

Estudo dos Efeitos das Tempestades Magnéticas nas Irregularidades Ionosféricas Utilizando Sinais Gps

Maiquel dos Santos Canabarro¹ (UFSM/INPE, Bolsista PIBIC/CNPq - MCT)
Dr. Eurico Rodrigues de Paula² (DAE/CEA/INPE - MCT)

3

RESUMO

Com o avanço da tecnologia de comunicação transionosférica, cada vez mais necessitamos conhecer o comportamento do meio por onde os sinais se propagam e os efeitos de agentes externos sobre este meio. No objetivo de estudar as Irregularidades Ionosféricas, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE-MCT, em cooperação com a Universidade de Cornell, dispõe do Sistema GPS. Este sistema é composto de vários receptores GPS (“Global Positioning System”) distribuídos no Território Brasileiro, de forma a estudar os efeitos que estas irregularidades causam no sinal GPS. Estas irregularidades ionosféricas causam fortes cintilações na amplitude e na fase do sinal recebido pelos receptores de GPS, deteriorando este sinal e muitas vezes diminuindo drasticamente o número de satélites do sistema GPS disponíveis. Estas irregularidades do plasma ionosférico ocorrem durante períodos magneticamente calmos principalmente de setembro a março, entretanto podem também ser geradas durante tempestades magnéticas em qualquer estação do ano. Este Projeto teve por objetivo estudar os efeitos das Irregularidades Ionosféricas no sinal GPS em períodos magneticamente perturbados. No decorrer do Projeto analisou-se os efeitos causados no sinal GPS em vários períodos com incidência de Tempestades Magnéticas, selecionadas utilizando Índices Magnéticos, em determinadas estações do Sistema GPS. Entre as estações foram selecionadas três, a de São Luís, MA (2,57° N, 44,00° W, dip latitude 1,3° S), a de São José dos Campos, SP (23,07° S, 45,86° O, dip latitude -18,01° S) e a de São Martinho da Serra, RS (29,28° S, 53,82° W, dip latitude 18,57° S) que se encontra instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT. Nas análises constatou-se que, em vários períodos com perturbações magnéticas devido à penetração em baixas latitudes de um campo elétrico zonal para leste de origem magnetosférica, ocorreu uma intensificação do Efeito Fonte. O Efeito Fonte consiste na deriva vertical para cima do plasma ionosférico na região equatorial, seguido da difusão do plasma para latitudes mais baixas, o que faz com que as cristas da Anomalia Equatorial se desloquem para maiores latitudes. Em muitas das tempestades analisadas foi observado que o plasma ionosférico foi retirado da estação equatorial de São Luís e se difundiu para latitudes mais baixas, como a Estação de São José dos Campos e em fortes perturbações chegando mesmo a ser observado pela Estação do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, no extremo sul do Brasil, acarretando diferentes cintilações do sinal GPS nestas três estações, pois a amplitude das cintilações ionosféricas depende fortemente da ionização da Ionosfera.

¹ Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, UFSM. E-mail: maiquel@lagesm.ufsm.br

^{1682 2} Pesquisador da Divisão de Aeronomia, Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas. E-mail: eurico@dae.inpe.br



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DOS EFEITOS DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS NAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS UTILIZANDO SINAIS GPS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC/INPE - CNPq/MCT

PROCESSO: 111908/2003-5

Maiquel dos Santos Canabarro - Bolsista
E-mail: maiquel@lacesm.ufsm.br

Dr. Eurico Rodrigues de Paula - Orientador
E-mail: eurico@dae.inpe.br

Santa Maria, Maio de 2004



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Bolsista:

Maiquel dos Santos Canabarro
Curso de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria

Orientador:

Dr. Eurico Rodrigues de Paula
Divisão de Aeronomia
Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Colaboradores:

Dr. Nelson Jorge Schuch – CRSPE/INPE-MCT
Dr. Clézio Denardin – DAE/CEA/INPE-MCT
Diego dos Santos – UFSM
Henrique Carloto Aveiro – UFSM
Luís Felipe Rezende – DAE/CEA/INPE-MCT
Rafael Krummenauer – UFSM
Thiago Brum Pretto – UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório Ionosfera Radio Propagação
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria
Observatório Espacial do Sul

**ÍNDICE**

CAPÍTULO 1	7
1.1 INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO 2	8
IONOSFERA	8
2.1 INTRODUÇÃO	8
2.1 PRINCÍPIO DA TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO.....	11
2.2 PICO DE PRÉ-REVERSÃO DA DERIVA VERTICAL EXB DO PLASMA IONOSFÉRICO.....	11
2.3 ANOMALIA EQUATORIAL OU ANOMALIA APPLETON.....	12
2.4 A TEORIA LINEAR DA INSTABILIDADE TIPO RAYLEIGH – TAYLOR	13
CAPÍTULO 3	16
TEMPESTADES, ÍNDICES MAGNÉTICOS	16
3.1 TEMPESTADES MAGNÉTICAS	16
3.2 SUB-TEMPESTADES MAGNÉTICAS.....	18
3.3 SSC, “ <i>SUDDEN STORM COMMENCEMENT</i> ”	18
3.4 ÍNDICES MAGNÉTICOS	19
3.4.1 ÍNDICE DST	20
3.4.2 ÍNDICE KP.....	21
3.4.3 ÍNDICE AE.....	21
CAPÍTULO 4	22
SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)	22
4.1 INTRODUÇÃO	22
4.2 SEGMENTOS DO SISTEMA GPS.....	23
4.3 CARACTERÍSTICAS DO SINAL GPS.....	23
4.4 POSICIONAMENTO POR GPS.....	26
4.5 RECEPTORES GPS.....	28
CAPÍTULO 5	31
EFEITOS DA IONOSFERA NO SINAL GPS	31
5.1 CINTILAÇÕES IONOSFÉRICAS	32
5.1.2 O ÍNDICE DE CINTILAÇÃO (S_4)	34
5.1.3 O ÍNDICE S_4 CALCULADO PELOS RECEPTORES SCINTMON.....	36
CAPÍTULO 6	39
INSTRUMENTAÇÃO	39



6.1	MONITORES DE CINTILAÇÃO – SCINTMON.....	39
CAPÍTULO 7.....		43
METODOLOGIA, DADOS E ATIVIDADES EXTRAS		43
7.1	METODOLOGIA	43
7.2	SELEÇÃO DO PERÍODO DE DADOS ANALISADOS	44
7.3	ATIVIDADE EXTRAS DO ACADÊMICO.....	47
7.3.1	CURSOS.....	47
7.3.2	CONGRESSOS.....	48
CAPÍTULO 8.....		51
CONCLUSÕES.....		51
8.1	AGRADECIMENTOS.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		53
APÊNDICE A		59
APÊNDICE B		61



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
2.1 – Perfil vertical típico da ionosfera.....	09
2.2 – Modelo simplificado para estudos do pico de pré-reversão causado por um vento uniforme U.....	12
2.3 - Diagrama esquemático do transporte do plasma da região equatorial até elevadas altitudes e que posteriormente é levado aproximadamente a 20° de latitude magnética.....	13
2.4 – Esboço de um fenômeno magneto-hidrodinâmico análogo às condições iniciais do desenvolvimento da instabilidade Rayleigh - Taylor na base da camada F noturna.....	14
2.5 – Perfil de densidade eletrônica típico da região equatorial no período após o pôr-do-sol.....	14
2.6 – Diagrama esquemático da instabilidade Rayleigh – Taylor na geometria equatorial. A corrente J representada no canto superior direito é aquela gerada por um campo E_0 dirigido para leste e relacionado com a corrente J pela condutividade Pedersen.....	15
3.1 – Seção transversal norte-sul da cavidade geografica e do fluxo de plasma externo, mostrando a Magnetopausa a frente de choque.....	16
3.2 – Circulação devido ao fluxo do vento solar. Os números 0 a 7 indicam as sucessivas posições da linha de campo magnético interplanetário.....	17
3.3 – Fases características de uma tempestade magnética.....	19
4.1 – Constelação de satélites do sistema GPS.....	23
4.2 - Demonstração da modulação do código sobre a onda portadora.....	24
4.3 – Posicionamento (a) unidimensional e (b) bidimensional de um usuário U.....	27
5.1 – Ilustração da interferência da ionosfera no sinal GPS.....	31



5.2 - Exemplo de cintilação e correspondentes valores de S_4 calculados para intervalos de 1 minuto.....	38
6. 1a – Distribuição dos receptores SCINTMON sobre o Território Brasileiro..	40
6.1b - Estação S no Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE-MCT.....	40
6.2 - Os diversos painéis mostram os valores de potência em banda larga de sinal recebido, WBP em decibéis, para os satélites rastreados na noite de 27/10/2003 para 28/10/2003. O PRN, identificação, de cada satélite é indicado no canto superior direito de cada painel, observados no Observatório Espacial do Sul, RS.....	42
6.3 - Os diversos painéis mostram os valores do índice S_4 , calculado para os sinais mostrados na Figura 6.2. Valores de S_4 acima de 0.2 estão associados à irregularidades.....	42
7.1 – Prédio 2 do Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS onde se encontram as estações GPS instaladas, no âmbito da Parceria INPE – Cornell University.....	43
7.2 – Variação do fluxo solar em 10.7 cm, entre Jan/1988 e Dez/2003.....	45
7.3 – Variação dos índices Kp e Dst entre os dias 04 e 08 de junho, 27 e 31 de outubro de 2003.....	45
7.4 – Variação do índice S_4 do satélite PRN 27 para as estações GPS de (a) - São Luís, MA, e (b) - São José Campos, SP, para o dia 06.06.03 sem atividade magnética.....	46
7.5 – Variação do índice S_4 do satélite PRN 27 para as estações GPS de (a) - São Luís, MA, (b) - São José Campos e (c) - São Martinho da Serra respectivamente para o dia 29.10.03 com incidência de tempestade magnética.	46



CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

As irregularidades ionosféricas são geradas no Equador Magnético logo após o pôr do Sol devido às instabilidades do plasma ionosférico e quando evoluem atingem dimensões continentais são chamadas bolhas ionosféricas, e apresentam uma velocidade de cerca de 150 m/s para leste durante períodos magneticamente calmos e, em geral, durante tempestades magnéticas o movimento das bolhas é para oeste. No Brasil estas irregularidades ocorrem de setembro a março e de cerca das 20 às 24 horas, entretanto durante tempestades magnéticas elas podem ocorrer em qualquer estação do ano e podem ocorrer no setor entre meia noite e o amanhecer.

As irregularidades ionosféricas são muito estudadas, pois afetam drasticamente os sistemas de telecomunicações e de posicionamento global, GPS. No Brasil foram afetados pelas irregularidades ionosféricas alguns sistemas de telecomunicações da Embratel, sistemas de posicionamento por DGPS, GPS diferencial, das plataformas em águas profundas da Petrobrás e o sistema de navegação aérea CNS/ATM, que se encontra em teste e será implantado pela Força Aérea Brasileira.

Nos Capítulos 2 e 3 é abordado uma revisão bibliográfica sobre a Ionosfera e tempestades magnéticas e suas características relevantes para o assunto discutido. O Capítulo 4 traz um relato do sistema GPS. No Capítulo 5 é relatado alguns efeitos da Ionosfera no sinal GPS. No Capítulo 6 é descrita a instrumentação utilizado no trabalho. No Capítulo 7 consta a análise de dados relativos ao objetivo deste Trabalho, o estudo do efeito das tempestades magnéticas nas irregularidades ionosféricas com sinal GPS, a metodologia e atividades extras exercida pelo bolsista no período do Projeto. Considerando os resultados obtidos através da análise dos dados selecionados o Capítulo 8 situa a respeito das conclusões deste Projeto.



CAPÍTULO 2

IONOSFERA

2.1 INTRODUÇÃO

A parte da Atmosfera superior onde íons e elétrons existem em quantidades suficientes para afetar a propagação das ondas de rádio é denominada de Ionosfera (Standards on wave..., 1950). Esta região que se encontra situada entrono de 60 a 2000 Km de altitude, e sua formação esta ligada principalmente os processo de fotoionização. A fotoionozção ionosférica consiste na absorção de radiação solar, predominante na faixa do extremo ultravioleta e raios-x, por elementos atmosféricos neutros (Rishbeth e Garriott, 1969). Se a energia dos fótons incidentes nos elementos neutros possuírem uma energia $>12\text{eV}$, eles fazem com que o elemento neutro dê origem a um íon positivo e assim liberando elétrons livres. Esta ionização pode ser produzida por colisão de particular energéticas carregadas oriundas da radiação cósmica, que ao penetrarem na Atmosfera, provocam ionização porém em menor escala. Este fenômeno ocorrer geralmente em regiões de altas latitudes e na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS.

A densidade ionosférica é produzida praticamente por radiação solar, sendo que a medida que a radiação penetra na atmosfera, a produção de elétrons aumenta até um nível onde a densidade eletrônica é máxima. Porém abaixo desde máximo mesmo com a densidade atmosferica neutra aumentando há um decréscimo na produção de elétrons pois a maior parte da radiação já foi absorvida a uma taxa que é diretamente ligada a produção de elétrons, assim origina a divisão da ionosfera em regiões caracterizadas por suas diferentes densidades, as quais são denominadas de Camadas D, E e F, ver Figura 2.1. Considerando que a densidade eletrônica da ionosfera depende da radiação solar, nos períodos no turnos temos uma queda desta densidade mostrada na Figura 2.1.

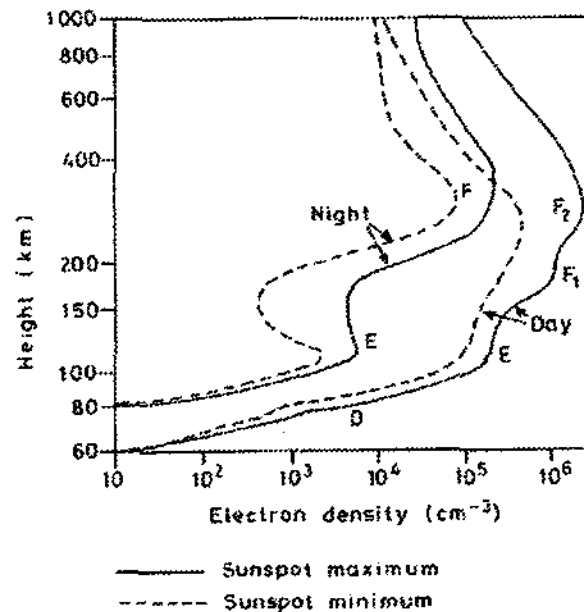


Fig. 2.1 – Perfil vertical típico da ionosfera.
FONTE: Hargreaves (1995, p. 209)

A camada D está situada entre 50 e 90 Km de altura, a qual apresenta uma particularidade, os elétrons livres podem se combinar com moléculas para formar íons negativos (Tascione, 1988). Este processo, é conhecido como junção eletrônica ou “attachment”, ocorrendo à noite e acarretando o desaparecimento da camada D. Porém na presença de radiação solar, os elétrons voltam a aparecer devido ao processo de “dettachment” (Fedrizzi, 1999). As principais fontes de radiação para a produção de íons são os Raios-x solares e a radiação cósmica galáctica. A ionização da região D é altamente dependente da atividade solar, aumentando consideravelmente em períodos perturbados (Banks e Kockarts, 1973.)

A camada E está localizada entre 90 e 140 Km de altura, sua fonte principal de ionização é a radiação solar no espectro dos raios-x moles. Apresenta um comportamento ligado a características solares tais como, a posição solar em relação ao zênite, a atividade solar, com sua concentração eletrônica máxima nos horários



próximos ao meio-dia local e em períodos com maior ocorrências de manchas solares. Nesta Região existe a ocorrência de uma camada ionizada relativamente densa, a partir dos 100 Km de altura, com espessura em torno de 20 Km, com vários quilômetros de extensão, que é denominada de camada E esporádica. Em latitudes médias, o surgimento da camada E esporádica é suposto estar associado à intensos cisalhamentos verticais de vento e precipitação de fragmentos de meteoros; em latitudes baixas, ocorre devido à instabilidade causada pela alta velocidade de deriva dos elétrons e em altas latitudes, provavelmente seja resultado da precipitação de partículas (McNamara, 1991; Tascione, 1988).

A região F, se divide por suas características em duas sub-regiões: F1 e F2. A camada F1 está delimitada entre 140 e 200 km de altura, e tem sua principal formação pela ionização solar no espectro do EUV. Esta camada é observável somente no período diurno, pois sua concentração eletrônica é controlada, principalmente pelo ângulo zenital solar e tem seu comportamento influenciado pela variação sazonal e a atividade solar. A camada F1 é mais ressaltada nos períodos de verão, em épocas de menor número de manchas solares e durante a ocorrência de perturbações ionosférica (Davies, 1990).

A Camada F2 situa-se desde dos 200 km de altura até aproximadamente os 1000 km o qual é o início da Plasmasfera. Sua concentração eletrônica máxima encontra-se entre 250 e 400 km de altitude, onde a formação deve-se a uma mescla de processos químicos e de transporte de plasma. Nesta camada a radiação solar ionizante é praticamente a mesma da camada F1, porém esta não segue a mesma variação diurna e sazonal (Davies, 1990). Os processos de transporte e as perturbações associadas às tempestades magnéticas tornam a variação temporal e espacial desta camada extremamente complexa, onde a radiação solar desempenha um papel limitado na produção e manutenção de elétrons livres. O pico de densidade eletrônica tende a atingir um valor máximo logo após Por-do-Sol, devido à processos de transporte de plasma (Rich, 1985). Durante a noite a Camada F2 pode persistir, porém sua intensidade diminui

continuamente, pois a Atmosfera neutra nesta região é suficientemente tênue para evitar que haja recombinação significativa (Beard, 1975). Assim o mínimo corre pouco antes do amanhecer, devido à recombinação dos elétrons durante a noite (McNamara, 1991).

2.1 PRINCÍPIO DA TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO

Segundo Rishbet e Garriot (1969), a teoria do dínamo explica o surgimento de campos elétricos e correntes na Atmosfera e seu mecanismo pode ser resumido da seguinte forma: O Sol e a Lua produzem forças de marés na Atmosfera, causando movimentos de gases neutros da Atmosfera que, em primeira ordem, podem ser considerados movimentos horizontais. O movimento destes gases neutros através das linhas de campo geomagnético produzem correntes em níveis onde a condutividade elétrica é apreciável, camada E. Devido às variações horizontais e verticais de condutividade, as correntes não podem fluir livremente em todas as direções. Desta forma, assim são geradas cargas de polarização que, por sua vez, modificam o fluxo de corrente. Os campos eletrostáticos associados com estas cargas são transmitidas à região F equatorial, através das linhas de campo magnéticas que são altamente condutoras. Na região F, estes campos eletrostáticos dão origem às derivas eletrostáticas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, (Rodrigues, 2003).

2.2 PICO DE PRÉ-REVERSÃO DA DERIVA VERTICAL $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ DO PLASMA IONOSFÉRICO

Estudos sobre a variação diária da deriva zonal e vertical do plasma ionosférico equatorial, a qual tem seu principal gerador a ação dos campos elétricos criados pelos dinamos da região E e F, são principalmente baseados em medidas de deriva que por sua vez são medidas indiretas de campo elétrico.

A ação do vento neutro uniforme na região F pode explicar o pico de pré-reversão, ilustrado na Figura 2.2. Próximo ao divisor noite-dia, um campo elétrico E_z gerado pelo dínamo da região F ($-\mathbf{U} \times \mathbf{B}$) é mapeado até as regiões E conjugadas através das linhas de campo magnético dando origem a um campo elétrico E_0 dirigido para Equador. Por sua

vez este campo elétrico gera uma corrente Hall $J_{\theta\phi}$ dirigida para oeste. Como nenhuma corrente flui na região E noturna, um acúmulo de cargas negativas se desenvolve no divisor, dando origem ao campo E_{ϕ} e a corrente $J_{\phi\phi}$ que tenta cancelar $J_{\theta\phi}$, como mostrado na Figura 2.2. este campo E_{ϕ} é mapeado de volta à região F e causa primeiramente um deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ do plasma para cima e logo após uma deriva para baixo (Rodrigues, 2003).

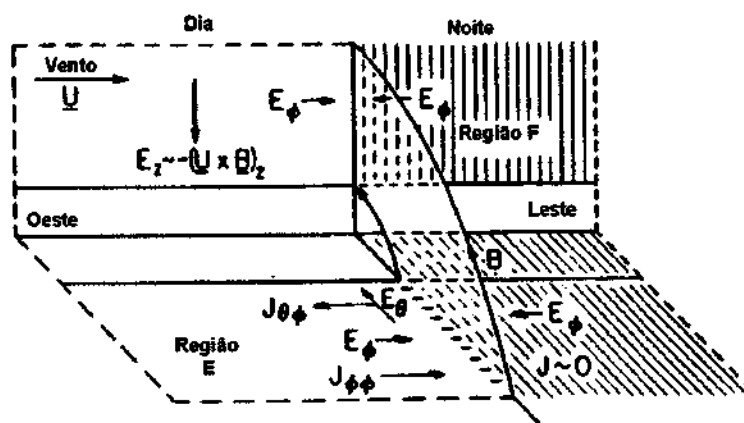


Fig. 2.2 – Modelo simplificado para estudos do pico de pré-reversão causado por um vento uniforme U.

FONTE: modificada de Farley *et al.* (1986).

2.3 ANOMALIA EQUATORIAL OU ANOMALIA APPLETON

A Anomalia Equatorial é caracterizada por uma região de alta densidade eletrônica ionosférica, a qual é observada entre 20 graus Norte e Sul de latitude magnética. Este aumento de densidade em baixas latitudes tem sua origem na deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ do plasma da camada F equatorial (Rodrigues, 2003). Como comentado, o campo elétrico zonal existente na Ionosfera equatorial é dirigido para leste durante o dia, criando uma deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$. Porém ao pôr-do-sol, o campo elétrico é acentuado devido ao dínamo da camada F. Por lado, o plasma de baixas altitudes diminui rapidamente devido à redução da intensidade de radiação solar incidente (Kelley, 1989).

Após o plasma subir a elevadas altitudes na região equatorial, ele inicia um movimento de difusão acompanhado as linha de campo magnético, movimento este devido à ação da gravidade (g) e gradiente (∇p). Esta subida e descida do plasma ao longo das linhas de campo magnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte, fenômeno mostrado na figura 2.3.

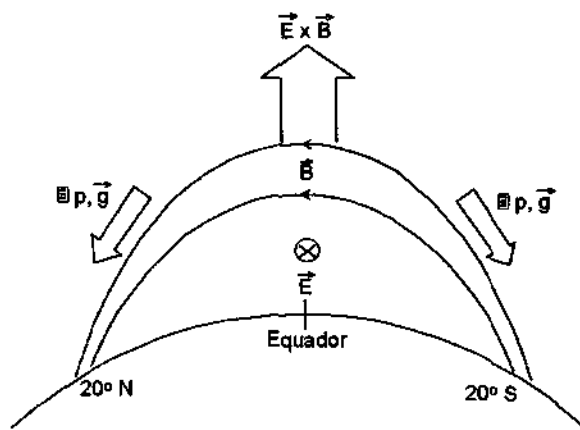


Fig. 2.3 - Diagrama esquemático do transporte do plasma da região equatorial até elevadas altitudes e que posteriormente é levado aproximadamente a 20° de latitude magnética.

FONTE: Kelley (1989, pag. 193).

2.4 A TEORIA LINEAR DA INSTABILIDADE TIPO RAYLEIGH – TAYLOR

A teoria linear da instabilidade Rayleigh–Taylor (R-T) foi apresentada por Dungey, 1956 para explicar a origem do ESF, a qual considera um meio menos denso localizado abaixo de um meio mais denso, numa situação de equilíbrio instável. Em condições especiais, uma pequena perturbação inicial pode desenvolver-se, permitindo que o fluido menos denso penetre no mais denso, conforme ilustrado na Figura 2.4.

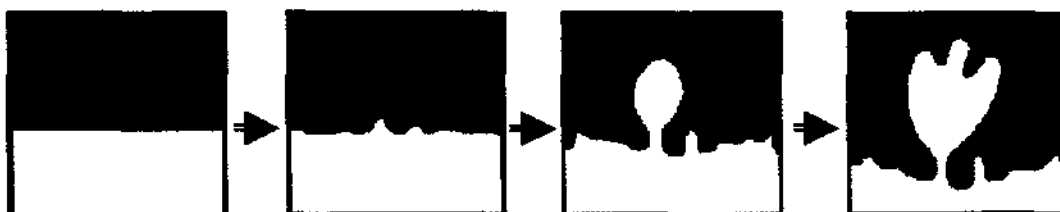


Fig. 2.4 – Esboço de um fenômeno magneto-hidrodinâmico análogo às condições iniciais do desenvolvimento da instabilidade Rayleigh - Taylor na base da camada F noturna.

FONTE: modificada de Kelley (1989, p. 122).

Na base da camada F noturna, os processos de recombinação reduzem consideravelmente a densidade eletrônica, produzindo um íngreme gradiente de densidade entre esta região e o pico da camada F2, como apresentado na Figura 2.5.

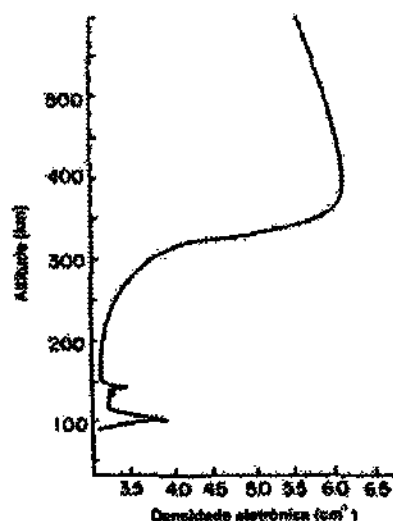


Fig. 2.5 – Perfil de densidade eletrônica típico da região equatorial no período após o pôr-do-sol.

FONTE: Figura adaptada de Kelley, 1989 (p. 76).

O mecanismo pelo qual a teoria RT pode gerar irregularidades ESF na região equatorial está ilustrado na Figura 2.6, onde se assume que as densidades dos meios situados acima e abaixo da interface sejam representadas por n_1 e $n_2=0$, respectivamente. A força

gravitacional, g , é dirigida para baixo e, portanto, antiparalela ao gradiente de densidade. O campo magnético B é horizontal, entrando no plano do folha.

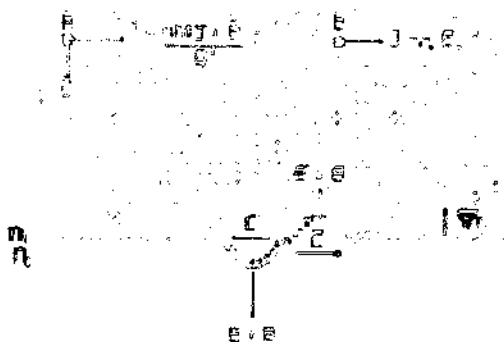


Fig. 2.6 – Diagrama esquemático da instabilidade Rayleigh – Taylor na geometria equatorial. A corrente J representada no canto superior direito é aquela gerada por um campo E_0 dirigido para leste e relacionado com a corrente J pela condutividade Pedersen.

FONTE: Kelley (1989, p.122)

CAPÍTULO 3

TEMPESTADES, ÍNDICES MAGNÉTICOS

3.1 TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Periodicamente nosso Planeta é atingido por emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar, o qual faz que nosso campo magnético se confina e distorça formando uma cavidade com um longa cauda que se estende por vários raios terrestres na direção anti-solar. Esta cavidade recebe o nome de magnetosfera, Figura 3.1.

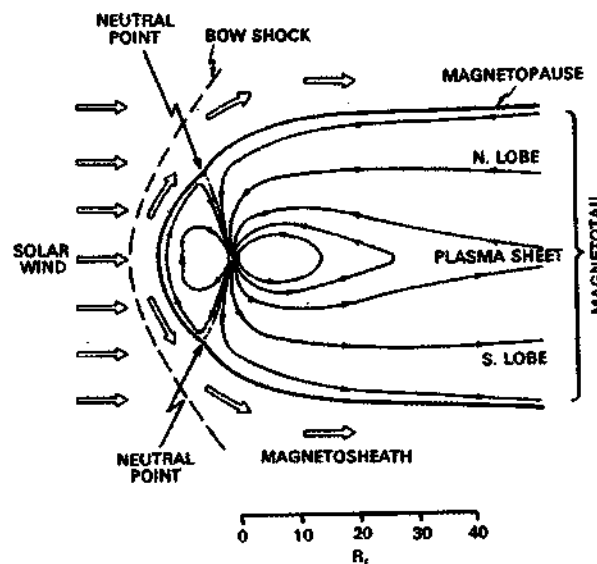


Fig. 3.1 – Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma externo, mostrando a Magnetopausa e a frente de choque.

FONTE: Hargreaves (1995, p. 152).

Essas emissões podem ser chamadas, por exemplo, ejeções de massa coronal, “Coronal Mass Ejections”, as quais provêm do Sol ou “solar flares”, que são conduzidas por

ondas de choque. Porém estes eventos de plasma não têm acesso direto à Atmosfera e à Ionosfera Terrestre.

A Magnetosfera que se origina do campo magnético interno da Terra nos protege desta emissões desviando o campo magnético e o plasma interplanetários. Se a componente norte-sul (B_z) do campo magnético interplanetário, “*interplanetary magnetic field*” – IMF, aponta na direção sul, as linhas do campo magnético terrestre conectam-se às linhas do IMF sobre as calotas polares sendo, em seguida, transportadas pelo vento solar para o lado o lado noturno da Terra e reconectando-se na cauda da Magnetosfera (Figura 3.2). A tensão magnética dos campos recém conectados na cauda arrasta estes campos e o plasma na direção noturna da Terra. Devido à convenção magnetosférica, eles são submetidos às forças devido ao gradiente e curvatura do campo magnético, assim como à força devido aos efeitos de giro das partículas. Para cargas de mesmo sinal, estas forças agem em consonância, com um efeito resultante de prótons derivando da meia-noite em direção ao anoitecer e elétrons da meia-noite na direção do amanhecer, originando a corrente de anel global. Esta corrente decresce a intensidade do campo magnético terrestre e um aumento na sua intensidade é o primeiro indicador de uma tempestade magnética (Tsurutani e Gonzalez, 1998).

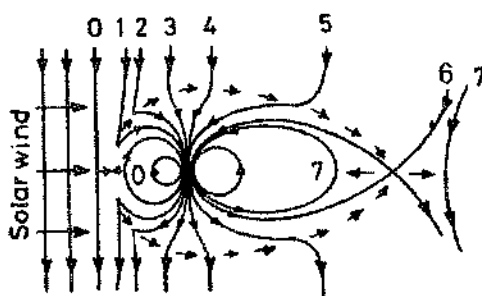


Fig. 3.2 – Circulação devido ao fluxo do vento solar. Os números 0 a 7 indicam as sucessivas posições da linha de campo magnético interplanetário.

FONTE: Hargreaves (1995, p. 158).

De acordo com Gonzalez et al (1994), a tempestade magnética é definida como um intervalo de tempo quando um campo elétrico de convecção interplanetário de longa duração e suficientemente intenso produz, através de uma substancial energização no Sistema Magnetosfera-Ionosfera, uma corrente de anel suficientemente intensa para exceder o limiar da magnitude do índice Dst (a ser definido posteriormente), será definido posteriormente, o qual quantifica a intensidade da tempestade.

3.2 SUB-TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Durante períodos extremamente quietos ainda há a presença de precipitações de partículas aurorais e correntes alinhadas ao campo magnético estão presentes no oval auroral, acarretando um aquecimento Joule significativo na Ionosfera de altas latitudes, porém a ocorrência das sub-tempestades magnetosféricas a precipitação de partículas e as correntes alinhadas ao campo magnético se intensificam (de Paula, 1987, p. 9).

Sub-tempestades magnéticas caracterizam-se por haver injeção de partículas energéticas na corrente de anel e no Cinturão Externo de Van Allen, e estas partículas oriundas do vento solar ficam na bainha de plasma da Magnetosfera. São sugeridos processos importantes associados às sub-tempestades, como exemplo a rápida penetração do campo elétrico de convecção na Magnetosfera interna, resultando na injeção de plasma da bainha de plasma na região de aprisionamento.

3.3 SSC, “*Sudden Storm Commencement*”

Existem casos de tempestades magnéticas intensas que frequentemente estão relacionadas com ejeções de massa coronal provenientes do Sol. Nestes casos há um aumento da velocidade do vento solar acompanhado pela passagem do campo magnético interplanetário na direção sul resultando em um início súbito da tempestade que define-se como SSC, “*Sudden Storm Commencement*”. O ssc é uma consequência do aumento da pressão dinâmica do vento solar na Magnetosfera no lado diurno e caracteriza o início da fase inicial de uma tempestade magnética. Entretanto, o SSC não

se apresenta como sendo uma componente necessária da tempestade. A fase inicial pode ter uma duração que pode variar de minutos a horas, identificada quando o Dst aumenta para valores positivos e pode alcançar algumas dezenas de nT. Em seguida a fase principal, a corrente de anel é intensificada causando um decréscimo no índice Dst que pode alcançar valores negativos de centenas de nT. Sua duração pode variar de desde meia hora a várias horas. Por fim, a fase de recuperação se caracteriza por uma volta gradual à fase normal depois de um período variando entre dezenas de horas. A Figura 3.3 mostra as fases características de uma tempestades magnética.

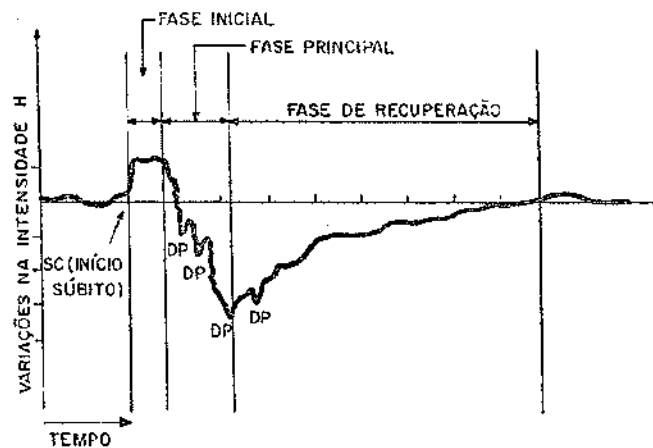


Fig. 3.3 – Fases características de uma tempestade magnética.

FONTE: de Paula (1987, p. 11).

3.4 ÍNDICES MAGNÉTICOS

Tempestades magnéticas são caracterizadas pelos índices magnéticos, os quais nos fornecem informações sobre elas, como a intensidade e duração das tempestades magnéticas. Entre vários os mais utilizados são o Dst, “Disturbance Storm-Time”, o Kp, “Planetary Kennziffer”, ou índice planetário e o AE, “Auroral Electroject”.

3.4.1 ÍNDICE DST

Retirado de uma medida da componente simétrica da corrente de anel, é obtido a partir de magnetogramas de baixas latitudes, tendo sua unidade em nano Tesla, nT, e sua resolução temporal é de hora e hora. É determinado pela medida da componente horizontal, H, do Campo Magnético Terrestre de superfície fornecida por estações localizadas em baixas latitudes e distribuídas longitudinalmente. Seu cálculo considera a subtração entre a componente de períodos calmos e o valor médio das componentes H das estações contribuintes, após é calculado e multiplicado pela, secante da latitude média das estações. Considerando que o Dst contém contribuições de sistemas de correntes que não são azimutalmente simétricas, por exemplo a corrente de anel assimétrica, corrente da cauda magnética além das contribuições da componente H proveniente das correntes alinhadas ao campo, "*field-aligned currents*" – FACs, considera-se o valor da corrente de anel simétrica mais um "erro" associado com outros sistemas de correntes assimétricas.

Através do índice Dst conseguimos obter uma classificação da intensidade das tempestades magnéticas, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Muito Intensa	< -250
Intensa	-100 a -250
Moderada	-50 a -100
Fraca	-30 a -50

Tabela 3.1 – Classificação das Tempestades Magnéticas

FONTE: (Fedrizzi, 1999)

3.4.2 ÍNDICE Kp

O índice planetário Kp é a representação da média do índice K, resultante dos 13 observatórios distribuídos no Globo Terrestre entre as latitudes geomagnéticas de 48°N e 63°N e 43°S e 48°S (GFZ, 2003). O índice K refere-se a um índice local quase-logarítmico que contém as variações ocorridas na atividade magnética, sua resolução temporal é de 3 horas, obtidas da curva do dia quieto para um determinado observatório magnético. Tais medidas são convertidas em escala quase-logarítmica e seus valores variam da forma mostrada na Tabela 3.2.

Comportamento	Kp
Muito calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2 ⁻
Normal	2 ⁻ a 3 ⁺
Perturbado	3 ⁺ a 4 ⁺
Muito perturbado	4 ⁺ a 9

Tabela 3.2 - Distribuição dos valores Kp conforme a atividade magnética.

Fonte: Wrenn et al., 1987

3.4.3 ÍNDICE AE

Para estudos da atividade geomagnética na região auroral se requer um índice magnético que maximize a contribuição do eletrojato auroral, e para este caso é utilizado o índice AE, que é obtido de medidas das variações da componente horizontal do campo geomagnético H, coletadas em observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (Kamei et al. 2000). Os dados são normalizados em relação a um valor base mensal para cada estação, média de todos os dados da estação para os cinco dias mais calmos estabelecidos de acordo com critérios internacionais, que posteriormente, é subtraído dos dados obtidos para cada minuto do mês considerado.

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)

4.1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global – GPS, “*Global Positioning System*”, teve seu início nos anos 60, e após vários estudos sobre o assunto o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América assumiram o desenvolvimento de um sistema de navegação restrito às forças armadas norte-americanas. Porém com o desenvolvimento da tecnologia o sistema pode ser disponibilizado à sociedade civil, tendo hoje uma gama considerável de áreas usuárias do sistema GPS, como por exemplo, controle de frota, agricultura, posicionamento geodésico, navegação, e atualmente vem sendo usado nas pesquisas geofísicas.

O sistema GPS é constituído de uma rede de satélites artificiais a qual possibilita a determinação da posição e velocidade de um objeto, na superfície terrestre, e tem sido utilizado no posicionamento de satélites de baixa órbita (Rush, 2000). Os primeiros protótipos e satélites de desenvolvimento, Bloco I, foram lançados entre 1978 e 1985, totalizando 11 satélites dispostos em dois planos orbitais com inclinação de 63° (Seeber, 1993). Os satélites do grupo Bloco II, cujo lançamento inicial ocorreu em 1989, foram projetados para fazer parte da primeira constelação operacional, contituida de 24 satélites, 21 ativos e 3 reservas, orbitando em 6 planos com inclinação de 55° (Figura 4.1). Em 1995 foi estabelecida a capacidade operacional plena com 27 satélites dos Blocos II, IIA, IIR (Monico, 2000) e hoje já passa dos 30 satélites em órbita.

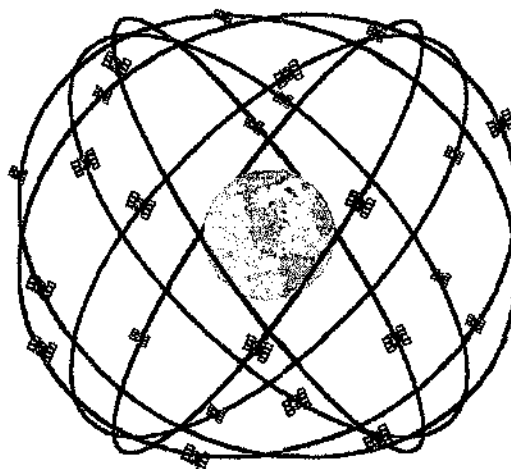


Fig. 4.1 – Constelação de satélites do sistema GPS.

FONTE: Dana (2002).

4.2 SEGMENTOS DO SISTEMA GPS

O GPS dispõe de três segmentos, o segmento espacial, o segmento de controle e o segmento usuário. O segmento espacial do GPS consiste de uma constelação de 24 satélites distribuídos em 6 planos orbitais igualmente espaçados, com quatro satélites em cada plano e a uma altitude aproximada de 20.200 km (Figura 4.1). Os planos orbitais são inclinados 55° em relação ao equador geográfico e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Isto significa que a posição dos satélites se repete, a cada dia, com aproximadamente 4 minutos de adiantamento em relação ao dia anterior. Essa configuração garante que, no mínimo, 4 satélites estejam sempre visíveis em qualquer local da superfície terrestre. O segmento de controle rastreia cada satélite GPS e envia periodicamente ao satélite, a previsão das suas futuras posições e correções de relógio do satélite. Dentro do segmento usuário estão incluídos os usuários civis e militares (Rodrigues, 2003).

4.3 CARACTERÍSTICAS DO SINAL GPS

Os satélites GPS transmitem duas ondas portadoras chamadas “*Link 1*” e “*Link 2*” ou L1 e L2 (Spilker Jr. e Parkinson, 1996). Estas portadoras são geradas simultaneamente a

partir de uma frequência fundamental de 10,23 MHz. L1 e L2 correspondem à frequência fundamental multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Desta forma, L1 corresponde à frequência de 1,57542 GHz, enquanto que L2 corresponde à 1,22760 GHz.

Além da portadora, cada satélite envia uma mensagem de navegação e códigos próprios de cada satélite, que consiste de uma sequência pseudo-aleatória conhecida como PRN “*Pseudo Random Noise*” e que é modulado sobre as portadoras. Cada satélite GPS é identificado pelo seu código PRN transmitido. A modulação de códigos permite realizar medidas de distâncias a partir da estimativa do tempo de propagação da modulação. O tempo de propagação da modulação pode ser obtido por correlação cruzada entre o código no sinal recebido e uma réplica do código gerada no receptor GPS. Os códigos PRN consistem de uma sequência de estados +1 e -1 que correspondem aos valores binários 0 e 1. A modulação é feita por um deslocamento de 180° na fase da portadora quando ocorre a mudança de estado, “*biphase modulation*”. Este processo de modulação é ilustrado na Figura 4.2.

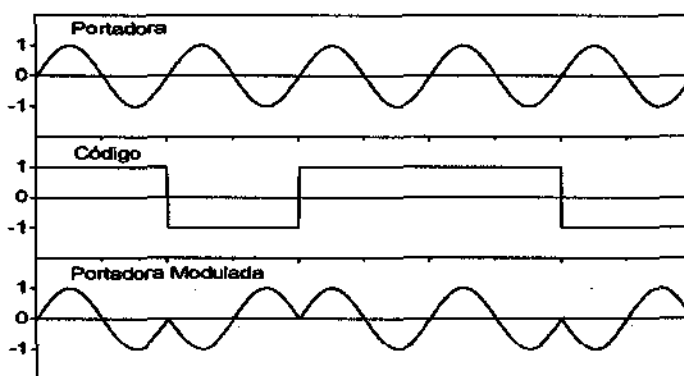


Fig. 4.2 - Demonstração da modulação do código sobre a onda portadora.

FONTE: Adaptado de Hofmann-Wellenhof *et al.* (1994, pag. 77), retirada da dissertação Rodrigues, 2003.

A sequência PRN é formada por dois códigos: O código C/A, “*Coarse/Aquisition*”, ou “*Clear/Access*”, que possui uma frequência de 1,023 MHz e é repetido a cada

milissegundo e o código P, “Precision” ou “Protection”, que possui frequência de 10,23 MHz e é repetido a aproximadamente cada 266,4 dias. Existe ainda o código W utilizado para criptografar o código P, transformando-o no código Y, não disponível aos usuários civis. A criptografia do código P só é utilizada quando o procedimento “Anti-Spoofing”, AS, é acionado. O objetivo principal do AS é evitar que o código P seja fraudado, mediante a geração de uma réplica do mesmo. A mensagem de navegação consiste de 1500 bits transmitidos em 30 segundos e que contém informações sobre o relógio do satélite, a sua órbita, suas condições operacionais e outras informações. Pode-se observar que existem três tipos de sinais envolvidos no GPS: as portadoras, L1 e L2, os códigos C/A e P(Y) e a mensagem de navegação, D. Esta estrutura permite medir a fase da portadora e sua variação e o tempo de propagação da modulação.

As portadoras moduladas podem ser representadas pelas seguintes equações:

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos[\omega_1 t + \phi(t)] + a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)] \quad (4.1)$$

e

$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos[\omega_2 t + \phi(t)] \quad (4.2)$$

onde $a_i \cos[\omega_i t + \phi(t)]$ é a portadora não modulada, $D(t)$ contém a mensagem de navegação, $P(t)$ e $C/A(t)$ representam as seqüências de pulsos dos códigos P e C/A, respectivamente. O termo $a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 t + \phi(t)]$ indica que o código C/A é modulado em quadratura de fase (deslocamento de 90°) com o código P(t). O índice $i=1,2$ representa a portadora L1 ou L2, ω_i é a frequência angular da portadora e $\phi(t)$ é o ruído da fase.

Todos os satélites transmitem na mesma frequência e utilizam a técnica CDMA, “Code Division Multiple Access”, na qual cada satélite é identificado pelo seu código característico. Além disso, o sinal é espalhado em frequência, “spread spectrum”, de forma a evitar efeitos de interferência eletromagnética.

4.4 POSICIONAMENTO POR GPS

Fundamentalmente o Sistema GPS foi desenvolvido com o objetivo de determinar a localização dos usuários na superfície terrestre, estimando o tempo de propagação deste sinal do satélite até o receptor, considerando o instante de transmissão e o instante de recepção e admitindo que os relógios do satélite e receptor estão sincronizados. Desta maneira o tempo de propagação corresponderia a distância geográfica entre o satélite e o receptor. Porém, devido aos relógios dos receptores serem menos precisos, estes apresentam uma defasagem no tempo em relação ao tempo GPS, mesmo os osciladores atômicos dos satélites são corrigidos periodicamente. Por isso significa que a distância obtida pelo sistema GPS não apresenta a valor real entre o satélite e o receptor. Estas medidas incorretas recebem o nome pseudo-distâncias, “*pseudoranges*”. De acordo com Fedrizzi 1999, além do atraso dos relógios, estão incluídos nas medidas de pseudo-distância os erros devido à propagação e à limitação na precisão do sinal GPS e os erros relacionados aos receptores e satélites.

De acordo com Rodrigues 2003, a posição de um certo ponto no espaço pode ser determinada através das distâncias deste ponto até posições conhecidas no espaço. Para explicar este raciocínio, a Figura 4.3a ilustra o caso unidimensional. Se a posição do satélite S_1 e a distância medida x_1 até ele são conhecidas, a posição do usuário somente pode estar em dois pontos, um à esquerda e outro à direita, distantes x_1 de S_1 . Para se determinar a posição do usuário, a distância até outro satélite S_2 com posição conhecida deve ser medida. Na Figura 3.3a a posição de S_2 e da distância x_2 determinam a posição do usuário U.

O caso bidimensional é ilustrada na Figura 4.3b. Para determinar a posição do usuário, três satélites e três distâncias são necessárias. Conhecendo-se a posição do satélite S_i e a distância x_i do usuário até ele, as possíveis posições do usuário são definidas pelo traço da circunferência de raio x_i ao redor da posição do satélite S_i . Dois satélites e duas distâncias fornecem duas possíveis soluções já que duas circunferências se interceptam

em dois pontos. Uma terceira circunferência é necessária para determinar exatamente a posição do usuário.

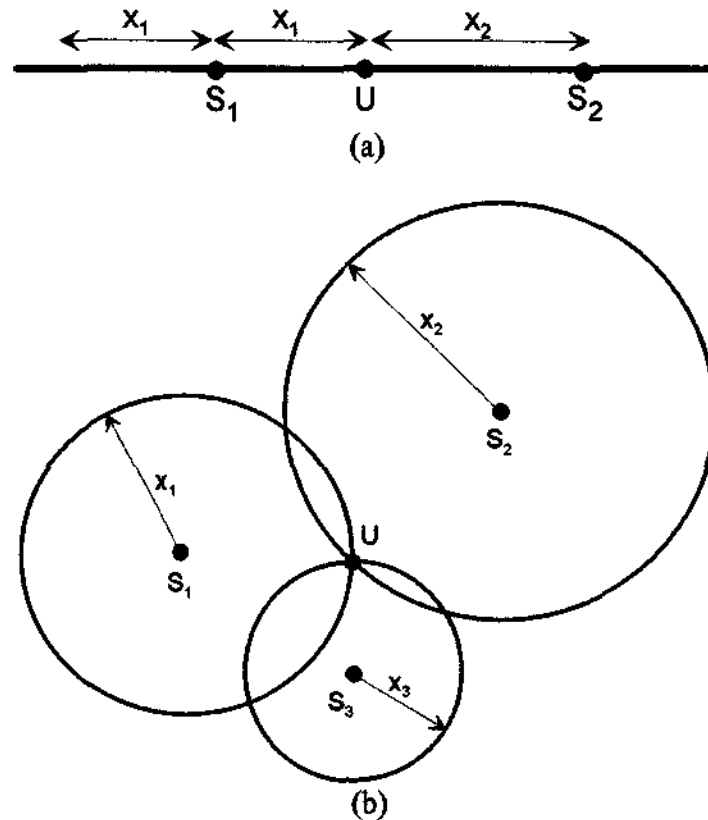


Fig. 4.3 – Posicionamento (a) unidimensional e (b) bidimensional de um usuário U .

FONTE: Figura adaptada de Rodrigues 2003.

Por razões similares, quatro satélites e quatro distâncias são necessárias para o caso de posicionamento tridimensional como o realizado pelo GPS. Neste caso, conhecendo-se a posição do satélite S_i e a distância x_i do usuário até ele, as possíveis posições do usuário são definidas pela superfície da esfera de raio x_i ao redor da posição do satélite S_i . A intersecção de duas superfícies esféricas define uma circunferência. A intersecção desta circunferência com uma terceira superfície esférica define dois pontos. Destes dois pontos, apenas um situa-se próximo à superfície terrestre e define a posição do usuário.



Um quarto satélite é necessário para corrigir a diferença de tempo entre os relógios do satélite e receptor.

4.5 RECEPTORES GPS

Atualmente, existe uma diversificada variedade de receptores GPS os quais possuem características próprias e são utilizados em variadas áreas específicas, por exemplo, geodésia, atividades militares, origem do sistema, além da fundamental a navegação. Os receptores GPS genéricos apresentam os seguintes elementos:

- Antena;
- Pré-amplificador;
- Oscilador de referência;
- Sintetizador de frequência;
- “*Downconverter*”;
- Seção de frequência intermediária (FI);
- Processamento de sinais;
- Processamento aplicado.

De acordo com Rodrigues 2003, a descrição resumida de cada elemento do GPS:

A antena pode consistir de um ou mais elementos e eletrônica associada e pode ser ativa ou passiva, dependendo da exigência de performance. Sua função é receber os sinais GPS rejeitando sinais que sofreram multi-caminho e interferência. O multi-caminho acontece quando um sinal reflete em um obstáculo e então chega à antena.

O pré-amplificador consiste de uma proteção, filtro e amplificador de baixo ruído. O oscilador de referência fornece a referência de tempo e frequência para o receptor. O oscilador de referência pode ser considerado a peça principal do receptor, já que as medidas GPS são baseadas no tempo de chegada do código PRN e também na informação de fase e frequência dos sinais GPS.



A saída do oscilador de referência é utilizada no sintetizador de frequência, do qual se derivam os osciladores locais (OL's) e relógios utilizados pelo receptor. Um ou mais destes OL's são utilizados pelo "downconverter" para converter as entradas de radiofrequência (RF) em frequências intermediárias (FI) que são então processadas pela seção de FI do receptor. O objetivo da seção de FI é fornecer uma melhor filtragem do sinal e aumentar a amplitude do sinal até um nível operacional. A seção de FI pode conter também um circuito de controle automático de ganho, AGC, para controlar o nível operacional, fornecer uma faixa de amplitude operacional adequada e suprimir interferência do tipo pulso.

A seção de processamento de sinal é a alma de um receptor GPS realizando funções tais como:

- Distribuir o sinal nos canais para processamento simultâneo de vários satélites;
- Gerar os códigos PRN de referência dos sinais de vários satélites;
- Adquirir os sinais dos satélites;
- Rastrear o código e portadora dentro dos sinais;
- Demodular os dados dos sinais;
- Extrair medidas de fase do código PRN (pseudo-distância) dos sinais;
- Extrair medidas de frequência e fase dos sinais;
- Extrair informação da razão sinal-ruído, SNR, dos sinais;
- Dentre outras.

As saídas da seção de processamento de sinais são as pseudo-distâncias, medidas de fase e frequência, SNR's, informações de cada um dos satélites rastreados, etc.. Estas saídas são então utilizadas pela seção de processamento aplicado que também controla a seção de processamento de sinais e utiliza suas saídas para realizar tarefas que variam de aplicação para aplicação. Apesar do GPS ser, em primeiro lugar, um sistema de navegação por satélite, as aplicações de um receptor GPS são diversas, como por exemplo:



- Navegação;
- Transferência de tempo e frequência;
- Medidas de conteúdo eletrônico total (CET);
- Medidas de cintilações de fase e amplitude;
- Receptores para estações diferenciais GPS (DGPS);
- Monitoramento da integridade do sinal GPS;
- Dentre outras.

A ligação comum entre estas aplicações é que elas usam as mesmas medidas, de uma forma ou de outra. Contudo, devido às diferentes exigências de largura de banda e precisão impostas para cada tipo de aplicação, os requisitos da seção de processamento de sinais são diferentes.

5.1 CINTILAÇÕES IONOSFÉRICAS

Em 1946 foram observadas, pela primeira vez, flutuações irregulares de curto período de tempo na intensidade da radiação na banda de rádio (64 MHz) emitida pela estrela Cygnus (Hey *et al.*, 1946). Inicialmente, considerou-se que as flutuações eram inerentes à fonte de emissão. Observações posteriores indicaram que não existia correlação entre flutuações registradas em duas estações espaçadas 210 km, enquanto que se observou boa correlação para uma separação de 4 km. Isto sugeriu que o fenômeno seria produzido localmente, provavelmente pela atmosfera terrestre. Observações subsequentes confirmaram as especulações e isto marcou a primeira observação do fenômeno de cintilação ionosférica (Rodrigues, 2003). Atualmente, as cintilações podem ser definidas como perturbações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades de densidade eletrônica, e conseqüentemente de índice de refração.

Em 1957 tornou-se possível a observação de cintilações ionosféricas, devido sinais emitidos pelo primeiro satélite artificial, lançado neste mesmo ano. O interesse no estudo deste fenômeno tem continuado com dois objetivos principais, um científico e outro prático. Do ponto de vista científico, os dados de cintilação fornecem informações sobre a ocorrência das irregularidades ionosféricas, cuja climatologia ainda não é totalmente compreendida. Do ponto de vista prático, o estudo da cintilação está diretamente relacionado a problemas de estabilidade de enlaces de comunicação e navegação por satélite.

De acordo com Rodrigues (2003), o estudo de teorias que explicassem as cintilações iniciou com a consideração de que o meio pelo qual o sinal de rádio se propaga seria equivalente à uma tela de difração, “*diffracting screen*”, com irregularidades aleatórias de densidade que não se deformam e que se movem com direção e velocidade fixas. Se a região de difração é suficientemente fina, as variações na frente de onda emergente estarão presentes somente na fase e não na amplitude do sinal. À medida em que a onda



se propaga além da região de difração, as flutuações em amplitude começam então a surgir.

Inicialmente, esta aproximação foi utilizada em diversos casos tais como os de uma tela de difração unidimensional e de uma tela de difração bidimensional. Logo em seguida, considerou-se o caso de uma tela de difração espessa tri-dimensional. Referências de trabalhos que consideraram diferentes aproximações para a tela de difração podem ser encontradas no Apêndice A de Kelley (1989). Os casos prévios foram então revistos por Salpeter (1967) que estendeu a teoria a importantes regimes que não haviam sido considerados e derivou condições suficientes para validação da aproximação de uma tela fina de difração, “*thin phase screen*”.

Para o caso de espalhamento fraco causado por uma tela fina de difração, o espectro de potência das flutuações de densidade deve ser multiplicado por uma função que depende da altura da camada de irregularidades e da frequência da onda incidente o que produziria o espectro de potência das cintilações observadas. Sob estas aproximações, o espectro de potência da cintilação é uma versão linearmente filtrada do espectro de potência das flutuações de densidade. A função multiplicadora, conhecida como filtro de Fresnel age como um filtro passa alta (Kelley, 1989) e apresenta mínimos em pontos proporcionais à raiz quadrada de números inteiros de frequência. Recentemente, Bhattacharyya *et al.* (2001) encontrou tais mínimos de Fresnel, em espectros de potência de cintilações em sinais VHF. Os mínimos de Fresnel não são observados quando a camada de irregularidades é espessa.

Matematicamente a teoria das cintilações é amplamente demonstrado em Yeh e Liu (1982). Já sobre cintilações com enfoque à sua aplicação no estudo das irregularidades ionosféricas pode ser encontrada em Aarons (1982). É importante salientar que a maioria das teorias consideram apenas o caso de espalhamento fraco. Teorias para explicar matematicamente o caso de espalhamento forte ainda estão em desenvolvimento.

5.1.2 O ÍNDICE DE CINTILAÇÃO (S_4)

O índice de cintilação S_4 vem sendo utilizado para quantificar a magnitude das cintilações em amplitude de sinais trans-ionosféricos e é definido em termos da intensidade (I) do sinal recebido, como mostra a Equação (5.1), (Yeh e Liu, 1982):

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (5.1)$$

É possível mostrar, a partir da Teoria para Cintilação Fraca, que o índice S_4 está relacionado ao desvio de densidade do plasma ionosférico (ΔN) ao longo do caminho de propagação do sinal e à espessura da camada de irregularidades ionosféricas (L), pela seguinte expressão (Yeh e Liu, 1982):

$$S_4^2 \cong 8\pi^2 r_e^2 \lambda^2 L \iint \left[1 - \frac{2k}{k_{\perp}^2 L} \sin\left(\frac{k_{\perp}^2 L}{2k}\right) \cos\left(\frac{k_{\perp}^2}{k} \left(k - \frac{L}{2}\right)\right) \right] \Phi_{\Delta N}(\vec{k}_{\perp}, 0) d^2 k_{\perp} \quad (5.2)$$

onde r_e é o raio do elétron, λ é o comprimento de onda do sinal e $\Phi_{\Delta N}(\vec{k}_{\perp}, 0)$ é o espectro tridimensional da flutuação de densidade ΔN com $k_z = 0$ e k_{\perp} está na direção perpendicular à propagação da onda. A integral na Equação (5.2) indica que a contribuição para a cintilação, das irregularidades de diversos números de onda (k), é ponderada por uma função filtro espacial, isto é, a expressão em colchetes na Equação (5.2).

A Equação (5.2) não é facilmente interpretável e trabalhos de modelagem das cintilações, como o realizado por Basu e Basu (1980) apresentam equações mais simples nas quais, tanto as cintilações em amplitude quanto em fase são expressas em quantidades que podem ser obtidas experimentalmente. Contudo, apesar de explicar muitas das características das cintilações, estas equações não podem explicar fenômenos mais complexos observados e, por esta razão, modelos computacionais têm sido

desenvolvidos (por exemplo, Fremouw e Secan, 1984; Secan *et al.*, 1995). Fremouw e Secan (1984) já incluem o efeito de foco que ocorre nas cintilações e que dá origem a valores de $S_4 > 1$ (Singleton, 1970).

Basu e Basu (1980) utiliza a Equação (5.3) para modelagem das cintilações equatoriais e inclui os principais parâmetros responsáveis pela cintilação em amplitude.

$$S_4^2 = 8\pi^2 (r_e \lambda)^2 L \sec\theta < \Delta N^2 > \frac{\lambda z \sec\theta}{4\pi} k_o F \quad (5.3)$$

Além da dependência do S_4 com relação ao desvio RMS médio (ΔN) de densidade ao longo do caminho de propagação do sinal e com relação à espessura da camada de irregularidades (L), Basu e Basu (1980) deixaram evidente a dependência do índice S_4 com relação à altura (z) da camada, ao ângulo de zênite (θ) do sinal na altura da camada de irregularidades e ao comprimento de onda do sinal (λ). F é um fator relacionado à geometria das irregularidades e k_o se refere ao menor número de onda que contribui para a cintilação.

De acordo com Kintner *et al.* (2001), a magnitude da cintilação depende da distribuição espacial e da amplitude das irregularidades de densidade. Contudo, a escala de tempo do desvanecimento, “*fading*”, depende da velocidade das irregularidades e de uma escala espacial conhecida como comprimento de Fresnel, o qual, em primeira ordem, depende somente do comprimento de onda do sinal GPS e da distância às irregularidades ionosféricas.

De acordo com Salpeter (1967), para o caso de espalhamento fraco, o espectro de potência horizontal da intensidade do sinal tem a seguinte forma:

$$\varphi_1(k) = 4\Phi_\varphi(k) \sin^2 \left(\frac{k^2 r_F^2}{4\pi} \right) \quad (5.4)$$

onde k é o número de onda horizontal, r_F é o comprimento de Fresnel ($r_F = \sqrt{\lambda d}$, onde d é a distância até a camada espalhadora e λ é o comprimento de onda do sinal), e $\Phi_\varphi(k)$ é a densidade espectral de potência das irregularidades que causam o espalhamento. Tipicamente, $\Phi_\varphi(k)$ decresce rapidamente com o aumento de k (Basu e Basu, 1993), de forma que o primeiro máximo na função \sin^2 domina o espectro de potência. Isto significa que o espectro de potência mostrará um número de onda dominante dado por:

$$k = \frac{\sqrt{2}\pi}{r_F} \quad (5.5)$$

Ou,

$$\lambda_F = \sqrt{2}r_F \quad (5.6a)$$

Mas como $r_F = \sqrt{\lambda d}$, tem-se que:

$$\lambda_F = \sqrt{2\lambda d} \quad (5.6b)$$

Considerando que a camada de irregularidades se encontra a uma distância $d = 350$ km e que o satélite encontra-se no zênite, pode-se dizer que as irregularidades que mais contribuem para a cintilação em sinais GPS, L1 = 1,57542 GHz, são as irregularidades com escalas de tamanho de aproximadamente $\lambda_F = 400$ metros.

Interpretação matemática retirada de Rodrigues, 2003.

5.1.3 O ÍNDICE S_4 CALCULADO PELOS RECEPTORES SCINTMON

De acordo com Beach (1998), o procedimento computacional para o cálculo do S_4 realizado pelo programa de redução de dados dos receptores SCINTMON, que serão realizados neste estudo, pode ser resumido da seguinte forma: utiliza-se um filtro passa-baixas com frequência de corte em 0,1 Hz, de modo a obterem-se valores médios locais do canal de potência em banda larga P_k e do canal de ruído em banda larga N_k , onde k é o número da amostra numérica. Estes valores filtrados de P_k e N_k são denotados por

$\langle P \rangle_k$ e $\langle N \rangle_k$, respectivamente. Definiu-se então a variância da intensidade de sinal para o intervalo de um minuto a partir de:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (P_k - \langle P \rangle_k)(P_{k-1} - \langle P \rangle_{k-1}) \quad (5.7)$$

Onde $M = 3000$ é o número de amostras por minuto enquanto que P_0 e $\langle P_0 \rangle$ são definidos como os valores finais de potência e potência média do intervalo de 1 minuto anterior. Além disso, determina-se a potência média sobre o mesmo período a partir de:

$$\hat{S} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\langle P \rangle_k - \langle N \rangle_k) \quad (5.8)$$

A partir destas definições o índice de cintilação para o devido intervalo de 1 minuto torna-se (Beach, 1998):

$$S_4 = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}{\hat{S}} \quad (5.9)$$

Pode-se observar pela Equação (5.9) que o índice S_4 também pode ser interpretado como o desvio padrão normalizado pela potência média do sinal. A Figura 5.2 mostra um exemplo de sinal amostrado por um receptor SCINTMON e os valores de S_4 calculados para este caso. Observa-se que os valores de S_4 aumentam à medida em que a flutuação do sinal (cintilação) também aumenta. O índice S_4 ilustrado neste exemplo foi calculado por um dos receptores SCINTMON utilizados neste trabalho e que serão descritos posteriormente.

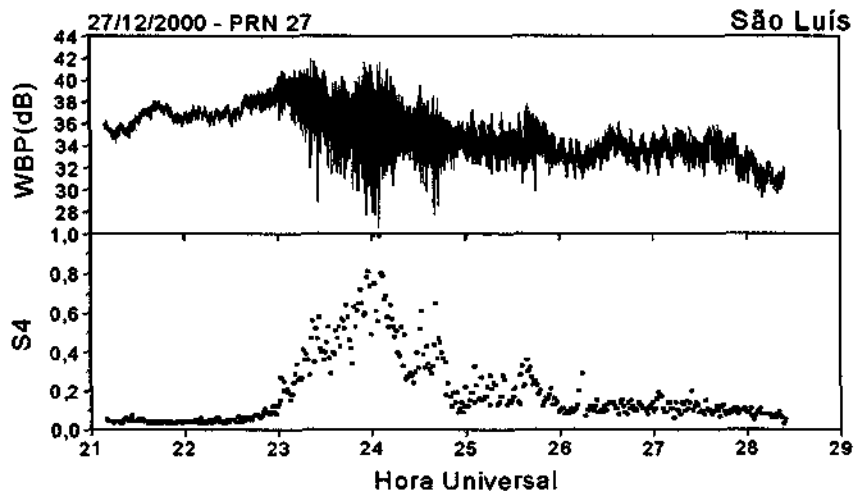


Fig. 5.2 - Exemplo de cintilação e correspondentes valores de S_4 calculados para intervalos de 1 minuto.

CAPÍTULO 6

INSTRUMENTAÇÃO

6.1 MONITORES DE CINTILAÇÃO – SCINTMON

Atualmente, a Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE - MCT, em colaboração com a Universidade de Cornell, EUA, mantém 13 receptores GPS instalados em 8 pontos de observação distribuídos no Território Brasileiro. Estes receptores são monitores de cintilação em amplitude, SCINTMON, da portadora L1 transmitida pelos satélites GPS (Beach e Kintner, 2001). A Figura 6.1a mostra a distribuição dos receptores SCINTMON sobre o Território Brasileiro e a Tabela 6.1 indica as coordenadas das estações GPS cujos dados serão utilizados.

O receptor SCINTMON, Figura 6.1b, foi implementado a partir de uma placa ISA de desenvolvimento, GEC Plessey GPS Builder-2TM, e é capaz de amostrar simultaneamente sinais de até 11 satélites. Somente são coletados dados de satélites com elevação maior que 10 graus. A potência em banda larga, “*Wide Band Power*” – WBP, de L1, 1,57542 GHz, transmitida pelos satélites GPS é amostrada a uma taxa de 50 Hz.

O programa computacional de controle do SCINTMON permite ao usuário definir um modo de operação no qual o sistema opera de forma automática. O usuário apenas deve definir o horário de início e fim da gravação dos dados. Como as irregularidades formam-se no período do anoitecer e permanecem até aproximadamente meia-noite local, com exceção de períodos magneticamente perturbados quando pode-se observar cintilações durante toda a noite até o amanhecer, definiu-se o período de observação entre as 18:00 e 06:00 horas locais para todas as estações de observação.

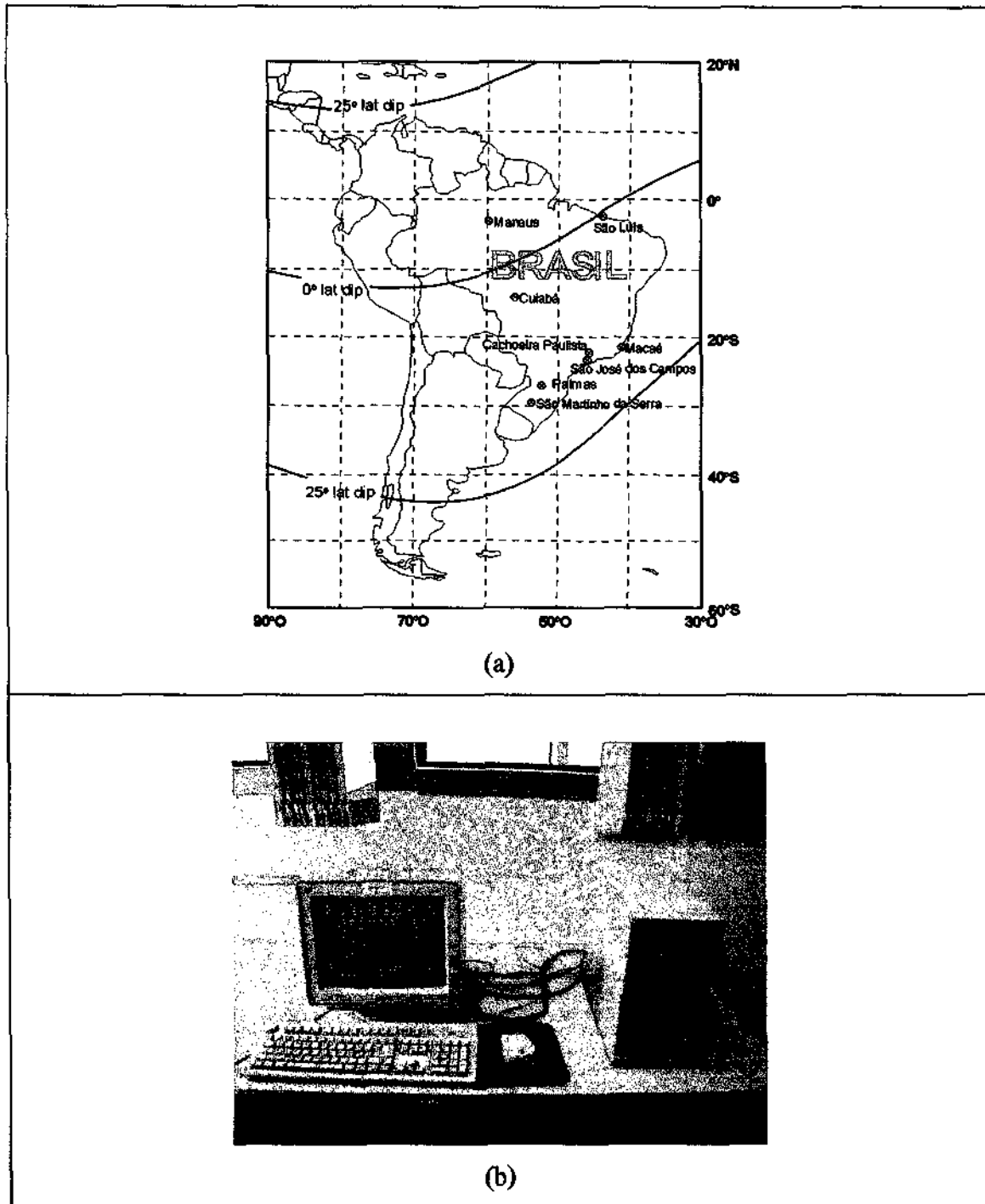


Fig. 6. 1 – (a) Distribuição dos receptores SCINTMON sobre o Território Brasileiro, (b) Estação S instalada no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em São Martinho da Serra, RS.



A cada noite de observação são gerados dois arquivos pelo SCINTMON: o primeiro é um arquivo binário de extensão “.fsl” que contém a informação de amplitude do sinal captado de todos os satélites rastreados pelo sistema durante a noite e o segundo é um arquivo texto, ASCII, de extensão “.n”, com informações gerais sobre os satélites rastreados. A partir dos arquivos “.fsl” e “.n” é gerado um terceiro arquivo sumário, extensão “.sum”, que contém informações à taxa de 1 minuto sobre a posição dos satélites, potência do sinal recebido e índice de cintilação, índice S_4 , além de outras informações referentes ao sinal GPS, que estão detalhados no Apêndice A.

ESTAÇÃO	LAT. GEOG.	LONG. GEOG.	DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	DIP LAT.
S. Martinho da Serra	29,28° S	53,82° O	12,90° O	-18,57
S. J. dos Campos	23,07° S	45,86° O	20,03° O	-18,01
Cachoeira Paulista	22,57° S	45,01° O	20,54° O	-18,12
Palmas	26,36° S	51,98° O	15,36° O	-17,27
Cuiabá	15,45° S	56,07° O	14,98° O	-6,56
São Luís	02,57° S	44,21° O	20,74° O	-1,73
Manaus	03,08° S	59,97° O	13,96° O	+5,79

Tabela 6.1 – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES GPS

FONTE: (Rodrigues, 2003).

Exemplos de dados obtidos com o SCINTMON e gravados nos arquivos sumários para os satélites rastreados pelo receptor instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, estão mostrados nas Figuras 6.2 e 6.3.

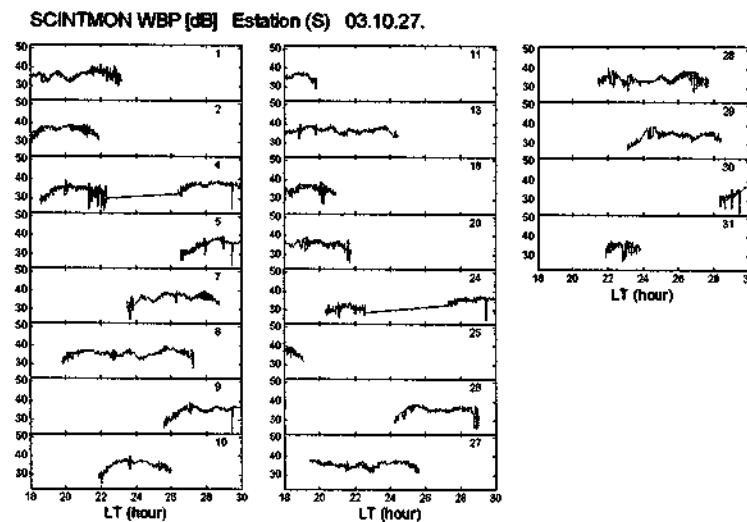


Fig. 6.2 - Os diversos painéis mostram os valores de potência em banda larga de sinal recebido, WBP em decibéis, para os satélites rastreados na noite de 27/10/2003 para 28/10/2003. O PRN, identificação, de cada satélite é indicado no canto superior direito de cada painel, observados no Observatório Espacial do Sul, RS.

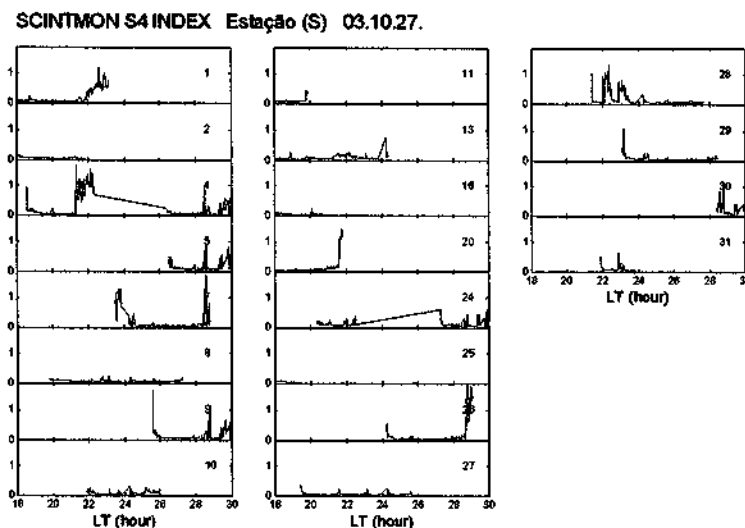


Fig. 6.3 - Os diversos painéis mostram os valores do índice S_4 , calculado para os sinais mostrados na Figura 6.2. Valores de S_4 acima de 0.2 estão associados à irregularidades.

CAPÍTULO 7

METODOLOGIA, DADOS E ATIVIDADES EXTRAS

7.1 METODOLOGIA

O Acadêmico desenvolveu este Projeto de Pesquisa nas dependências do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE–MCT, em Santa Maria, RS. No Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE–MCT, em São Martinho da Serra, Prédio 2, Figura 7.1, onde foram instaladas duas estações, S e T, do Sistema GPS, no âmbito da Parceria INPE – Cornell University.



Fig. 7.1 – Prédio 2 do Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS onde se encontra as estações GPS instaladas, no âmbito da Parceria INPE – Cornell University.

Primeiro foi feita uma criteriosa revisão bibliográfica exposta ao longo deste Relatório, após realizou-se uma seleção de dias magneticamente perturbados usufruindo dos índices magnéticos Dst e Kp. Em seguida foi feita uma escolha de 3 estações GPS expostas na Tabela 6.1, no sentido de efetuar estudos objetivando o entendimento da morfologia na Ionosfera em períodos com incidência de tempestades magnéticas. Estes

dados foram deduzidos através de programas desenvolvidos na linguagem de programação Matlab[®] por Rodrigues (2003).

7.2 SELEÇÃO DO PERÍODO DE DADOS ANALISADOS

No intuito de selecionar período com características semelhantes, foi selecionado com fluxo solar em 10.7 cm, Figura 7.2, que por sua vez pode ser utilizado como um indicativo do nível de atividade solar (McNamara, 1991). Após uma análise da disposição dos dados das estações GPS decidiu-se selecionar períodos que estivessem dentro do período da vigência deste Trabalho ou seja entre agosto de 2003 e julho de 2004. Assim foram selecionados alguns dias magneticamente calmos e perturbados, conforme mostrado na Tabela 7.1. a qual consta de um solstício (junho de 2003) e de um equinócio (outubro de 2003), em função do índice planetário Kp e do índice Dst, que estão mostrados na Figura 7.3.

Mês	Condição Magnética	
	Dias Calmos	Dias Perturbados
Junho	04 e 08	02, 16 e 19
Outubro	08 e 12	01 e 02, 13 e 31

Tabela 7.1 – Nível de atividade magnética para os dias analisados do ano 2003.

Para o período magneticamente calmo, início de junho de 2003, foi selecionado um mesmo satélite em 2 estações GPS localizadas em São Luís, Ma, estação I, São José dos Campos, SP, estação C (Figura 7.4). No período magneticamente perturbado, final de outubro de 2003, foi selecionado um mesmo satélite em 3 estações GPS, as quais I e C mais a estação S, localizada em São Martinho da Serra, RS (Figura 7.5), com o objetivo de estudar os efeitos da tempestade magnética nas cintilações ocorridas no sinal do GPS.

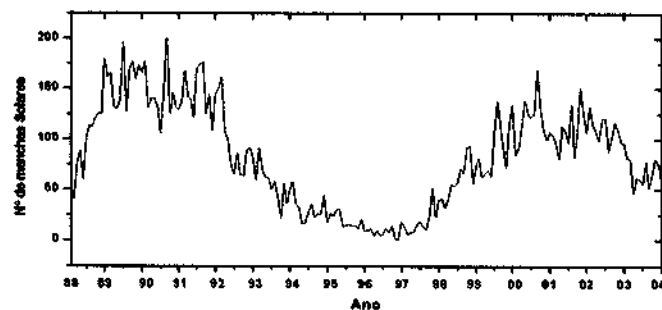


Fig. 7.2 – Variação do fluxo solar em 10.7 cm, entre Janeiro/1988 e Dezembro/2003.

FONTE: Dados de NGDC/NOAA

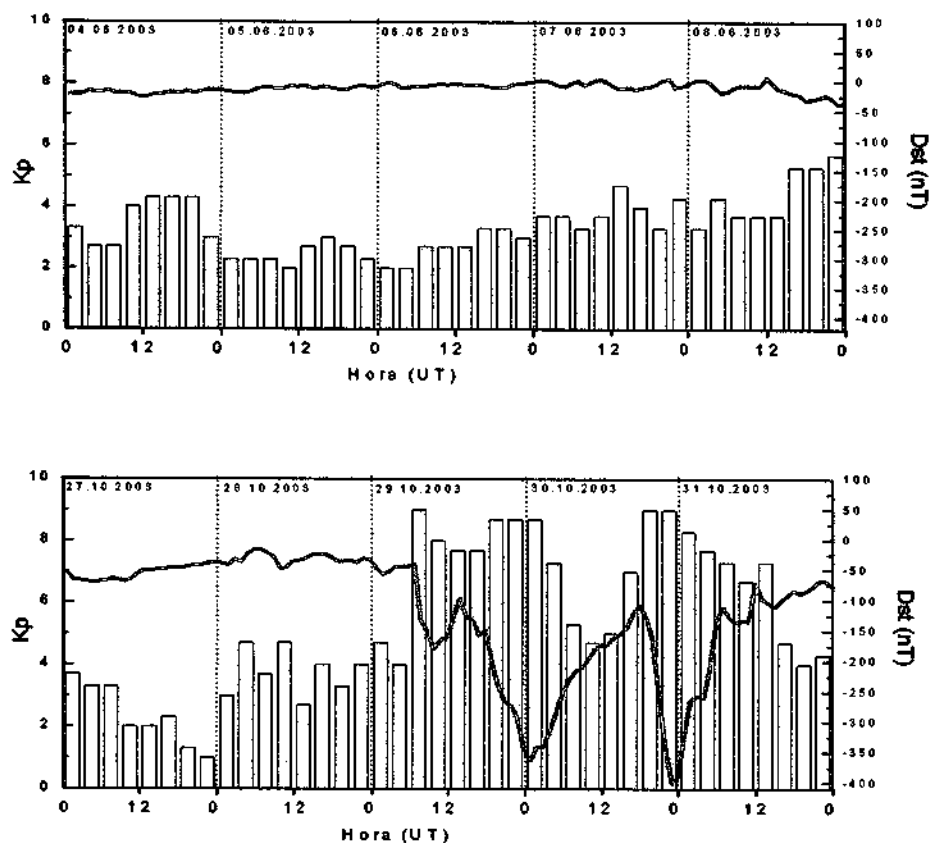


Fig. 7.3 – Variação dos índices Kp e Dst entre os dias 04 e 08 de junho, 27 e 31 de outubro de 2003.

FONTE: Dados Kp de NGDC/NOAA; Dados Dst de Geomagnetic Data Service (KYOTO).

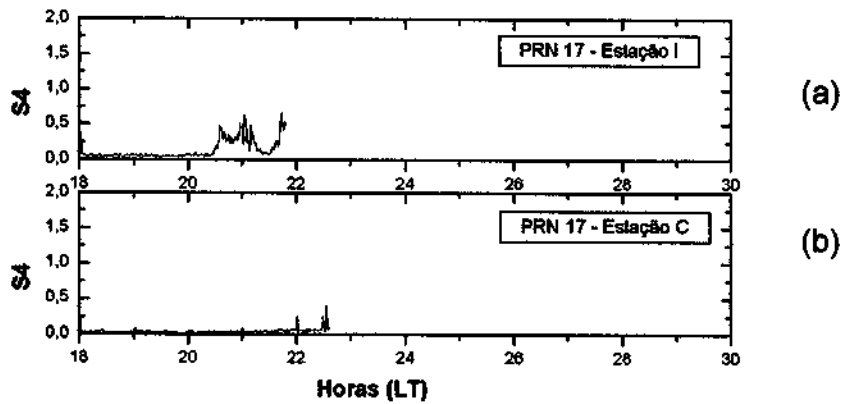


Fig. 7.4 – Variação do índice S4 do satélite PRN 27 para as estações GPS de (a) - São Luís, MA, e (b) - São José Campos, SP, para o dia 06.06.03 sem atividade magnética.

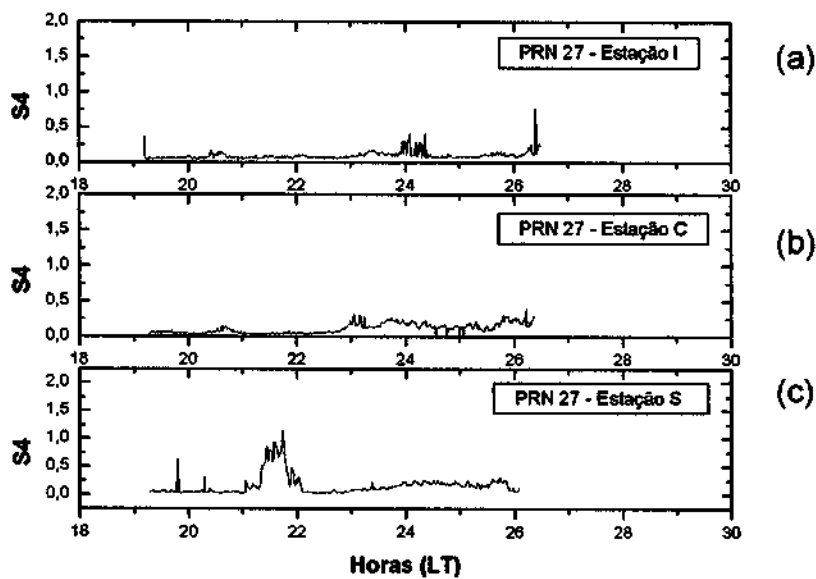


Fig. 7.5 – Variação do índice S4 do satélite PRN 27 para as estações GPS de (a) - São Luís, MA, (b) - São José Campos e (c) - São Martinho da Serra respectivamente para o dia 29.10.03 com incidência de tempestade magnética.



7.3 ATIVIDADE EXTRAS DO ACADÊMICO

O Acadêmico durante o período do Projeto de Iniciação Científica interagiu com pesquisadores japoneses em estudos de geofísica básica através da Cooperação Brasil – Japão. Desenvolveu sua liderança de equipe como responsável a nível discente do Laboratório de Ionosfera Rádio Propagação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS.

No período do Projeto, o bolsista participou de palestras, cursos e congressos, os quais são listados a seguir. Os certificados encontram-se no Apêndice B.

7.3.1 CURSOS

1 - Título: Tópicos em Clima Espacial

Local: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria - RS

Ministrante: Dr. Alisson Dal Lago, Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira, Msc. Alan Prestes, pesquisadores do INPE, São José dos Campos

Período: 5 a 8 de agosto de 2003

Carga horária: 32 horas

2 - Título: Rádio Sondagem Atmosférica

Local: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria - RS

Ministrante: Dr. Martín F. Sarango, pesquisador do Jicamarca Radio Observatorio (JRO), Lima – Peru.

Período: 8 de agosto de 2003

Carga horária: 9 horas



3 - Título: Curso Tópicos em Observações Científicas da Cooperação Brasil-Japão

Local: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria - RS

Ministrante: Dr. Kazuo Makita, Dr. Masahori Nishino e Dr. Tatsuo Torii.

Período: 22 de agosto de 2003

Carga horária: 8 horas

4 - Título: First Latin-American Advanced School on Space Environment (ASSE 2004)

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos - SP

Ministrantes: R. P. Kane, X. Moussas, M.A. Abdu, P. M. Kintner, D. O. Gómez, R. Bruno, V. Jatenco-Pereira, D. Nordemann, O. Mendes Jr, J. F. Valdés-Galícia, J. P. Raulin, M. Kayano, M. O. Domingues, J. A. Valdivia, E. L. Rempel, E. M. Gouveia dal Pino, B. R. Clemesha, D. Marsh, B. Mendoza, S. Dasso, W. D. Gonzalez.

Período: 22 a 27 de março de 2004

Carga horária: 40 horas

7.3.2 CONGRESSOS

O bolsista participou de congressos, os quais são listados a seguir. Os certificados encontram-se no Apêndice B, somente certificados de apresentador, de trabalho científicos.

1 - Título: Riômetro Imageador Utilizado para o Monitoramento Ionosférico no Observatório Espacial do Sul – SSO (29°S, 53°O)

Autores: Maiquel S. Canabarro, Rafael Krummner, Henrique C. Aveiro, Evanir N. Valigura, Masanori Nishino, Nelson J. Schuch

Evento: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia – IV Feira de Protótipos

Local: Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí - SC

Período: 9 a 11 de outubro de 2003



2 - Título: Estudo da Ionosfera Terrestre Utilizando o Digital Portable Sounder

Autores: Henrique C. Aveiro, Rafael Krummenauer, **Maiquel S. Canabarro**, Clezio Marcos Denardini, Mangalathayil Ali Abdu, Nelson Jorge Schuch, Thiago Brum Pretto

Evento: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia – IV Feira de Protótipos

Local: Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí - SC

Período: 9 a 11 de outubro de 2003

3 - Título: Projeto de um Correlacionador Híbrido para o Telescópio Rádio Interferômetro

Autores: Rafael Krummenauer, Delx C. Lunardi, Noli J. Kozenieski, Thiago B. Pretto, Henrique C. Aveiro, **Maiquel S. Canabarro**, Nelson J. Schuch

Evento: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia – IV Feira de Protótipos

Local: Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí - SC

Período: 9 a 11 de outubro de 2003

4 - Título: Utilização de receptores GPS para estudos das irregularidades ionosféricas no Observatório Espacial do Sul

Autores: **Maiquel S. Canabarro**, Nelson J. Schuch , Evanir N. Valigura , Henrique C. Aveiro, Rafael Krummenauer

Evento: XVIII Jornada Acadêmica Integrada - JAI

Local: Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria - RS

Período: 14 a 16 de outubro de 2003

5 - Título: Receptores GPS Aplicados no Estudo de Irregularidades Ionosféricas

Autores: **Maiquel S. Canabarro**, Eurico R. de Paula, Henrique C. Aveiro, Rafael Krummenauer, Thiago B. Pretto, Evanir N. Valigura, Kazuo Makita, Nelson J. Schuch

Evento: Salão de Iniciação Científica

Local: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre - RS



Período: 24 a 28 de novembro de 2003

6 - Título: Effects of the October 2003 Magnetic Storm over GPS scintillations at three sites in the Brazilian Territory

Autores: Canabarro, M. S., H. C. Aveiro, T. B. Pretto, R. Krumenauer, D. dos Santos, S. Monteiro, Luiz Felipe C. de Rezende, Sérgio W. G. da Silveira, E. R. de Paula, N. J. Schuch

Evento: VII Latin-American Conference on Space Geophysics

Local: Hotel Village Eldorado Atibaia, Atibaia - SP

Período: 29 de março a 2 de abril de 2004



CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

Durante os estudos das irregularidades ionosféricas O sistema GPS se mostrou um equipamento eficaz para os estudos das irregularidades ionosféricas. Foram selecionadas 3 estações da rede do sistema GPS no Brasil para este estudo. Observou-se que em 2 duas estações, de São Luís, MA e São José dos Campos, SP (Figura 7.4), em dias magneticamente calmos as cintilações ocorrem devido a anomalia equatorial, não se prolongando tanto latitudinalmente como em dias magneticamente perturbados, onde chega atingir até o sul do Brasil, constatado na estação S do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS (Figura 7.5). Estas observações dão evidência do deslocamento da crista da Anomalia Equatorial para latitudes maiores devido à penetração no equador de um intenso campo elétrico da Magnetosfera para o leste durante esta tempestade. Durante tempestades a crista de Anomalia Equatorial chega alcançar o sul do Brasil e seus efeitos são Observados em São Martinho Serra, RS, aumentando a ionização ionsférica, e as amplitudes de cintilação (de a Paula al et, 2003). Como a ionização se afasta do Equador onde as latitudes são mais baixas durante as tempestades as amplitudes de cintilação em Cuiabá e São Luís são menores.

Com o desenvolvimento do Projeto teórico e prático e com a revisão das referências bibliográficas relacionadas neste Trabalho, fez com que o Acadêmico tivesse uma visão do seu Curso aplicado ao estudo da Geofísica Espacial, área esta que se mostra amplamente favorável para a aplicação dos conhecimento técnicos da Engenharia Elétrica, no sentido de melhoramentos da eficiência de equipamentos utilizados para as aquisições de dados pertinentes e rádio propagação.



8.1 AGRADECIMENTOS

O Bolsista aproveita este Relatório para manifestar seu agradecimento ao Coordenador do programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT Dr. Luiz Carlos Gadelha de Souza, por ter acreditado nas potencialidades do Acadêmico para o desenvolvimento deste Projeto Técnico-Científico, o qual permitiu ao Aluno interagir com assuntos técnicos de alta relevância. Agradece ao seu Orientador Dr. Pesquisador Eurico Rodrigues de Paula, Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE-MCT, em São José dos Campos, SP e seu co-orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, Coordenador da Ação 1275, de Implantação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, pela confiança deposita e pela orientação, não só a nível acadêmico mas também a nível pessoal/profissional. Um abraço fraterno a Dr. Damaris Kirsch Pinheiro, Diretora do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, e ao seus colegas de Laboratório, e em especial aos colegas Diego dos Santos, Henrique Aveiro Carloto, Rafael Krummenauer e Thiago Brum Pretto e ao Funcionário da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Fermino Nascimento, pelo apoio ao longo do Projeto.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aarons, J. Global morphology of ionospheric scintillations. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, n. 4, p. 360-378, Abr. 1982.
- Banks, P. M.; Kocharts, G. **Aeronomy: Part B**. New York: Academic, 1973. 355 p.
- Basu, S.; Basu S. Modeling of equatorial phase and amplitude scintillations from OGO-6 and AE irregularity data. **Low Latitude Aeronomical Processes, COSPAR Symposium Series**, v. 8, p. 187-199, 1980.
- Basu, S.; Basu, S. Ionospheric sctructures and scintillation spectra. In: Tatarskii, V. I.; Ishimaru, A.; Zavorotny, V. U. ed. **Wave propagation in random media (scintillation)**, Soc. for Opt. Eng.; Bellingham, Wash and Institute of Physics Publishing; 1993, p. 139-155.
- Beach, T. L. **Global Positioning System Studies of Equatorial Scintillations**. Ithaca. 335 p. Tese (Doutorado) - Cornell University, 1998.
- Beach T. L.; Kintner, P. M. Development and Use of a GPS Ionospheric Scintillation Monitor. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 5, p. 918-928, May 2001.
- Beard, E. D. **A background report on total electron content measurements**. Illinois: Hq Air Force Weather Service (MAC), 1975. 23 p. (AWS-TR-75-260).
- Bhattacharyya, A.; Basu, S.; Groves, K. M.; Valladares C. E.; Sheehan, R. Dynamics of equatorial F region irregularities from spaced receiver scintillation observations. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 1, p. 119-122, 2001.



Dana, P. H. **Global Positioning System Overview** [online].
<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>. Aug. 2002.

Davies, K. **Ionospheric radio**, London: Peter Peregrinus LTD., 1990. 580 p.

de Paula, E. R. **Resposta da região F ionosférica às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil**. São José dos Campos. 210 p. (INPE-4106-TDL/259). Tese (Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto de Pesquisas Espaciais, 1987.

de Paula, E. R.; Rodrigues, F. S.; Iyer, K. N.; Kantor, I. J.; Abdu, M. A.; Kintner, P. M.; Ledvina, B.; Kil, H. Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil. **Advances on Space Research**, v.31, No. 3, 749-754, 2003.

Doherty, P. H.; Dehel, T.; Klobuchar, J. A.; Delay, S. H.; Datta-Barua, S.; de Paula, E. R.; Rodrigues, F. S. Ionospheric effects on low-latitude space based augmentation systems. In: ION GPS, Portland-Oregon, 2002. **Proceedings: Institute of Navigation**, 2002.

Dungey, J. W. Convective diffusion in the equatorial F – region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.9, n. 5-6, p. 304-310, 1956.

Farley, D. T.; Bonneli, E.; Fejer, B. G.; Larsen, M. F.; The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**. v. 91, n. A12, p. 3723-3728, Dec. 1986.

Fedrizzi, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. São José dos Campos. 123 p. (INPE-7259-TDI/703). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.



Fremouw, E. J.; Secan J. A. Modeling and scientific application of scintillation results. **Radio Science**, v. 19, n. 3, p. 687-694, May-Jun. 1984.

Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A. ; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, 1994.

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ). Geomagnetic Kp Index. Disponível em: <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/kp.html>. jul. de 2003.

Graduate School of Science, Kyoto University (KYOTO). **Geomagnetic Data Service**. [online]<<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/prov.html>> Mar. 2004.

Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Hey, J. S.; Parsons, S. J.; Phillips, J. W. Fluctuations in cosmic radiation at radiofrequencies. **Nature (London)**, v. 158, p. 247, 1946.

Kamei, T.; Sugiura, M.; Araki, T. **On AE index (description in the data book No25)**. [online]. <http://swdcdbd.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae2/onAEindex.html>, 28 september 2000.

Kelley, M. C. **The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**, San Diego: Academic Press, 1989. 484 p.

Kintner, P. M.; Kil, H.; Beach, T. L.; de Paula, E. R. Fading timescales associated with GPS signals and potential consequences. **Radio Science**, v. 36, n. 4, p. 731-743, 2001.



- Klobuchar, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: AIAA, 1996. Cap. 12, p. 485-515. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).
- McNamara, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance and direction finding**. Malabar: Krieger, 1991. 237 p.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center (NOAA.NGDC). **Geomagnetic Observatory Data Sampled at One Minute and Hourly Rates On-Line at NGDC**. [online]<<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.html>> Mar. 2004.
- Monico, J. F. G. **Posicionamento pelo Navstar – GPS: descrição, fundamentos e aplicações**, São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287 p.
- Rich, F. J. Structure of the ionosphere. In: Jursa, A. S. ed. **Handbooks of geophysics and space environment**. Springfield: Air Force Geophysics Laboratory, 1985. Cap. 9, section 9.1, p. 9-1 - 9-4.
- Rishbeth, H.; Garriott, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331 p.
- Rodrigues, F. S.; de Paula, E. R.; Iyer, K. I.; Kintner, P. M.; Hysell, D. L.; Abdu, M. A.; Jardim, A. C. ESF irregularity characteristics over São Luís (Brazil) using VHF radar and GPS scintillations techniques. **Radio Science**, Vol. 39, No. 1, RS1S31, 24 fevereiro de 2003.
- Rodrigues, F. S. **Estudo das Irregularidades Ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2003.



Rush, J. Current issues in the use of the Global Positioning System aboard satellites.

Acta Astronautica, v. 47, n. 2-9, p. 377-387, 2000.

Salpeter, E. E. Interplanetary scintillations, I. Theory. **Astronomical Journal**, v. 7, n. 9, 869, 1967.

Secan, J. A.; Bussey, R. M.; Fremouw, E. J.; Basu Sa. An improved model of equatorial scintillation. **Radio Science**, v. 30, n. 3, p. 607-617, May-Jun, 1995.

Seeber, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 1993. 531 p.

Singleton, D. G. Saturation and focusing effects in radio-star and satellite scintillations.

Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, v. 32, n. 2, p. 187-208, 1970.

Spilker Jr., J. J.; Parkinson, B.W. Overview of GPS operation and design. In: Parkinson, B. W.; Spilker Jr. J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: AIAA, 1996. Cap. 2, p. 29-55. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

Standards on wave propagation: definition of terms. **Proceeding of the IRE**, v.38, n. 11, p. 1264-1268, Nov. 1950.

Tascione, T. F. **Introduction to the space environment**. Malabar: Orbit Book Company, 1988. 166 p.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. Magnetic Storms. In: Suessm S. T.; Tsurutani, B. T ed. **From the sun: auroras, magnetic storms, solar flares, cosmic rays**. Washington: American Geophysics Union, 1998. P. 57-66.



Wrenn, G. L. (1987): Time-weighted accumulations $ap(t)$ and $Kp(t)$, *J. Geophys. Res.*, 92, 10,125-10,129.

Yeh, K. C.; Liu, C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, n. 4, p.324-360, Abr. 1982.

**APÊNDICE A****DESCRIÇÃO DO ARQUIVO SUMÁRIO**

A descrição do arquivo sumário gerado pelo programa SCINTMON é especificada na Tabela A.1.

Tabela A.1 – EXEMPLO DE DADOS GRAVADOS NO ARQUIVO SUMÁRIO.

SAO JOSE DOS CAMPOS BRAZIL
ABC-1998 CAMPAIGN
4085.0 -4209.2 -2498.5
2000 3 31 21 2
1
2100 8 104
02 11318.3 -15618.5 -17488.8 -1363 2458 0 0.09 90 9999
07 19999.4 -16823.2 4172.9 2271 2263 0 0.06 40 9999
08 19252.3 -3828.9 -18176.3 -885 3612 0 0.05 9999 9999
10 -1533.4 -26399.5 -650.3 -2016 2305 0 0.06 90 9999
13 19510.3 -17005.2 -5668.0 -1537 2540 0 0.08 94 9999
18 23117.5 -6180.0 11411.9 -3773 4663 0 0.04 9999 9999
26 -6198.2 -13952.5 -21722.0 3051 2656 0 0.05 51 9999
27 22290.1 -1129.8 -14684.3 -1603 3194 0 0.05 9999 9999

As cinco primeiras linhas fazem parte de um cabeçalho inicial de arquivo com as seguintes informações:

- 1ª linha: Estação de Observação
- 2ª linha: Informação adicional
- 3ª linha: Coordenadas ECEF do receptor
- 4ª linha: Ano Mês Dia Hora Minuto
- 5ª linha: 1 (fim do cabeçalho)

A partir da sexta linha são gravados conjuntos de dados referentes a análise de um minuto, 3000 amostras, do sinal GPS, L1 = 1,57542 GHz, de cada satélite rastreado naquele minuto. Logo após, segue uma linha de sub-cabeçalho com as informações:

- 1ª coluna: Hora (HHMM)
- 2ª coluna: Número de satélites (n) rastreados naquele minuto
- 3ª coluna: Potência de ruído



E então, segue-se “n” linhas com as seguintes informações sobre os satélites rastreados:

- 1^a coluna: Identificação do satélite (PRN)
- 2^a coluna: Coordenada ECEF X
- 3^a coluna: Coordenada ECEF Y
- 4^a coluna: Coordenada ECEF Z
- 5^a coluna: Deslocamento Doppler (Hz) do sinal GPS
- 6^a coluna: Potência em banda larga (WBP)
- 7^a coluna: Número que indica quantas vezes o “lock” foi perdido naquele minuto
- 8^a coluna: Índice de cintilação S_4
- 9^a coluna: Largura de auto-correlação do sinal
- 10^a coluna: Não utilizado



APÊNDICE B

Certificados de palestras, cursos e congressos, somente os que o bolsista foi autor.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA



ATESTADO

Atestamos que o acadêmico **MAIQUEL S. CANABARRO** participou do **Curso Tópicos em Clima Espacial**, profendo pelos Dr. Alisson Dal Lago, Dr. Luis Eduardo Arturim Vieira e Msc. Alan Prestes no período de 05 a 08 de agosto de 2003, com uma carga horária de 45 horas, realizada dentro da Parceria INPE - UFSM no Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria (LACEFSM/CTIC/FSM) e no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRSPE/CFP/INPE - MCT) em Santa Maria, RS.

Santa Maria, 11 de agosto de 2003



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS ET SANCTA MARIA



ATESTADO

Atestamos que o acadêmico **MAIQUEL S. CANABARRO** participou do **Curso Rádio Sendagem Atmosférica**, oferecido pelo **Dr. Mario P. Saragoga** no dia **08 de agosto de 2003**, com uma carga horária de **9 horas** realizada dentro da **Parceria INPE – UFSM** no **Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria LACESM/CT/UFMSM** e no **Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/CEP/INPE – MCT**, em **Santa Maria – RS**.

Santa Maria, 11 de maio de 2004



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA



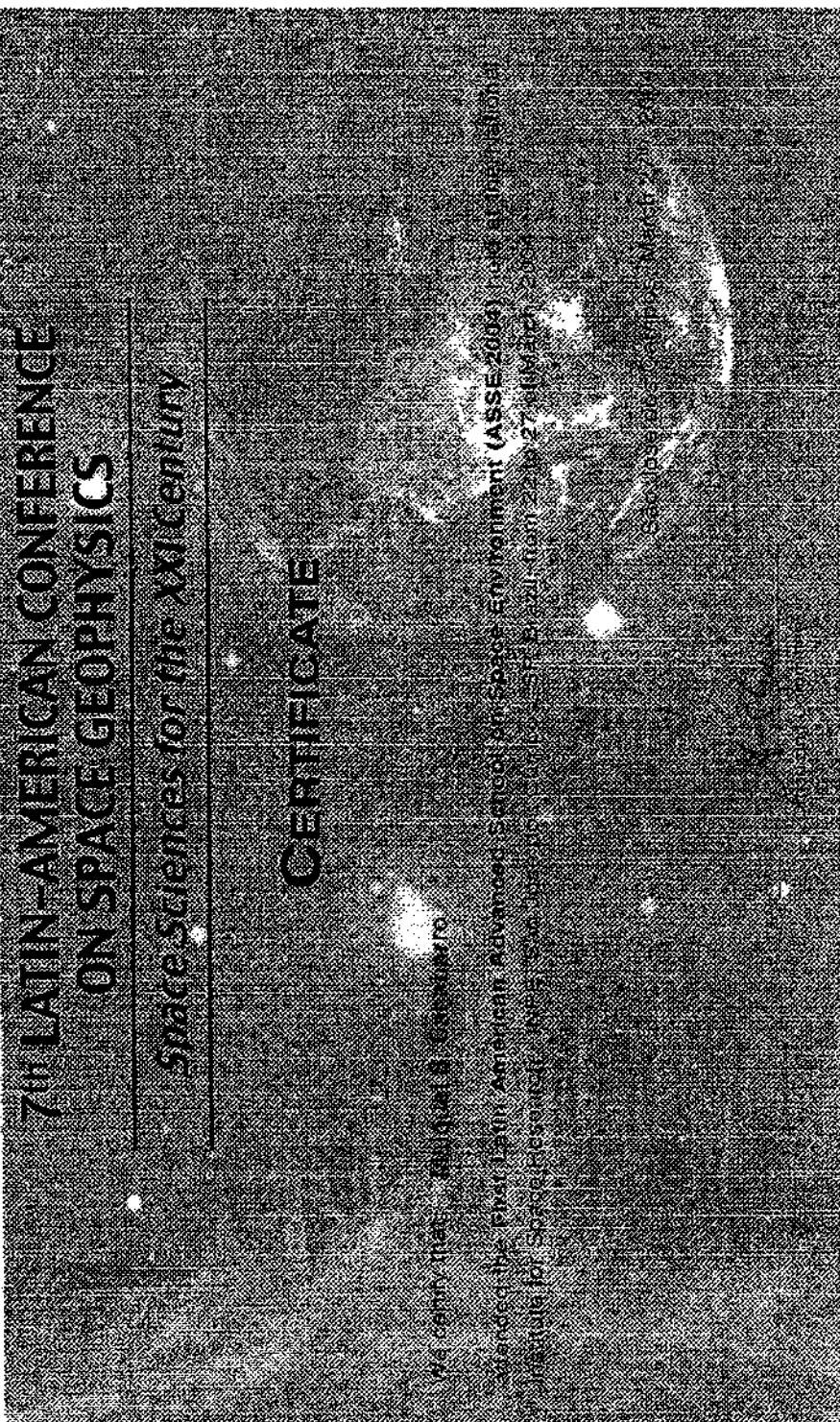
ATESTADO

Atestamos que o acadêmico **MAIQUEL S. CANABARRO** participou do **Curso Técnico em Observações Científicas da Cooperação Brasil-Japão** oferecido pelos **Dr. Kazuo Matuda, Dr. Masahiro Nishina e Dr. Tatsuo Torii**, no dia **22 de agosto de 2003** com uma carga horária de **5 horas**, realizado dentro da parceria **INPE - UFSM** no **Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - UFSM** e no **Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT** em **Santa Maria, RS**.

Santa Maria, 11 de maio de 2004



VII COLAGE





CRICTE
 XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia
 IV Feira de Protótipos 2003
 UNIVERSAL

Certificamos que
Maíquel do Santos Canabarro

Participou do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - CRICTE 2003, e IV Feira de Protótipos, realizado de 9 a 11 de outubro de 2003, na Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, Brasil, apresentando o trabalho:

RIOMETRO IMAGEADOR UTILIZADO PARA MONITORAMENTO IONOSFÉRICO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL - SSO (29S, 53O)

Prof. Vaidir Occhini Filho, Dr.
 Pró-Reitor de Pesquisa, Pós-Graduação,
 Extensão e Cultura

UNIVARI
 Universidade do Vale do Itajaí
 Centro de Iniciação Científica e Tecnológica

Prof. Fernando Luis Biehl, M.Sc.
 Diretor do Centro de Ciências
 Tecnológicas da Terra e do Mar - CTTMa

Prof. Sílvia Santos, M.Sc.
 Presidente da Comissão Organizadora
 do XVIII CRICTE e IV FEIRA DE PROTÓTIPOS



XVIII JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA

Ministério da Educação - Universidade Federal de Santa Maria

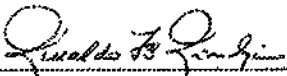
CERTIFICADO

Certificamos que:

MARCELO DOS SANTOS CANTABARRO
MELSON TORGE SCHUCH
EVANILDO VALIGORA
HELIANO DE CARVALHO JUNIOR
RAFAEL KRUMHOLTZ

Participaram da XVIII Jornada Acadêmica Integrada, realizada nos dias 14, 15 e 16 de outubro de 2003, com o trabalho:

UTILIZAÇÃO DE RECEPTORES GPS PARA ESTUDOS DAS
IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.


Comissão Executiva
Outubro de 2003

Divulgue sua idéia!

2003
UFSM
www.ufsm.br/jornada



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Pesquisa
XV Salão de Iniciação Científica
XII Feira de Iniciação Científica
Certificado 2003

Certificamos que o trabalho

**RECEPTORES GPS APLICADOS NO ESTUDO DE
IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS**

de autoria de

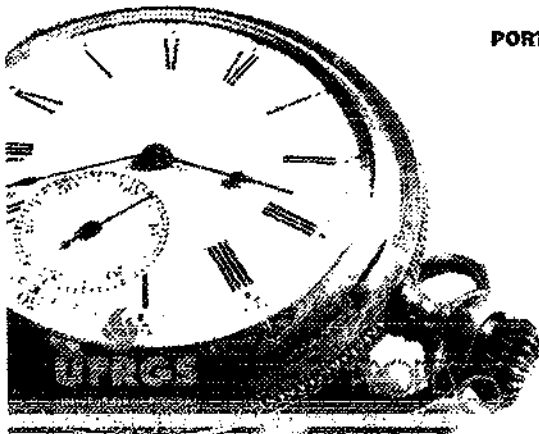
**MAIQUEL DOS SANTOS CANABARRO
NELSON JORGE SCHUCH
RAFAEL KRUMMENAUER
EVANIR N. VALIGURA
HENRIQUE C. AVEIRO
TIAGO PRETTO**

tendo como orientador

EURICO RODRIGUES DE PAULA

foi apresentado no XV SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA promovido pela Pró-Reitoria de Pesquisa/PROPESO da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no período de 24 a 28 de novembro de 2003.

PORTO ALEGRE, 28 DE NOVEMBRO DE 2003.



CARLOS ALEXANDRE NETTO
PRÓ-REITOR DE PESQUISA, UFRGS





VII COLAGE

