Fields at the Magnetic Equator. *J. Geophys. Res.*, 75:6249–6259, 4 1970.
- [76] R. F. Woodman. East-West Ionospheric Drifts at the Magnetic Equator. *Space Research XII*, 12:969–974, 6 1972.
- [77] K.C. Yeh, C. H. Soicher, and Enivaldo Bonelli. Ionospheric Bubbles Observed by the Faraday Rotation Method at Natal, Brazil. *Geophys. Res. Lett.*, 6:473–475, 6 1979.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)