



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL
BASEADO EM DADOS OBSERVACIONAIS DE
RADARES COERENTES, MAGNETÔMETROS E
ÍNDICES DE ATIVIDADE MAGNÉTICA.**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

PROCESSO Nº 107616/2003-3

Henrique Carlotto Aveiro (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)
E-mail: aveiro@lacesm.ufsm.br

Dr. Mangalathayil Ali Abdu (DAE/CEA/INPE – MCT, Orientador)
E-mail: maabdu@dae.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRSPE/INPE – MCT, Co-Orientador)
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (DAE/CEA/INPE – MCT, Co-Orientador)
E-mail: denardin@dae.inpe.br

Santa Maria, Julho de 2006.

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Bolsista:

Henrique Carlotto Aveiro

Acadêmico de Engenharia Elétrica – UFSM

Centro de Tecnologia

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM

Universidade Federal de Santa Maria

Orientador:

Dr. Mangalathayil Ali Abdu

Pesquisador Titular Departamento de Aeronomia – DAE/CEA/INPE - MCT

Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas – CEA/INPE - MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Co-Orientadores:

Dr. Clezio Marcos de Nardin – Pesquisador Adjunto – DAE/CEA/INPE – MCT

Dr. Nelson Jorge Schuch – Chefe do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

– CRSPE/INPE – MCT

Colaboradores:

Cleomar Pereira da Silva – Acadêmico de Engenharia Elétrica – UFSM

Lilian Piecha Moor – Acadêmica de Física – Licenciatura – UFSM

Maiquel dos Santos Canabarro – Acadêmico de Engenharia Elétrica – UFSM

Tiago Jaskulski – Acadêmico de Engenharia Elétrica – UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

- Laboratório de Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre – LSIANT/CRSPE/INPE – MCT.
- O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da Parceria INPE/MCT–UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, LACESM/CT–UFSM.

*“Se dois homens vêm caminhando por uma estrada, cada um carregando um pão, e,
ao se encontrarem, eles trocam os pães,
cada homem vai continuar seu caminho com um pão.*

*Porém, se dois homens vêm caminhando por uma estrada cada um carregando uma idéia,
e, ao se encontrarem, eles trocam as idéias,
cada homem vai seguir seu caminho com duas idéias”.*

DITADO CHINÊS

*A meus pais,
JOSÉ TELMO CARVALHO AVEIRO e
CLEULETE CARLOTTO AVEIRO.*

AGRADECIMENTOS

O Bolsista aproveita a oportunidade deste Relatório para agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica. Ao Dr. José Carlos Becceneri, Coordenador do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, pela possibilidade de desenvolver suas potencialidades técnico-científicas.

Ao seu Orientador de Projeto de Pesquisa Dr. Mangalathayil Ali Abdu, Pesquisador Titular do DAE/CEA/INPE - MCT, em São José dos Campos, SP, pela atenção que dedicou ao Bolsista durante este trabalho.

Em especial aos Pesquisadores Co-Orientadores, Dr. Clezio Marcos De Nardin, Pesquisador Adjunto do DAE/CEA/INPE - MCT, em São José dos Campos, SP, pelas horas que deixou de lado sua pesquisa e família para dedicar seu tempo a compartilhar suas idéias e a ensinar a Ciência ao Bolsista, e ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Chefe do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria, pela leitura, sugestões de novos textos e pelas longas conversas sobre a Vida, ajudando o Bolsista como trilhar seus caminhos a percorridos e a percorrer.

Aos Alunos Cleomar Pereira da Silva, Diego dos Santos, Luzia Lux Lock, Maiquel dos Santos Canabarro e Thiago Brum Pretto, estudantes do Curso de Engenharia Elétrica, e à Aluna Lilian Piecha Moor, estudante do Curso de Física – Licenciatura, da Universidade Federal de Santa Maria no âmbito da Parceria INPE-UFSM, pela amizade, discussões e sugestões para este Relatório.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, José Telmo Carvalho Aveiro e Cleudete Carlotto Aveiro, e minha irmã, Juliana Carlotto Aveiro, pelo apoio, ensinamentos e amor que sempre ofereceram.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2 – A IONOSFERA TERRESTRE	15
2.1 – IONOSFERA TERRESTRE	16
2.2 – PRODUÇÃO IÔNICA.....	16
2.2.1 – <i>Foto-ionização</i>	17
2.2.2 – <i>Ionização por Impacto</i>	17
2.3 – PERDA DE IONIZAÇÃO	17
2.3.1 – <i>Recombinação Química</i>	18
2.3.2 – <i>Transporte Vertical</i>	18
2.4 – REGIÕES IONOSFÉRICAS	19
2.4.1 – <i>Região D</i>	19
2.4.2 – <i>Região E</i>	20
2.4.3 – <i>Região F₁</i>	20
2.4.4 – <i>Região F₂</i>	21
2.5 – CONDUTIVIDADE IONOSFÉRICA.....	21
2.6 – TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO DA REGIÃO E	24
2.7 – ELETROJATO EQUATORIAL	25
2.7.1 – <i>Irregularidades do Eletrojato Equatorial</i>	26
CAPÍTULO 3 – RADARES ATMOSFÉRICOS	29
3.1 – MONOSTÁTICOS E BISTÁTICOS.....	29
3.2 – PARÂMETROS DO RADAR	31
3.2.1 – <i>Frequência de Operação</i>	31
3.2.2 – <i>Largura do Pulso</i>	31
3.2.3 – <i>Frequência de Repetição de Pulso</i>	32
3.3 – DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE RADAR	32
3.3.1 – <i>Sistema de Antenas</i>	33
3.3.1.1 – <i>Ganho e Efetividade</i>	33
3.3.1.2 – <i>Polarização da Onda</i>	35
3.3.2 – <i>Sistema Transmissor</i>	35
3.3.3 – <i>Sistema Receptor</i>	36
3.3.4 – <i>Sistema de Controle e Armazenamento dos Dados</i>	36
CAPÍTULO 4 – INSTRUMENTAÇÕES E DADOS UTILIZADOS	38
4.1 – RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE EM 50 MHZ.....	38

4.2 – MAGNETÔMETROS	39
4.2.1 – <i>Magnetômetro Fluxgate</i>	40
4.3 – ÍNDICES DE ATIVIDADE MAGNÉTICA	41
CAPÍTULO 5 – PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DO RADAR RESCO.	45
5.1 – A APLICAÇÃO DAS ROTINAS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS	45
5.2 – AJUSTE DE CURVAS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA	48
5.3 – PROCESSAMENTO DE SINAIS	49
5.3.1 – <i>Restrição de Parâmetros</i>	50
5.3.2 – <i>Integração Incoerente</i>	50
CAPÍTULO 6 – ATIVIDADES DE PESQUISA	52
6.1 – ESTUDO ESTATÍSTICO DA APLICAÇÃO DE INTEGRAÇÃO INCOERENTE A ESPECTROS DE POTÊNCIA DAS IRREGULARIDADES DO ELETROJATO EQUATORIAL	52
6.1.1 – <i>Metodologia</i>	53
6.1.2 – <i>Resultados e Discussões</i>	55
6.1.3 – <i>Conclusões</i>	59
6.2 – ESTUDO ESTATÍSTICO DA RESTRIÇÃO DE PARÂMETROS APLICADO AO AJUSTE DE CURVAS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA DAS IRREGULARIDADES DO ELETROJATO EQUATORIAL	60
6.2.1 – <i>Metodologia</i>	60
6.2.2 – <i>Resultados e Discussões</i>	62
6.2.3 – <i>Conclusões</i>	68
6.3 – ESTUDO DO ELETROJATO EQUATORIAL DURANTE PERÍODOS PERTURBADOS UTILIZANDO MAGNETÔMETROS E RADAR COERENTE	69
6.3.1 – <i>Metodologia</i>	69
6.3.2 – <i>Resultados e Discussões</i>	71
6.3.3 – <i>Conclusões</i>	76
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
APÊNDICE A	83

LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS

CEA	– Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas
CRSPE	– Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CT	– Centro de Tecnologia
DAE	– Departamento de Aeronomia
EEJ	– <i>Equatorial Electrojet</i> (Eletrojato Equatorial)
EUV	– <i>Extreme Ultra Violet</i> (Ultra Violeta Extremo)
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
LACESM	– Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria
LT	– <i>Local Time</i> (Hora Local)
OESLZ	– Observatório Espacial de São Luís do Maranhão
PRF	– <i>Pulse Repetition Frequency</i> (Frequência de Repetição de Pulso)
RESCO	– Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz instalado no OESLZ/INPE - MCT
RTI	– <i>Range Time Intensity</i> (Intensidade Temporal em Altura)
T/R	– Transmissão / Recepção
UFMS	– Universidade Federal de Santa Maria
UT	– <i>Universal Time</i> (Hora Universal)
VHF	– <i>Very High Frequency</i> (Frequência Muito Alta)

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
2.1	Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.	15
2.2	À esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da Ionosfera (em azul similar à esquerda) em relação à Terra.	19
2.3	Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0 , Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI).	23
2.4	Formação do sistema Sq de correntes, baseado na Teoria do Dínamo Atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros \mathbf{U} no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\Phi$ que polarizam os terminadores e o eletrojato equatorial $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$	25
2.5	Espectros de irregularidades Tipo 1, à esquerda, e irregularidades Tipo 2, à direita, dos dados do RESCO no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/ INPE - MCT.	26
3.1	Diagrama esquemático representando o volume de estudo para um radar monostático (a) e bistático (b). O volume de estudo V_s para o primeiro é determinado somente pela largura do pulso e velocidade de propagação da onda. Para o bistático V_s é o volume de intersecção entre os feixes de transmissão e recepção.	30
3.2	Representação esquemática da irradiação e uma antena e seu ganho.	34
4.1	Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde podem ser visto o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.	39

4.2	Índice K_p para o período de 27 a 31 de outubro de 2003. Podemos notar que entorno das 8h (UT) do dia 29 de outubro ocorre o começo da tempestade magnética com duração de aproximadamente 3 dias.	42
4.3	Índice Dst para o período de 10 a 18 de outubro de 2005. As regiões “a”, “b” e “c” representam, respectivamente, o início súbito, a fase principal e a fase de recuperação.	43
4.4	Índices AU (painel superior), AL (painel central) e AE (painel inferior) para o mês de março de 2003, onde pode ser notada a presença de seis eventos que ocorrem entorno dos dias 4, 13, 20, 23, 28 e 31.	44
5.1	Exemplo da variação das componentes em fase (na cor azul) e em quadratura (em vermelho) e o espectro de potência obtido através da análise de Fourier destes dois sinais (em verde). Dados obtidos pelo RESCO correspondente a altura de 107,8 km, às 10h51 do dia 17 de outubro de 2003.	46
5.2	Exemplo de espectrograma originado pelo agrupamento de vários espectros consecutivos referentes à altura de 107,8 km. Dados obtidos pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do INPE - MCT para o dia 17 de outubro de 2003.	47
5.3	Exemplo de mapa de variação temporal de intensidade de potência em função da altura obtido pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE - MCT.	47
5.4	Espectro de frequência simulado, em preto, e seu ajuste por Gaussianas, em azul. A linha tracejada vermelha indica o centro da distribuição, a linha verde indica o nível de ruído e a diferença entre as linhas vermelha e violeta indica os respectivos desvios padrões.	49
5.5	Ilustração de integração incoerente aplicado aos 100 espectros consecutivos da esquerda e o seu resultado ao lado direito.	51

6.1	Espectro de potencia simulado (linha preta) sobreposto por uma curva Gaussiana (linha azul) ajustada ao espectro utilizando o Método de Mínimos Erros Quadráticos. A linha tracejada verde representa a densidade de potência de ruído (P_N), a linha vertical vermelha mostra o centro da distribuição de frequências (f_d), a diferença entre as linhas vertical laranja e vermelha determina o desvio padrão da curva Gaussiana ajustada ao espectro e a área entre a linha tracejada azul e a linha tracejada verde define a potência do sinal (P).	54
6.2	Porcentagem de ocorrência das frequências Doppler estimadas por MLE utilizando espectros sem integração incoerente e integração de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros. Cada frequência Doppler é centrada na frequência inteira definida no eixo com $\pm 0,5$ Hz de resolução.	56
6.3	Porcentagem do número de respostas bem estimadas ($PREA$) em função do número espectros utilizados nas integrações incoerentes ($NICH$). As integrações incoerentes analisadas estão em azul, o erro estatístico é representado pela região verde e a curva logarítmica ajustada está em vermelho. A linha tracejada mostra a saturação de $PREA$, i.e., 100% das ocorrências.	57
6.4	Distribuição da frequência Doppler Tipo 1 versus α_j para SNR_1 igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.	64
6.5	Distribuição da variância da frequência Doppler Tipo 1 versus α_j para SNR_1 igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.	65
6.6	Distribuição do Desvio Padrão da Gaussiana Tipo 1 versus α_j para SNR_1 igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.	66
6.7	Porcentagem de espectros ajustados em função de α_j para SNR_1 igual a 3dB (preto), 6dB (azul marinho) e 9dB (azul claro).	67
6.8	Índice Dst para novembro de 2003. O período analisado é mostrado em azul.	71
6.9	Parâmetros ΔH_{EEJ} (painel superior), ΔH_{SLZ} (painel central) e ΔH_{VSS} (painel inferior) para novembro de 2003. Podem ser visualizadas as ocorrências de duas tempestades magnéticas, entorno dos dias 4 e 21 de outubro, onde o traço das três componentes aparece distorcido apresentando baixos valores. ...	72

6.10	Mapa RTI e espectrogramas para o dia 18 de novembro. O EEJ é detectado durante um período entre as 10h e às 11h LT e após as 13h. Não há detecção do EEJ para o período próximo às 12h LT, horário em que esperado que ele possua a máxima intensidade de corrente.	74
6.11	Mapa RTI e espectrogramas para o dia 20 de novembro. A potência do EEJ é forte para todo o período apresentado. Contudo, não há dados para o período posterior às 13h LT.	75

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste Relatório apresentamos as atividades relativas ao Projeto **ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL BASEADO EM DADOS DE RADAR COERENTE, MAGNETÔMETROS E ÍNDICES DE ATIVIDADES MAGNÉTICAS** (Processo nº 107616/2003-3) desenvolvidas, no período de agosto de 2005 a julho de 2006, pelo aluno Henrique Carlotto Aveiro, bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCT.

No referido período, o aluno do curso de Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria no Centro Regional de Sul de Pesquisas Espaciais, CRSPE/INPE – MCT, desenvolveu atividades de estudo teórico dos temas e aplicou seus conhecimentos em atividades relacionadas com processamento de sinais de radar e Geofísica Espacial. A intenção dos trabalhos em processamento de sinais foi de melhorar a qualidade da análise dos dados de retro-espalhamento do sinal do radar RESCO pelas irregularidades do eletrojato equatorial. Com relação ao processamento de dados, o bolsista efetuou o estudo estatístico da aplicação da técnica de integração incoerente a espectros simulados de potência de irregularidades do eletrojato equatorial. Um trabalho sobre tal estudo foi submetido à Revista Brasileira de Geofísica. Ainda realizou o estudo estatístico da restrição do espaço de parâmetros aplicado ao ajuste de curvas dos espectros de potência do Radar RESCO, cujo resultados foram apresentados no XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science, URSIGA, em Nova Delhi, Índia. Com relação à Geofísica Espacial, o bolsista desenvolveu um estudo da resposta do eletrojato equatorial às tempestades magnéticas. Neste trabalho, foi realizado um estudo comparativo entre o campo magnético induzido em solo devido ao eletrojato e a potência do sinal retro-espalhada pelas irregularidades do eletrojato utilizando o radar RESCO. Os resultados deste estudo estão no trabalho “*Comparative Studies of Equatorial Electrojet*

Using Back-Scatter Radar and Magnetometer Data”, apresentado no 11th Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium, ocorrido entre os dias 6 a 10 de março de 2006, no Rio de Janeiro.

Apresentamos no Capítulo 2 deste Relatório, uma breve descrição da teoria necessária para a compreensão da ionosfera, bem como a dinâmica do eletrojato equatorial. O Capítulo 3 descreve uma teoria básica sobre radares e seus subsistemas. O Capítulo 4 descreve os equipamentos e materiais utilizados para o estudo das irregularidades do eletrojato: o Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz de São Luís do Maranhão (RESCO), magnetômetros e índices de atividade magnética. No Capítulo 5 é explicado o pré-processamento dos dados do radar RESCO, bem como algumas técnicas aplicadas para um aprimoramento desta. O Capítulo 6 é dedicado à apresentação das atividades de pesquisa desenvolvidas pelo bolsista. Por fim, no Capítulo 7, apresentamos as conclusões relativas às atividades relacionadas no período de vigência da bolsa.

CAPÍTULO 2

A IONOSFERA TERRESTRE

A atmosfera da Terra pode ser discutida em termos de seus componentes constituídos pelos: componentes minoritários e majoritários da atmosfera neutra, e a atmosfera ionizada (ou seja, a ionosfera). Considerada como um sistema estático, a atmosfera neutra é descrita por quatro propriedades: pressão, densidade, temperatura e composição. Com essas propriedades podemos determinar o comportamento atmosférico e sua classificação. Essa classificação, por exemplo, é feita de acordo com as variações com altura da temperatura, da composição e do estado de mistura dos gases, embora a primeira citada seja a mais usada. A Figura 2.1 ilustra os termos usados para estas várias regiões. Da esquerda para direita vemos a classificação da atmosfera de acordo com: a variação da temperatura; a variação da composição; o escape gasoso; e a densidade da atmosfera ionizada.

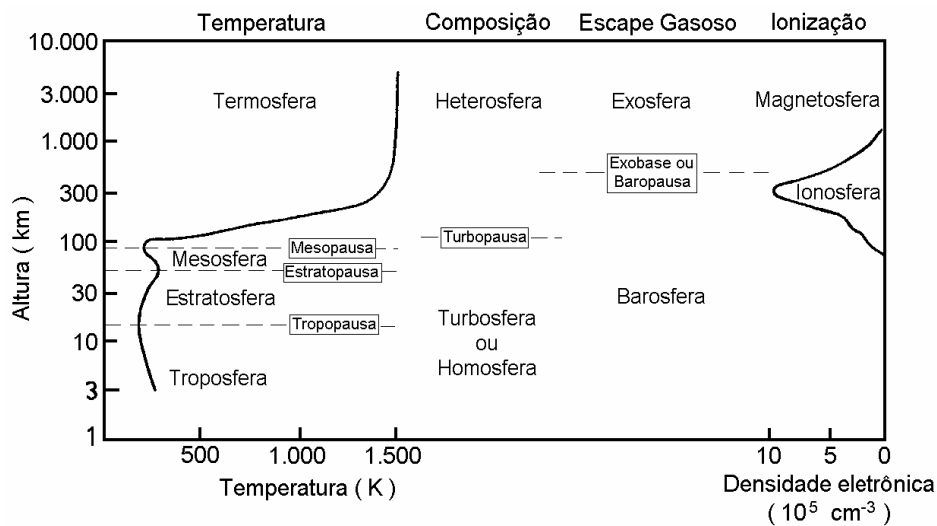


Fig. 2.1 – Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.
FONTE: Hargreaves (1992, p. 99).

2.1 – Ionosfera Terrestre

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera, localizando-se entre aproximadamente 70 km e 1500 km de altitude. Ela é gerada pela interação das radiações ionizantes solares e cósmicas com os constituintes da atmosfera neutra e possui camadas condutora de plasma. Uma vez formada os íons e elétrons da ionosfera tendem a se recombinar e reagir entre si e com outras espécies para produzir outros íons ou neutralizar-se. Em termos gerais, a taxa de variação de densidade eletrônica é expressa pela equação da continuidade (Hargreaves, 1992):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (N\mathbf{v}), \quad (2.1)$$

onde q é a taxa de produção de íons e elétrons, L é a taxa de perda por recombinação, $\nabla \cdot (N\mathbf{v})$ expressa a perda/ganho de elétrons por transporte, sendo \mathbf{v} a velocidade de transporte.

Na ionosfera encontramos diversos íons, porém alguns merecem destaque especial. Na sua porção superior (região F) ela é formada, basicamente, pelo íon de oxigênio atômico (O^+), e pelo óxido nítrico (NO^+) e o oxigênio molecular (O_2) nas regiões inferiores (regiões E e F_1). O íon de nitrogênio molecular (N_2^+), apesar de importante íon primário, apresenta diversas reações de perda, incluindo uma para NO^+ bastante eficiente. Na sua porção mais baixa (região D) temos um comportamento dominado pela química. E nesta porção que encontramos íons super-hidratados e íons negativos.

2.2 – Produção Iônica

A ionização da atmosfera neutra se dá basicamente através de duas fontes: os fótons da radiação solar e as partículas de alta energia provenientes de cinturão de radiação e raios cósmicos. Porém, para ocorrer a ionização, tanto as partículas energéticas, quanto os

fótons ionizantes devem possuir energias superiores ao potencial de ionização ou à energia das ligações dos átomos ou moléculas da atmosfera neutra. Na equação da continuidade (Equação 2.1), a produção iônica é representada pela variável q .

2.2.1 – Foto-ionização

É o processo no qual a Ionosfera Terrestre absorve radiação, em sua grande maioria de origem solar. Apesar de quase a totalidade dos comprimentos de onda da radiação do espectro eletromagnético interagir com a atmosfera neutra terrestre, existem duas faixas onde este processo é mais efetivo: na faixa espectral do Extremo Ultravioleta (EUV) e dos Raios-X. Além disso, a radiação conhecida com Lyman- α contribui significativamente para a produção iônica da Atmosfera Terrestre.

2.2.2 – Ionização por Impacto

É o processo no qual há o choque de partículas de alta energia com os constituintes da atmosfera neutra. Essas partículas podem ser oriundas do espaço ou podem ser elétrons ou íons locais acelerados. Esse processo é particularmente importante em altas latitudes, já que a radiação solar não incide tão intensamente nessa região quanto no equador, devido ao ângulo de inclinação da terra na eclíptica.

2.3 – Perda de Ionização

A perda de ionização ocorre pelos processos de recombinação entre íons e elétrons a qual resulta em diminuição da densidade eletrônica da Ionosfera. Ela é ainda causada pelo processo de transporte ou movimento do plasma.

2.3.1 – Recombinação Química

A recombinação química engloba todos os processos de neutralização e/ou troca de carga da ionosfera. Há uma vasta gama de reações químicas que contribuem para esta recombinação, porém destacamos duas classes: recombinação radiativa e recombinação dissociativa. Na equação da continuidade, Equação 2.1, a recombinação química é representada pela variável L .

A recombinação radioativa é o processo de recombinação no qual um íon positivo recombina-se com um elétron, liberando energia na forma de fótons ($h\nu$), representado pela equação:



A recombinação dissociativa é o processo de recombinação na qual uma molécula de carga positiva (XY^+) entra em reação com um elétron, dissociando os dois elementos, representado pela equação:



Em alguns casos esta reação também pode envolver emissão de fótons, dependendo do nível de excitação da molécula.

2.3.2 – Transporte Vertical

O movimento do plasma de íons e elétrons acontece tanto horizontalmente, como verticalmente, porém este último costuma ser mais eficiente nos processos de perda da região F da Ionosfera. Na equação da continuidade, Equação 2.1, o transporte vertical é incluído no termo $\nabla \cdot (N\mathbf{v})$.

2.4 – Regiões Ionosféricas

Devido as diferentes composições, processos de ionização, densidade eletrônica e altura, a Ionosfera é dividida em três regiões básicas: Região D, Região E e Região F, que por sua vez é subdividida em regiões F_1 e F_2 . A Figura 2.2 ilustra as três camadas com suas respectivas alturas e densidades eletrônicas.

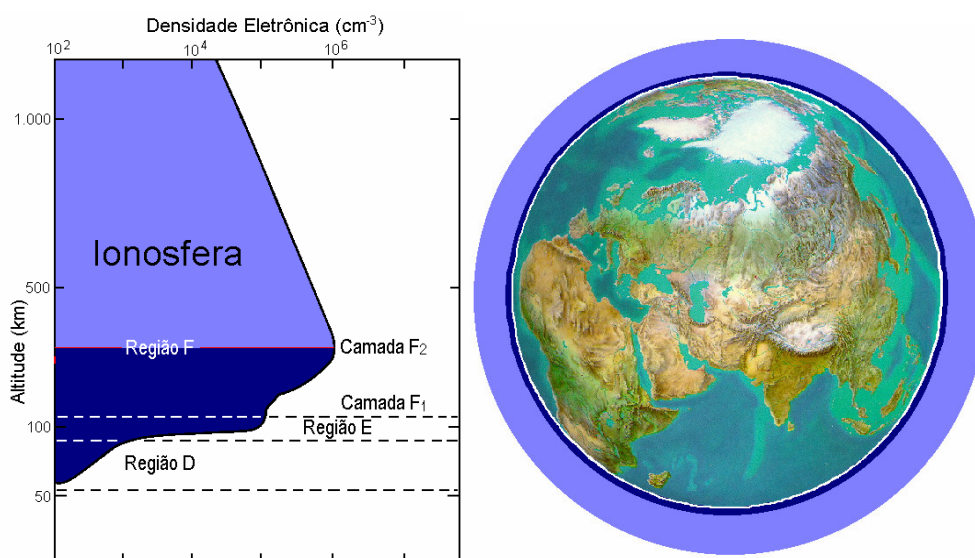


Fig. 2.2 – À esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da Ionosfera (em azul similar à esquerda) em relação a Terra.
FONTE: Denardini (1999, p. 26).

2.4.1 – Região D

A região D é a porção mais baixa da Ionosfera terrestre. Ela é uma camada que inicia em torno dos 60 km e se estende até aproximadamente 90 km. Ela é muito importante do ponto de vista da radiopropagação (Kelley, 1989), pois pode atenuar, refletir e/ou absorver o sinal de rádio. No entanto, durante a noite essa camada tem sua densidade muito reduzida, a ponto de não ser detectada pela maioria dos equipamentos de rádio-sondagens utilizados para monitoramento ionosférico.

Dentre as camadas ionosféricas, a região D é considerada a mais complexa do ponto de vista químico. Como causas principais podemos citar a alta pressão e a grande variedade de fontes de ionização que contribuem para a produção iônica. Dentre as fontes de ionização, as principais são:

- a radiação na linha Lyman- α (1216 Å);
- a radiação na faixa do Ultravioleta Extremo (com λ entre 1027 e 1118 Å) ;
- a radiação na faixa dos Raios-X (com λ entre 2 e 8 Å);
- os raios cósmicos galácticos; e
- as partículas de origem solar ou auroral.

2.4.2 – Região E

Essa camada inicia por volta dos 90 km e se estende por aproximadamente 50 km. Durante a noite sua densidade eletrônica diminui significativamente, pois sua principal fonte produtora, o Sol, está ionizando hemisfério diurno. Nesse horário sua densidade eletrônica é da ordem de 5×10^9 elétrons/m³, enquanto que durante o dia ela pode ser da ordem de 10^{11} elétrons/m³. Ela possui dois íons majoritários: NO⁺ e O₂⁺, mas também é caracterizada pela presença de íons metálicos como Mg⁺ e Fe⁺. A presença destes íons metálicos é creditada à desintegração meteórica pelo atrito com a atmosfera terrestre. E deve ser mencionado que estes íons são os responsáveis pela formação das camadas E-esporádicas em médias e baixas latitudes.

É na região E equatorial que temos a formação do eletrojato equatorial, um dos objetivos de estudo deste trabalho e que será mais bem apresentado nas seções que se seguem. Por ora, mencionamos que este é uma corrente elétrica restrita à região ao longo do equador magnético nas alturas da região E.

2.4.3 – Região F₁

Esta tem início por volta dos 140 km e estende-se por aproximadamente 20 - 40 km. A espécie neutra molecular predominante nessa região é o N₂. A espécie atômica

predominante nessa região é o oxigênio (Kivelson e Russell, 1995). O íon majoritário é o O^+ , e sua concentração pode variar de $2,5 \times 10^{11}$ a $4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Porém, à noite a densidade eletrônica dessa região se reduz.

2.4.4 – Região F₂

A Região F₂ localiza-se na parte mais alta da ionosfera e seu máximo de concentração eletrônica pode atingir aproximadamente 10^{12} elétrons/m³, localizando-se em torno dos 300 km de altitude. Durante a noite a sua densidade eletrônica normalmente decai para cerca de 5×10^{10} elétrons/m³. Dentre todas as regiões, ela é a que apresenta a maior concentração de elétrons da ionosfera terrestre, mesmo durante a noite. Isso ocorre por diversos fatores, entre eles, ela possui íons atômicos como espécie predominante, os quais possuem menor taxa de recombinação.

Há grande interesse no estudo da rádio propagação através desta região, devido ela possuir um grande número de irregularidades ionosféricas, as quais alteram significativamente as características do meio e apresentam um comportamento de difícil previsão.

2.5 – Condutividade Ionosférica

A condutividade elétrica de um dado meio é determinada pela razão entre a densidade de corrente, \mathbf{J} em A/m², e o campo elétrico, \mathbf{E} em V/m: $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{J} / \mathbf{E} = (n e \mathbf{v}) / \mathbf{E}$, onde \mathbf{v} é a velocidade das partículas relevantes, n é a densidade eletrônica e e a carga da cada partícula.

Na ionosfera terrestre observa-se a presença simultânea dos campos elétricos e magnéticos. Portanto, convencionou-se apresentar a condutividade ionosférica em termos das suas três componentes da seguinte forma: ao longo do vetor campo magnético; ao longo da componente do vetor campo elétrico perpendicular ao campo magnético; e

perpendicular a ambos. A componente da condutividade ao longo do campo magnético é dada por:

$$\sigma = \frac{ne^2}{m\nu} \quad (2.4)$$

onde ν é a taxa de colisão com as partículas neutras (s^{-1}). Aqui cabe uma observação importante, esta taxa de colisão não deve ser confundida com frequência de onda do fóton emitido nos processos de recombinação química ($h\nu$).

Considerarmos que há íons e elétrons, temos que a condutividade é o somatório das componentes iônicas e eletrônicas. Esta condutividade é conhecida como condutividade direta ou longitudinal (σ_0). Ela é calculada considerando a direção paralela ao campo geomagnético (\mathbf{B}), uma vez que o meio ionosférico é anisotrópico.

$$\sigma_0 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right) \quad (2.5)$$

A condutividade Pedersen ou transversal (σ_1) refere-se à condutividade na direção da componente de um campo elétrico \mathbf{E} perpendicular a direção de \mathbf{B} .

$$\sigma_1 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{\nu_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right) \quad (2.6)$$

A condutividade Hall (σ_2) refere-se a condutividade na direção perpendicular, simultaneamente, as direções de \mathbf{B} e da componente de \mathbf{E} perpendicular a direção de \mathbf{B} .

$$\sigma_2 = n \cdot e^2 \cdot \left(\frac{\Omega_e}{m_e (\nu_e^2 + \Omega_e^2)} - \frac{\Omega_i}{m_i (\nu_i^2 + \Omega_i^2)} \right) \quad (2.7)$$

Nas equações 2.5, 2.6 e 2.7 acima Ω_e e Ω_i são as frequências ciclotrônicas, ν_e e ν_i são as frequências de colisão, m_e e m_i são as massas dos elétrons e íons respectivamente, “e” é a carga dos elétrons e n é a densidade de plasma.

Uma distribuição em altura calculada da condutividade na ionosfera de médias latitudes ao meio-dia é mostrada na Figura 2.3. Nesta Figura nota-se que os picos das condutividades Pedersen e Hall ocorrem na região E, decaindo acentuadamente acima e abaixo deste máximo. No equador magnético esse pico fica em torno de 150 km para a condutividade Pedersen e 130 km para a Hall (Denardini, 1999).

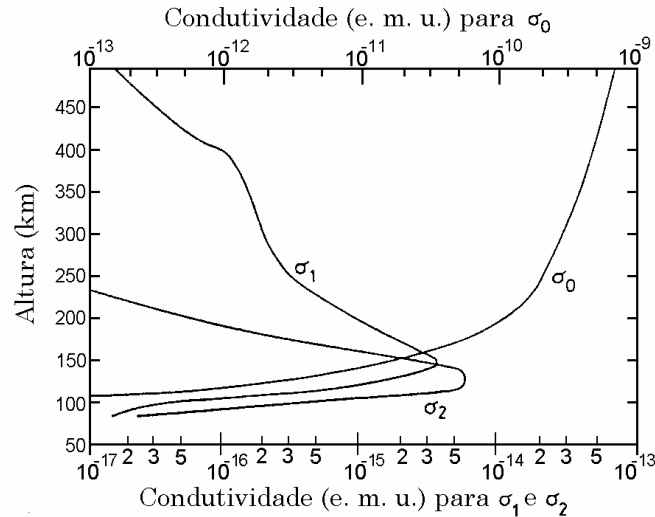


Fig. 2.3 – Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0 , Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI). FONTE: Akasofu e Chapman (1972, p. 244).

Utilizando estas três variáveis, σ_0 , σ_1 e σ_2 , chegamos à equação do tensor condutividade elétrica, $\underline{\sigma}$, o qual generaliza a relação de \mathbf{E} com \mathbf{J} , e é dado por:

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 \cdot \cos^2(I) + \sigma_1 \cdot \sin^2(I) & \sigma_2 \cdot \sin(I) & -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \sin(I) \cdot \cos(I) \\ -\sigma_2 \cdot \sin(I) & \sigma_1 & -\sigma_2 \cdot \cos(I) \\ -(\sigma_0 - \sigma_1) \cdot \sin(I) \cdot \cos(I) & \sigma_2 \cdot \cos(I) & \sigma_1 \cdot \cos^2(I) + \sigma_0 \cdot \sin^2(I) \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

sendo “I” o ângulo da inclinação de \mathbf{B} em relação à superfície terrestre. Na região do equador magnético a inclinação do campo magnético é nula, logo, nesta região, o tensor condutividade $\underline{\sigma}$ resume-se a:

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & -\sigma_2 \\ 0 & \sigma_2 & \sigma_1 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Considerando somente o plano perpendicular ao campo magnético na região equatorial, através da relação $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$, obtemos as seguintes equações:

$$\begin{cases} J_x = \sigma_1 \cdot E_x + \sigma_2 \cdot E_y, \\ J_y = -\sigma_2 \cdot E_x + \sigma_1 \cdot E_y. \end{cases} \quad (2.10)$$

Considere que o eixo y está na direção vertical enquanto o eixo x está na direção leste. Neste caso, devido a queda acentuada da condutividade mostrada na Figura 2.3, há uma inibição da corrente vertical que pode ser representada por $J_y = 0$ nas equações 2.10. Assim, resolvendo o sistema anterior temos:

$$J_y = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \right) E_x \Rightarrow J_y = \sigma_3 \cdot E_x, \quad (2.11)$$

onde σ_3 é a condutividade Cowling, a condutividade na direção do eletrojato equatorial.

2.6 – Teoria do Dínamo Atmosférico da Região E

Com a incidência da radiação solar na Terra, há o aquecimento da atmosfera neutra. O aquecimento leva a expansão da atmosfera provocando o surgimento de ventos neutros \mathbf{U} . Estes ventos neutros (moléculas neutras) colidem com íons, arrastando-os. Além do aquecimento solar, a atração lunar é responsável pelas marés atmosféricas. Estes ventos sopram para os pólos durante o dia, através do campo magnético induzindo campos elétricos $\mathbf{E} = \mathbf{U} \times \mathbf{B}$ em altas latitudes, devido a interação dos íons arrastados pelos ventos neutros com o campo magnético com grande inclinação nestas latitudes. Estes fenômenos provocam o surgimento do dínamo atmosférico global e polarizam o terminador do lado

do amanhecer positivamente e negativamente do lado do anoitecer.

2.7 – Eletrojoato Equatorial

Um dos efeitos do dínamo atmosférico da região E é polarizar o lado do amanhecer positivamente e negativamente o lado do anoitecer. Como a condutividade ionosférica na região do Equador Geomagnético, Condutividade Cowling, é máxima entre 90 e 120 km de altura, esta região possui uma corrente fluindo de oeste para leste no lado do amanhecer e de leste para oeste do lado do anoitecer, Figura 2.3. Note, porém, que os valores das correntes não são idênticos para os dois lados, já que a condutividade ionosférica depende diretamente da densidade eletrônica (veja as Equações 2.5 a 2.7). Esta corrente que circula pela região equatorial numa faixa de 6° de latitude é denominada eletrojoato equatorial.

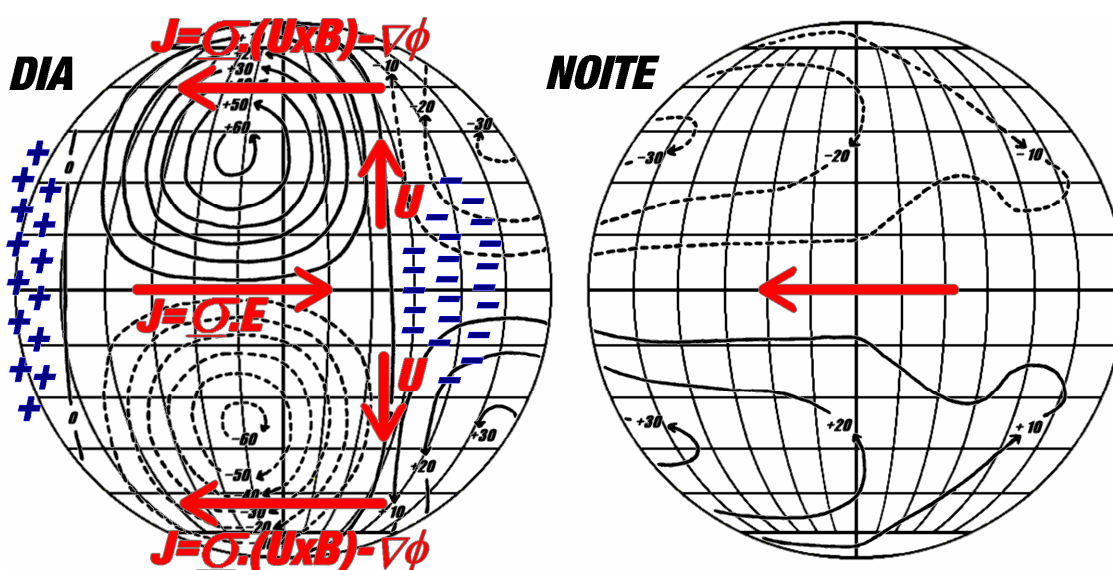


Fig. 2.4 – Formação do Sistema Sq de correntes, baseado na Teoria do Dínamo Atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros \mathbf{U} no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\Phi$ que polarizam os terminadores e o eletrojoato equatorial $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$.

FONTE: Denardini (2003, p. 44).

2.7.1 – Irregularidades do Eletrojato Equatorial

Como mostrado anteriormente, o eletrojato faz parte do sistema de correntes e campos elétricos controlados pela ação do Dínamo Atmosférico. Estudos feitos utilizando radar VHF mostraram dois tipos distintos de irregularidades de plasma no eletrojato equatorial: irregularidades Tipo1 e Tipo 2 (Figura 2.5).

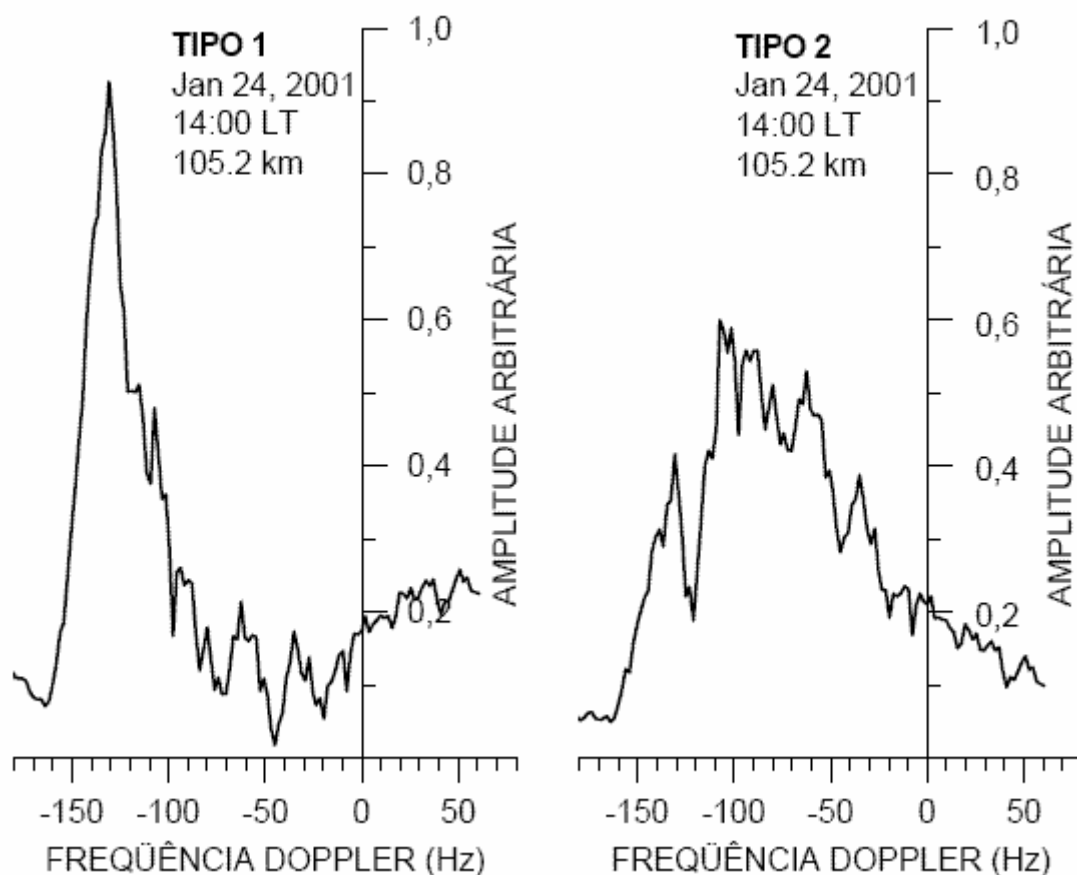


Fig. 2.5 – Espectros de irregularidades Tipo 1, à esquerda, e irregularidades Tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.

FONTE: Denardini (2003, p. 53).

Irregularidades relacionadas à instabilidade de dois-feixes (*two-stream* ou Farley-Buneman), são conhecidas como ecos Tipo 1 e caracterizadas por um espectro

fino de alta amplitude encontrado predominantemente na parte mais alta do Eletrojato. Em dias magneticamente calmos, ecos relacionados com esse tipo de irregularidade são esperados em horários entre as 10 e 13 horas local (Forbes, 1981). Em períodos perturbados, devido à deposição de energia do distúrbio magnético, pode ocorrer um aumento na produção deste tipo de instabilidade (Denardini, 2004).

A teoria desta instabilidade mostra que ela se aplica a ondas propagando-se num cone de ângulo θ , dado por:

$$V_d \cdot \cos \theta = C_s (1 + \psi), \quad (2.12)$$

onde V_d é velocidade relativa entre elétrons e íons, C_s é a velocidade íon-acústica, aproximadamente 360 m/s, e

$$\psi = \frac{v_e \cdot v_i}{\Omega_e \cdot \Omega_i} \cdot \left(\sin^2 \alpha + \frac{\Omega_e^2}{v_e^2} \cdot \cos^2 \alpha \right), \quad (2.13)$$

onde α é o ângulo entre a onda e o campo magnético, v e Ω são a colisão e girofrequência dos elétrons e íons. O valor que a velocidade íon-acústica deve ser excedida depende de ψ , que, por sua vez, depende de α . Para propagação normal ao campo, $\alpha=90^\circ$, ψ é aproximadamente 0,3 na Região E, mas aumenta rapidamente quando α afasta-se de 90° , já que Ω_e é em torno de 100 vezes maior que v_e (Hargreaves, 1992). Este é o motivo pelo qual ondas eletrostáticas geradas por este mecanismo costumam propagar-se na direção normal ao campo magnético e porque a diferença de velocidades é próxima a velocidade íon-acústica.

Irregularidades relacionadas à instabilidade deriva de gradiente, *Gradient Drift*, são conhecidas como ecos Tipo 2 e são caracterizadas por um espectro mais largo e de amplitude inferior às irregularidades Tipo 1. Em dias magneticamente calmos, esse tipo de irregularidade é encontrada predominantemente na parte mais baixa do eletrojato,

podendo aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol (Denardini, 1999), contudo a faixa de altura onde seus ecos dominam em condições calmas, aparenta subir em períodos perturbados (Abdu et al., 2003).

Este tipo de instabilidade ocorre em plasmas não homogêneos quando campos elétricos de polarização, \mathbf{E}_p , possuem uma componente muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Devido à existência do campo magnético, \mathbf{B} , obtemos uma força vertical $\mathbf{E}_p \times \mathbf{B}$, a qual pode estar orientada para cima ou para baixo, dependendo da distribuição de densidade da região perturbada.

CAPÍTULO 3

RADARES ATMOSFÉRICOS

Com o objetivo de estudar as características da atmosfera como bolhas ionosféricas, eletrojato equatorial, ventos neutros e outros fenômenos usualmente são utilizados radares atmosféricos. A análise espectral dos ecos recebidos por um radar pulsado permite determinar o deslocamento Doppler em frequência e identificar os tipos de espectros que caracterizam os fenômenos estudados. Para otimizar o estudo com radares é necessária a escolha de parâmetros adequados de acordo com o tipo de estudo, como por exemplo, resolução em altura, resolução temporal, altura de estudo. A escolha destes parâmetros tem influência direta no comprimento do pulso transmitido, na largura do filtro de recepção, no tempo de atraso para início da aquisição dos dados, etc. Neste capítulo são apresentadas as diferentes características de um radar, de suas antenas à escolha dos parâmetros do pulso, e sua influência no objeto de estudo.

3.1 – Monostáticos e Bistáticos

Um radar pode utilizar a mesma antena para transmissão e recepção. Neste caso o chamamos de monostático. Caso ele apresente um arranjo de antenas para transmissão e outro arranjo de antenas para recepção, com separação significativa entre eles, o chamamos de bistático. No caso do radar monostático, o espalhamento que ocorre no volume V_s é determinado pela forma do feixe e comprimento do pulso. Para o bistático, o processo ocorre no volume comum de intersecção dos feixes de transmissão e de recepção (Fig. 3.1).

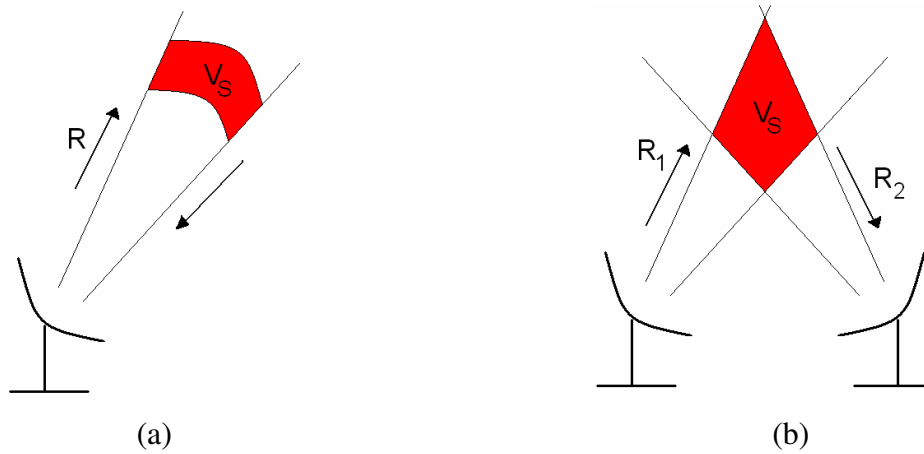


Fig. 3.1 – Diagrama esquemático representando o volume de estudo para um radar monostático (a) e bistático (b). O volume de estudo V_s para o primeiro é determinado somente pela largura do pulso e velocidade de propagação da onda. Para o bistático V_s é o volume de intersecção entre os feixes de transmissão e recepção.

Considerando que a área do espalhamento (Σ) é o produto do volume de espalhamento (V_s) pelo número de alvos (moles) por metro (σ) e que não ocorrem espalhamentos por parte da antena, determinamos a potência recebida pelos dois tipos de radar supracitados:

$$\text{- Monostático: } P_r = P_t \left(\frac{\sigma \cdot c \cdot T}{2} \right) \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right) A_{eff}; \quad (3.1)$$

$$\text{- Bistático: } P_r = \left(\frac{P_t \cdot G_t}{4 \cdot \pi \cdot R_1^2} \right) (\sigma \cdot V_s) \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R_2^2} \right) A_{eff}, \quad (3.2)$$

onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, c é velocidade da luz, T é a largura do pulso transmitido (em segundos), R é a distância do radar monostático ao alvo, R_1 e R_2 são as distâncias entre a antena transmissora e o alvo e entre a antena receptora e o alvo, respectivamente, para o radar bistático, A_{eff} é a área efetiva da antena e os outros parâmetros foram introduzidos anteriormente. Na seção que segue será dada uma descrição mais detalhada de alguns dos parâmetros acima.

3.2 – Parâmetros do Radar

Como citamos anteriormente, os parâmetros escolhidos para o radar são de importante valia para nossos estudos, uma vez que acordo com sua escolha podemos obter resultados indesejados. Nesta seção, apresentaremos os conceitos básicos para escolha da frequência de operação, largura do pulso e frequência de repetição de pulsos.

3.2.1 – Frequência de Operação

A frequência de operação do radar é um importante parâmetro, pois ela seleciona a escala da irregularidade que vai ser sondada. Os ecos coerentes de irregularidades são obtidos quando a escala da irregularidade é metade do comprimento de onda correspondente da frequência de operação do radar e resultam na recepção de um sinal mais forte. Frequências abaixo de 30 MHz e acima de 54 MHz não podem ser utilizadas, pois entram na faixa do espectro reservado para radiodifusão e TV. Com base nos dados acima e considerando que uma onda eletromagnética se propaga com uma velocidade c podemos dizer que a escala de comprimento estudado será dado por:

$$\lambda_i = \frac{c}{2 \cdot f_o}, \quad (3.3)$$

onde λ_i é a escala de comprimento da irregularidade, em metros, e f_o é frequência de operação do radar. Assim, um radar operando em 30 MHz e outro operando em 50 MHz estariam estudando irregularidades com escala de comprimento de 5 metros e 3 metros, respectivamente.

3.2.2 – Largura do Pulso

Num sistema de radar pulsado simples a relação sinal-ruído do eco refletido é proporcional à potência média do radar (Skolnik, 1961). A potência média aumenta com a largura do pulso e com a frequência de repetição de pulsos para uma dada potência de

pico. No entanto, a frequência de repetição de pulsos é limitada, assim evitando ambigüidades nas medidas de altura.

A resolução em altura é dada pelo produto $c\tau/2$, onde c é a velocidade da luz (m/s) e τ é a largura do pulso (s), i.e., aumentando a largura do pulso, pioramos a resolução em altura. Caso o radar esteja utilizando um feixe oblíquo, devemos multiplicar este valor de resolução por $\cos(\theta)$, onde θ é o ângulo de elevação do feixe em relação ao zênite. Dessa forma podemos generalizar a resolução em altura dh como sendo:

$$dh = c \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \cos(\theta). \quad (3.4)$$

3.2.3 – Frequência de Repetição de Pulso

Sistemas de onda contínua são ideais para medir deslocamento Doppler, porém, para este radar, também é necessário uma boa medição da altura da fonte e sistemas pulsados podem mais facilmente obter estes dois parâmetros. O único cuidado a ser tomado é que a Frequência de Repetição de Pulsos (*Pulse Repetition Frequency* – PRF) deverá ser duas vezes maior que o máximo deslocamento esperado, respeitando o critério de Nyquist. Porém, este parâmetro não pode ser muito alto, pois causaria ambigüidades nas medições de altura. Além disso, as velocidades de deriva das irregularidades podem ser diferentes para alturas distintas. Por exemplo, no caso da Região E, assumindo a velocidade máxima de propagação das irregularidades nesta região como sendo 400 m/s e considerando 120 km como a altura máxima para esta camada, temos uma “PRF” limitada de 266.6 a 1080 Hz. Para a Região F, assumindo a velocidade máxima de 200 m/s para as irregularidades e tomando 800 km como a altura máxima desta região, resultamos numa “PRF” limitada de 133.4 a 162 Hz. Desta forma, para satisfazer os requisitos para ambas as regiões, seria necessário ser escolhida para o radar uma “PRF” variável entre 100 e 1000 Hz (Janardhanan, 1983).

3.3 – Descrição de um Sistema de Radar

O Sistema completo de um radar pode ser dividido basicamente em 4 partes: transmissor,

receptor, antenas e controle e armazenamento dos dados do radar. A seguir, apresentamos uma breve descrição de cada um dos sistemas com suas peculiaridades.

3.3.1 – Sistema de Antenas

O sistema de antenas, apesar de ser apenas uma componente do sistema dos radares, tem uma teoria própria e algumas técnicas que resultam em aspectos interessantes, como por exemplo, inclinação do feixe sem alterações mecânicas da mesma. A antena é um dispositivo capaz de converter energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada. O inverso também é válido, pois a antena é um dispositivo bidirecional, podendo realizar transmissão e recepção. Uma antena apresenta alguns parâmetros básicos de projeto, como ganho, efetividade e polarização de onda. A seguir, serão descritos os itens mencionados acima.

3.3.1.1 – Ganho e Efetividade

O ganho G é definido como a razão entre as áreas que antena irradiaria se fosse isotrópica, ou seja, emitisse com mesma potência em todas as direções, pela área que ela realmente irradia. Assim considerando o diagrama esquemático de irradiação apresentado na Fig. 3.2, podemos dizer que o ganho é dado por:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{A}, \quad (3.5)$$

onde $4\pi r^2$ representa a área que a antena irradiaria se fosse isotrópica e A é a área do feixe.

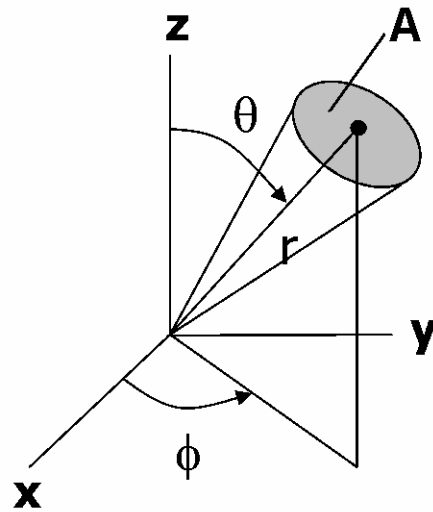


Fig. 3.2 – Representação esquemática da irradiação e uma antena e seu ganho.

O ganho e a área efetiva da antena também estão relacionados pela equação:

$$G(\theta, \phi) = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{ef}(\theta, \phi)}{\lambda^2}, \quad (3.6)$$

onde A_{ef} é a área efetiva de uma antena. Embora seja difícil determinar este parâmetro, para antenas com grande abertura, a área efetiva é bem próxima da área física. Dessa forma, podemos dizer que o ganho da antena depende basicamente de sua área física e da sua frequência de operação.

Outro parâmetro bastante comum na definição de uma antena é sua diretividade. A única diferença entre o ganho e a diretividade de uma antena, é que esta última considera as perdas na antena. Assim, a diretividade é dada por:

$$D(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi)}{\eta}, \quad (3.7)$$

onde η é o fator de eficiência da antena.

3.3.1.2 – Polarização da Onda

A polarização da onda é um critério muito importante a ser considerado no projeto das antenas de um radar, pois, conforme sua escolha, ela pode impedir o estudo de determinados fenômenos. Isso ocorre, pois alguns meios de propagação, como a ionosfera, são anisotrópicos, ou seja, não apresentam as mesmas características físicas em todas as direções. Para receber a máxima potência possível, a antena receptora necessita estar orientada na mesma direção da polarização de onda a ser recebida. Um meio de realizar o máximo aproveitamento da energia na recepção é a utilização de dipolos cruzados, os quais podem gerar e receber quaisquer tipos de polarização de onda.

3.3.2 – Sistema Transmissor

O sistema transmissor de um radar é composto de diversos circuitos eletrônicos que permitem a transmissão de pulsos de acordo com as características desejadas. Dentre eles podemos citar: osciladores, moduladores de pulso, misturadores, amplificadores de fase, divisores de potência, deslocadores de fase, duplexadores e os próprios transmissores.

No caso do radar RESCO, que utilizaremos como exemplo, a saída de cada um dos dois osciladores a cristal (30 MHz e 80 MHz) é conectada a um modulador de pulso e ao receptor. Os dois moduladores recebem os sinais senoidais gerados no controlador do radar e os modulam, cada um com sua devida portadora. O misturador recebe os sinais pulsados em 80 MHz e 30 MHz e oferece um sinal de saída, cuja frequência é uma composição da diferença e da soma de frequência dos sinais de entradas. No amplificador de frequência intermediária (FI) 50 MHz, o sinal com a soma das frequências é filtrado e o sinal com a diferença das frequências é amplificado. Sua saída conecta-se ao divisor de potência, onde posteriormente o sinal é dividido igualmente em oito partes. Um sinal de controle do radar determina a modificação na fase que ocorrerá nos deslocadores de fase, de acordo com o interesse do operador. O sinal chega aos oito transmissores, onde cada um é conectado a um módulo pré-amplificador-duplexador. Os duplexadores habilitam o uso da mesma seção da antena para transmissão e recepção.

3.3.3 – Sistema Receptor

O sistema receptor de um radar é composto de diversos circuitos eletrônicos que permitem a recepção de um ou mais sinais eletromagnéticos. Dentre estes circuitos podemos citar: pré-amplificadores, deslocadores de fase (os mesmos da transmissão), um combinador e um circuito receptor.

No sistema receptor do radar RESCO, por exemplo, o sinal chega ao conjunto de antenas e é encaminhado através do módulo pré-amplificador duplexador aos deslocadores de fase. Os deslocadores de fase são idênticos aos utilizados no sistema transmissor e são controlados da mesma forma, recebendo o mesmo deslocamento imposto no momento da transmissão. Em seguida, o circuito combinador soma os oito sinais, que posteriormente chegam ao circuito receptor. O circuito receptor amplifica o sinal, converte para uma FI de 30 MHz e o divide em duas partes idênticas. Uma das partes é passada a um detector de fase junto com a saída do oscilador de 30 MHz. A outra parte do sinal é passada a um segundo detector junto com a saída do oscilador de 30 MHz defasado eletricamente de 90°. As saídas dos dois detectores de fase chegam cada uma a um filtro onde as frequências indesejadas são removidas, juntamente com àquela que foram geradas nos processos de detecção de fase. Estas duas saídas do receptor são chamadas de sinal em fase e sinal em quadratura e contém as informações desejadas do sinal retro-espalhado do radar. A partir deste par de sinais pode ser determinada a velocidade de deslocamento da irregularidade que gerou o eco do sinal.

3.3.4 – Sistema de Controle e Armazenamento dos Dados

O sistema controlador de um radar é responsável por gerar os pulsos de controle dos sinais transmitidos, dos sinais recebidos, do sistema de armazenamento de dados e de possíveis alterações da posição do feixe da antena.

Esta unidade controla as variáveis do sinal transmitido, como a largura de pulso, frequência de repetição de pulsos e, em alguns casos, na codificação do pulso. Este

sistema ainda é responsável pelas variáveis de controle da recepção, como atenuação exigida pela unidade de aquisição de dados, tempo entre a transmissão do sinal e início da amostragem e número de amostras do sinal recebido.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÕES E DADOS UTILIZADOS

Para os objetivos a que se propõe este Projeto de Iniciação Científica, o Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz operacional no Observatório Espacial Equatorial em São Luis (MA) é utilizado como equipamento principal para estudo da eletrodinâmica do eletrojato equatorial na região brasileira. No entanto, no auxílio e confirmação dos resultados experimentais fornecidos por ele, são utilizados também magnetômetros e índices de atividade magnética para o estudo. Na seção que segue será dada uma breve descrição de cada um dos equipamentos, de forma a fornecer um melhor entendimento das técnicas utilizadas.

4.1 – Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz

Com o objetivo de estudar as bolhas ionosféricas e o eletrojato equatorial foi construído pela Divisão de Aeronomia da Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas, CEA-INPE/MCT, um radar de espalhamento coerente operando em 50 MHz. Ele detecta as irregularidades de plasma com escala de 3 metros de comprimento perpendiculares às linhas de campo magnético. A análise espectral dos ecos recebidos das irregularidades do eletrojato permite determinar o deslocamento Doppler em frequência e identificar os tipos de espectros que caracterizam as suas irregularidades. O radar, denominado Radar de ESpalhamento COerente de 50 MHz (RESCO), está instalado no Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/INPE - MCT, no Maranhão, com coordenadas geográficas 2,33° S, 44,20° O e latitude geomagnética 0,5° S, operando durante duas semanas a cada mês, de acordo com o calendário geofísico internacional.

O sistema de antenas do radar RESCO é composto por 768 dipolos do tipo COCO (*colinear co-array*), dispostos no arranjo de 32 x 24, ver Figura 4.1. As 32 antenas são dispostas em grupos de 2 antenas para sua alimentação pelos 8 transmissores, cada um de

12,5 KW. Cada antena do arranjo consiste de 24 dipolos ligados em série, dois a dois, alinhados no sentido norte-sul magnético.



Fig. 4.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde podem ser visto o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO. FONTE: Cortesia Dr. Clezio Marcos De Nardin.

O feixe do radar RESCO pode ser posicionado verticalmente ou oblíquo de 30° em relação ao zênite tanto para leste, quanto para oeste. Para a largura do feixe no sentido norte-sul foi escolhido o valor de 7° , no sentido leste-oeste foi escolhido uma largura de feixe de 3° . A configuração mais comumente empregada é a utilização de feixe oblíquo com 2,6 km de resolução em altura para estudos da Região E, onde se encontra o eletrojato.

4.2 – Magnetômetros

As componentes do campo magnético terrestre são preferencialmente medidas de duas formas: três componentes ortogonais da direção do Campo com valores positivos para norte (X), sul (Y) e vertical para dentro da Terra (Z) ou como magnitude horizontal (H), ângulo entre as componentes na direção norte e horizontal (D) e componente vertical, orientada para baixo (Z). Estes dois sistemas de descrição são conhecidos como XYZ e HDZ, respectivamente.

O magnetômetro é um dispositivo baseado em eletrônica que permite a medição destes parâmetros. Este equipamento pode tanto se encontrar enterrado a alguns metros de profundidade, quanto instalado em satélites científicos. Ele apresenta diferentes versões, onde cada versão possui características e aplicações diferentes. Alguns tipos mais comuns de magnetômetros são: Zeeman óptico, Variômetro Clássico, Fluxgate, SQUID e de Prótons.

4.2.1 – Magnetômetro Fluxgate

O magnetômetro do tipo Fluxgate é do tipo mais aplicado nos observatórios geomagnéticos modernos, mas também bastante utilizado em satélites científicos para medição de campos fracos. Suas desvantagens são a sensibilidade à temperatura e a necessidade de periódicas calibrações absolutas por um magnetômetro de Prótons.

Esse equipamento utiliza o método de periódicos chaveamentos do fluxo magnético no detector, recebendo a denominação de Fluxgate (do inglês, porta de fluxo). Ele utiliza um material altamente permeável para amplificar os sinais das componentes medidas do campo magnético, aplicando para isso uma antena com uma pequena espira. A intensidade do campo magnético é obtida pela geração de distorções harmônicas no campo de saída, medido por espirais secundárias sobre o núcleo (Campbell, 1997).

O Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/DAE/CEA/INPE–MCT, possui uma versão deste equipamento instalado a 1 metro de profundidade, numa distância de 60 metros de seu computador de processamento. Ele registra as variações diurnas do campo magnético relacionadas às induções do eletrojato equatorial, permitindo investigações experimentais sobre as variações temporais do campo.

4.3 – Índices de Atividade Magnética

A atividade geomagnética, incluindo as variações causadas pelas particulares solares no campo magnético, é cuidadosamente monitorada por instrumentos tanto na Terra como no espaço. A partir de medições destes instrumentos são calculados os índices de atividade magnética, que servem como instrumentos quantitativos de avaliação das condições geomagnéticas, possibilitando a análise de períodos calmos e perturbados por tempestades magnéticas. Dentre os índices magnéticos, devido à relevância ao trabalho, apresentaremos 5 deles no presente relatório: K_p , Dst, AU, AL e AE.

O índice K_p é a média dos valores obtidos no espaço de tempo de três horas dos níveis de distúrbio nas duas componentes horizontais do campo geomagnético, observado em 13 estações sub-aurorais selecionadas. Dessa forma, um dia completo tem oito valores de K_p : 0-3h, 3-6h, 6-9h, 9-12h, 12-15h, 15-18h, 18-21h e 21-24h. A escala usada é quase logarítmica, aumentando conforme o campo geomagnético se torna mais perturbado. O intervalo do índice K_p varia de 0 a 9, subdividindo-se em terças partes, resultando em 28 valores ao total: 0o, 0+, 1-, 1o, 1+, 2-, 2o, 2+, ... , 8o, 8+, 9-, 9o. O valor de referência para análise de períodos magneticamente calmos e perturbados é $K_p=4o$, valores acima dele são considerados perturbados, abaixo são calmos e iguais a ele são considerados como indefinido magneticamente (Rostoker, 1972). Um gráfico do índice K_p para o período de 27 a 31 de outubro de 2003 é apresentado na Fig. 4.2. Na figura podemos notar que entorno das 8h (UT) do dia 29 de outubro ocorre o começo da tempestade magnética com duração de aproximadamente 3 dias.

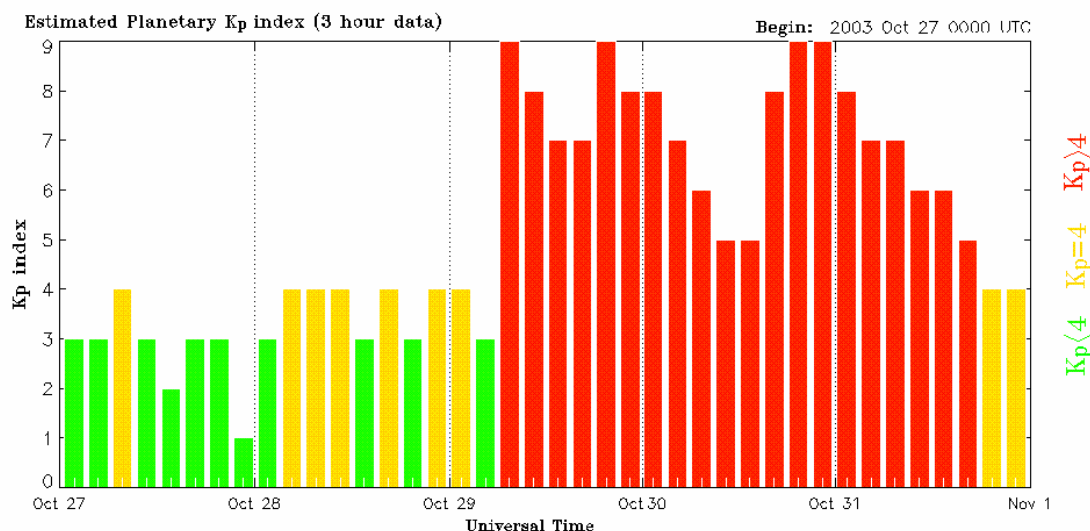


Fig. 4.2 – Índice K_p para o período de 27 a 31 de outubro de 2003. Podemos notar que entorno das 8h (UT) do dia 29 de outubro ocorre o começo da tempestade magnética com duração de aproximadamente 3 dias.
 Fonte: Adaptado de NOAA.NGDC, 2003.

O índice Dst é definido como a média da componente H do campo magnético, influenciada pela Corrente Anelar. Para cálculo do índice são utilizados magnetômetros instalados em estações próximas ao equador geomagnético. Pouco antes do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito (*sudden commencement*). Após esse pico desenvolve-se a fase principal (*main phase*) da tempestade que é caracterizada pela brusca queda no valor da intensidade do índice. Após a queda, o índice começa a aumentar seu valor. Esta parte da tempestade magnética denomina-se fase de recuperação (*recovery phase*). Quando a tempestade deixa de influenciar magneticamente a Terra, o valor do índice retorna ao seu valor normal. Um gráfico do índice Dst para o período de 10 a 18 de outubro de 2005 é mostrado na Fig. 4.3, onde é apontada cada uma das fases da tempestade magnética: regiões “a”, “b” e “c”, representado, respectivamente, o início súbito, a fase principal e a fase de recuperação.

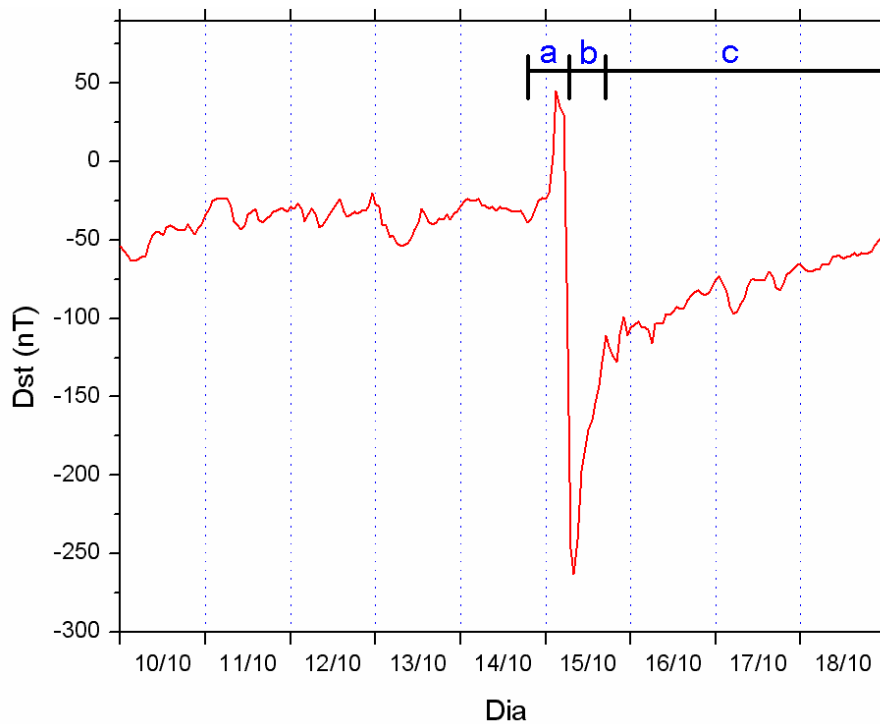


Fig. 4.3 – Índice Dst para o período de 10 a 18 de outubro de 2005. As regiões “a”, “b” e “c” representam, respectivamente, o início súbito, a fase principal e a fase de recuperação.

O índice AE é a diferença entre os índices AL e AU. Os índices AU e AL são respectivamente as medidas quantitativas dos envelopes magnéticos, máximo e mínimo, medidos por magnetômetros na zona auroral. Esses índices são na realidade medidas das alterações nas correntes ionosféricas aurorais causadas pelo depósito de energia cinética das partículas que se precipitam nessa região. Um gráfico dos índices AU (painel superior), AL (painel central) e AE (painel inferior) para o mês de março de 2003 é apresentado na Fig. 4.4. Na figura pode ser notada a presença de seis eventos que ocorrem entorno dos dias 4, 13, 20, 23, 28 e 31 de outubro.

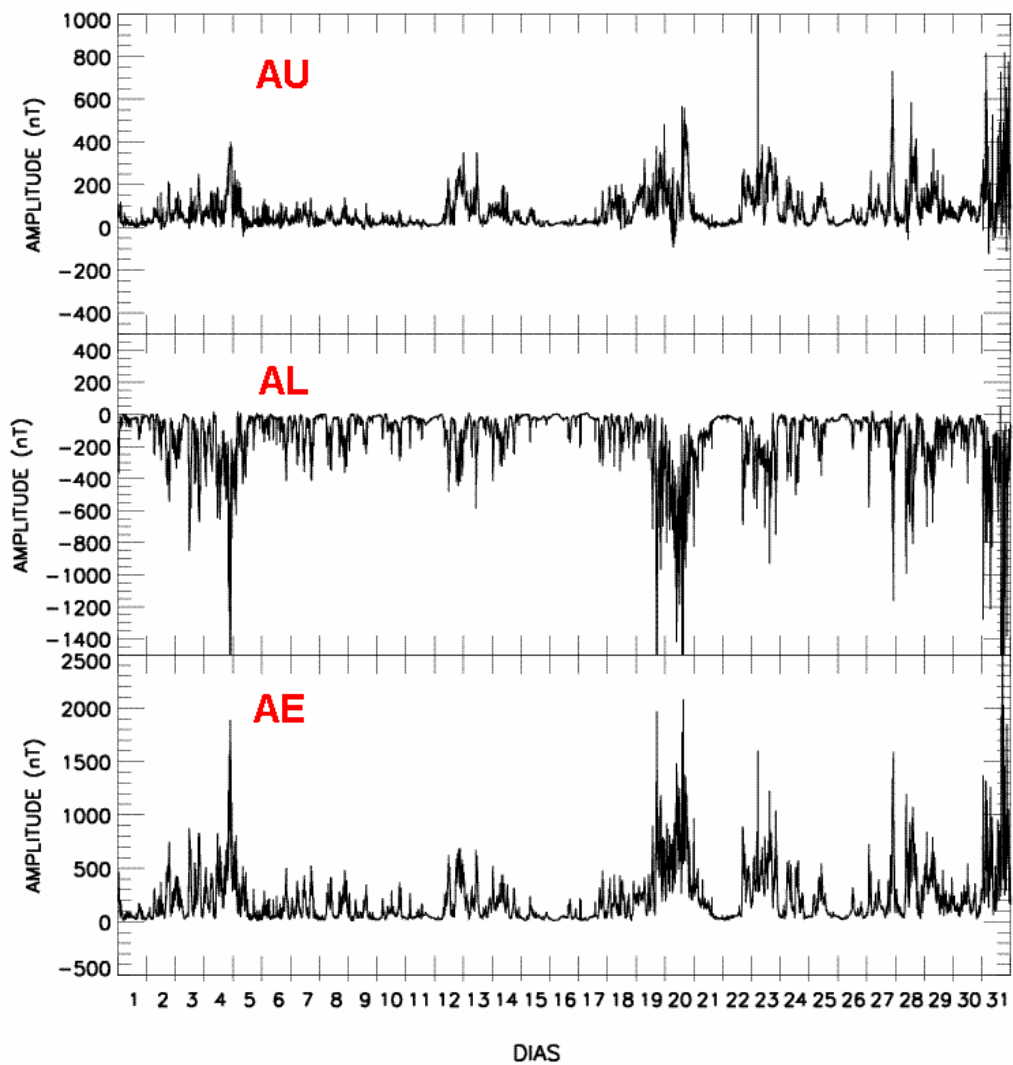


Fig. 4.4 – Índices AU (painel superior), AL (painel central) e AE (painel inferior) para o mês de março de 2003, onde pode ser notada a presença de seis eventos que ocorrem entorno dos dias 4, 13, 20, 23, 28 e 31.

CAPÍTULO 5

PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DO RADAR RESCO

O sinal retro-espalhado recebido pelo radar RESCO contém uma distribuição estatística do deslocamento Doppler em frequência. Como o sinal é retro-espalhado sobre um volume, que consiste de um grande número de alvos discretos com uma distribuição estatística de velocidades em torno da velocidade média (correspondente à real velocidade de deslocamento das irregularidades), é necessário fazer uma análise espectral do sinal recebido para determinarmos estas frequências. Nesta análise, os dados brutos são processados nas rotinas desenvolvidas no software IDL[®] (*Interactive Data Language*), fornecendo como principal resultado um mapa da variação temporal de intensidade versus altura, no qual podemos verificar a presença do eletrojato equatorial.

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos alguns aspectos referentes ao processamento dos dados do radar RESCO e a estimação de momentos espectrais das irregularidades do eletrojato, bem como técnicas de aperfeiçoamento desta estimação.

5.1 – A Aplicação das Rotinas de Processamento dos Dados

A rotina de pré-processamento do Radar RESCO inicia separando os dados dos dois canais por altura, agrupando e salvando num arquivo adicional. Após as componentes em fase (A) e quadratura (B) são agrupadas resultando num número complexo ($A + iB$). Um algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), é empregado para análise da densidade espectral de energia. O resultado da aplicação da FFT a este número complexo é um espectro para uma dada altura e para o tempo correspondente à aquisição do eco recebido, como visto na Figura 5.1.

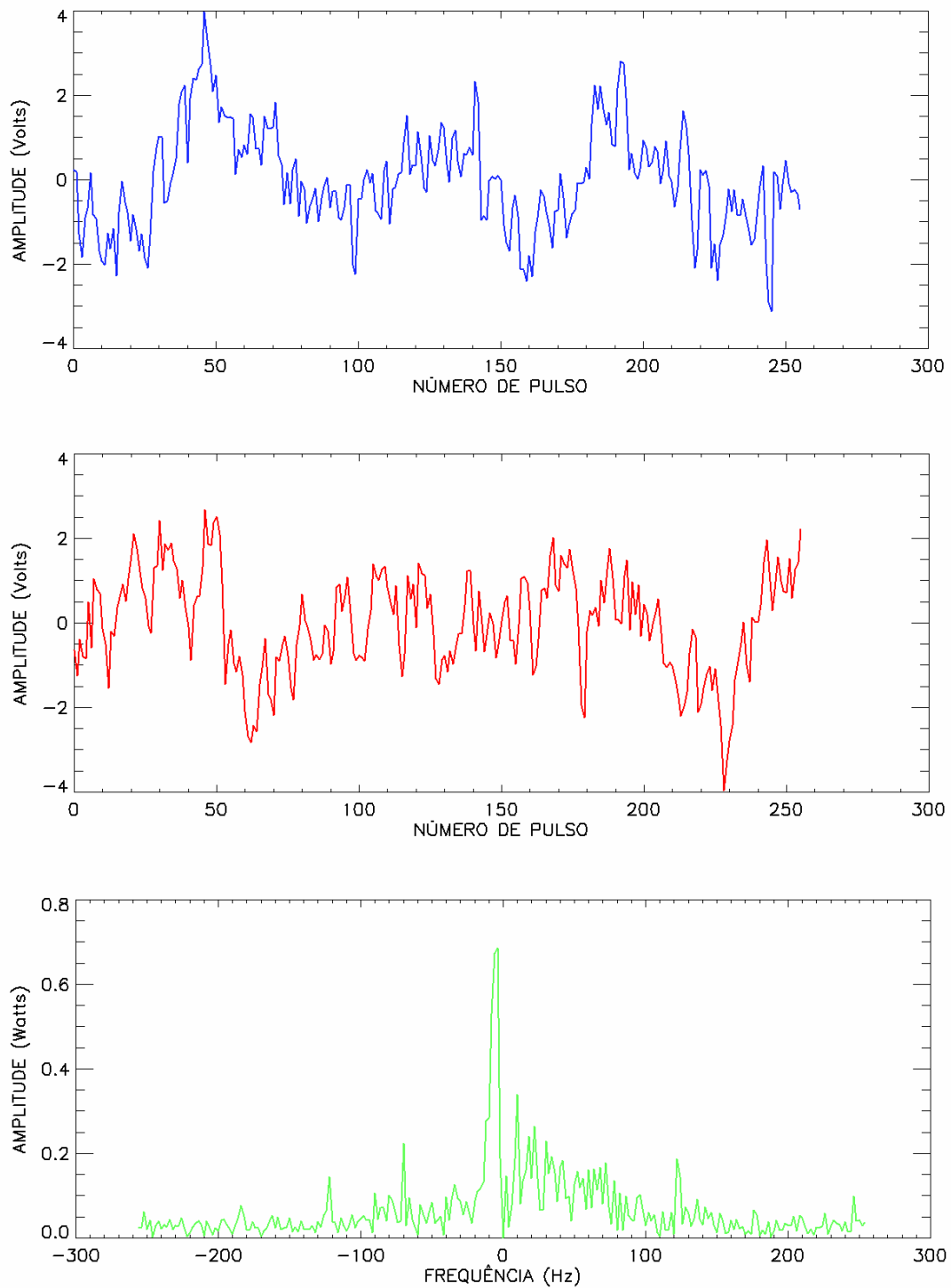


Fig. 5.1 – Exemplo da variação das componentes em fase (na cor azul) e em quadratura (em vermelho) e o espectro de potência obtido através da análise de Fourier destes dois sinais (em verde). Dados obtidos pelo RESCO correspondente a altura de 107,8 km, às 10h51 do dia 17 de outubro de 2003.

Agrupando vários espectros consecutivos obtemos um espectrograma (Figura 5.2), que é um mapa que mostra a variação do deslocamento Doppler em frequência em função do tempo. A integração em frequência de cada espectro de potência componente dos espectrogramas resulta na variação da potência total de sinal retro-espalhado ao longo do período de aquisição para a faixa de altura correspondente.

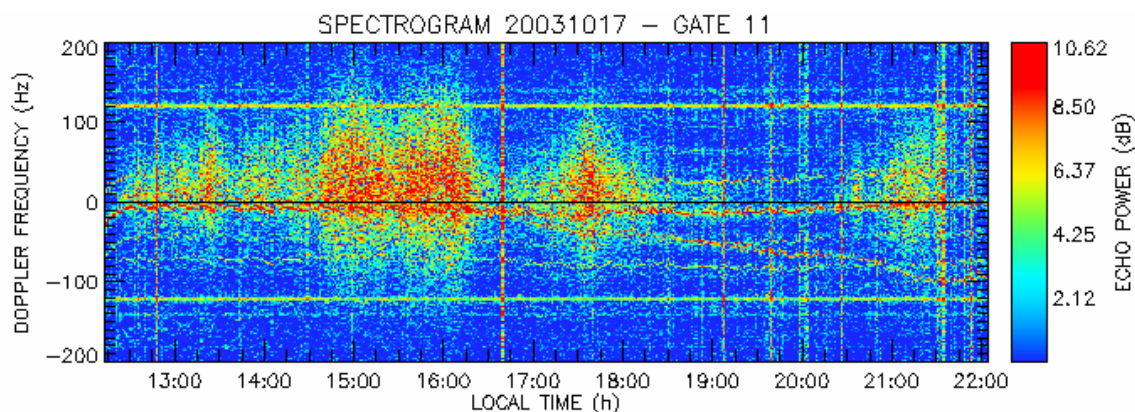


Fig. 5.2 – Exemplo de espectrograma originado pelo agrupamento de vários espectros consecutivos referentes à altura de 107,8 km. Dados obtidos pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do INPE - MCT para o dia 17 de outubro de 2003.

Agrupando o resultado de todos os espectrogramas, integrados em frequência, no seu respectivo tempo e altura, obtemos um mapa da variação de intensidade de potência, denominado mapa RTI (Figura 5.3), para o dia de aquisição.

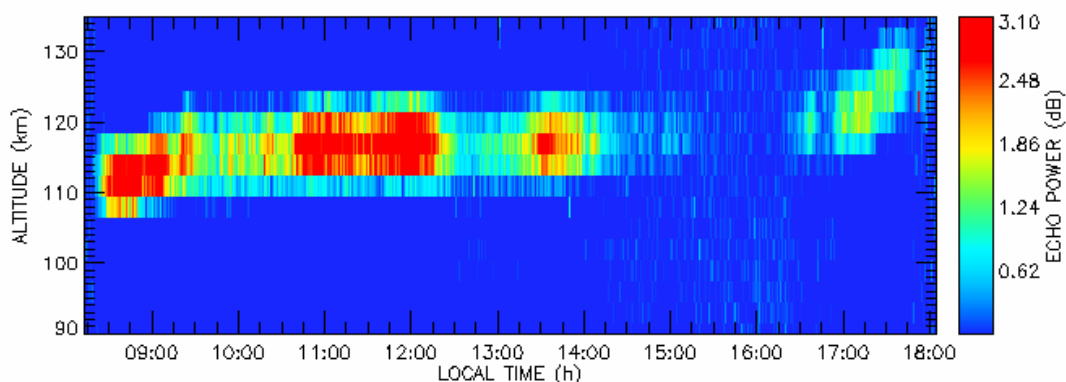


Fig. 5.3 – Exemplo de mapa de variação temporal de intensidade de potência em função da altura obtido pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do INPE - MCT para o dia 17 de outubro de 2003.

5.2 - Ajuste de Curvas de Espectros de Potência

Ao invés de cada espectro ser representado por um conjunto de pontos, ele pode ser representado por algum ajuste que reduza o volume de dados. Para isto, utilizamos no RESCO um ajuste por curvas Gaussianas. O motivo de escolhermos esse ajuste para modelar os dados dos espectros de potência do Radar, se deve ao fato dele se adaptar muito bem as curvas de experimentos de retro-espalhamento nas irregularidades do eletrojato equatorial.

O ajuste por curvas Gaussianas nada mais é que substituir o conjunto de pontos pelo valor da área, desvio padrão e posição central da curva. Contudo, como coexistem dois tipos de irregularidades no eletrojato equatorial, individualmente, cada espectro é ajustado pelo somatório de duas Gaussianas, dado por:

$$S(f) = \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d1})^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d2})^2}{2\sigma_2^2}\right] + P_N \quad (5.1)$$

onde P_1 e P_2 são, respectivamente, as áreas das Gaussianas representando os espectros Tipo 1 e Tipo 2, σ_1 e σ_2 são os desvios padrões, f_{d1} e f_{d2} são as velocidades Doppler e P_N é o nível de ruído.

A fim de determinar os sete parâmetros de cada espectro, $\mathbf{a} = \{f_{d1}, f_{d2}, \sigma_1, \sigma_2, P_1, P_2, P_N\}$, foi aplicado o Estimador de Máxima Verossimilhança (MLE, do inglês, *Maximum Likelihood Estimate*) a um ajuste não-linear. Este método é baseado na busca dos parâmetros \mathbf{a} que maximizem a probabilidade da função $P(y_1 \dots y_n | \mathbf{a})$ de observar o conjunto de dados $\mathbf{y} = \{y_1 \dots y_n\}$. Ele é também um problema de encontrar os parâmetros \mathbf{a} que minimize a soma dos quadrados dos erros residuais entre o conjunto de dados \mathbf{y} e as gaussianas $S(f)$, considerando a incerteza σ_i relacionada a cada ponto y_i . Assim, nossa função objetivo a ser minimizada é dada por:

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - S(f_i; P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)]^2}{\sigma_i} \quad (5.2)$$

onde N é o número de pontos em frequência, y_i é a amplitude espectral observada para uma dada frequência no espectro de potencia e todos os outros parâmetros já foram introduzidos anteriormente.

Um exemplo de espectro simulado com duas Gaussianas e ajustado pela função $S(f)$ é apresentado na Fig. 5.4. Podemos notar que a estimação dos parâmetros retorna uma curva bem ajustada, sendo assim, os dados são reduzidos com sucesso.

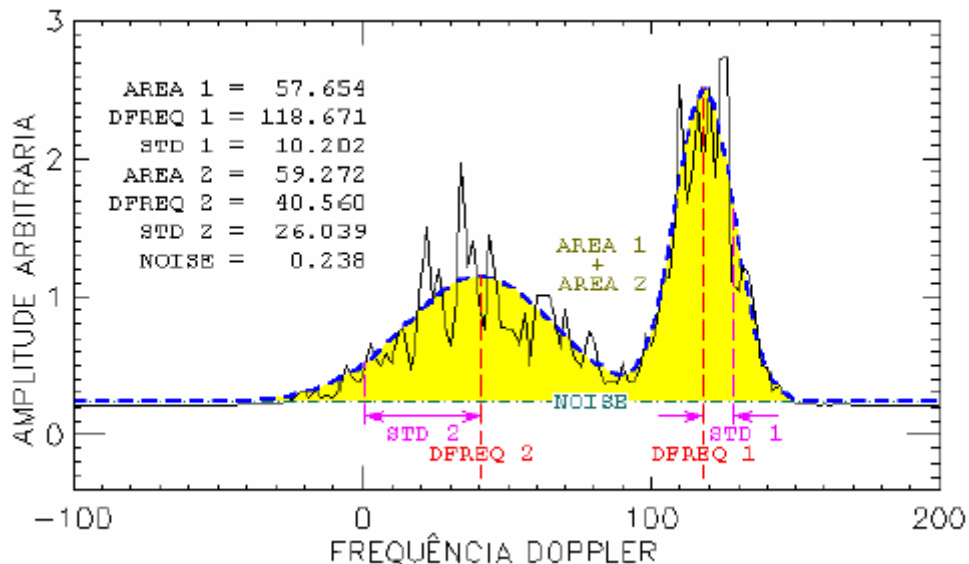


Fig. 5.4 – Espectro de frequência simulado (em preto) e seu ajuste por Gaussianas (em azul). A linha tracejada vermelha indica o centro da distribuição, a linha verde indica o nível de ruído e a diferença entre as linhas vermelha e violeta indica os respectivos desvios padrões.

Fonte: Denardini (2003, p.13)

5.3 – Processamento de Sinais

Na aplicação da estimação de parâmetros de dados de radar, sempre teremos um erro associado ao nosso ajuste. A fim de minimizarmos este fenômeno e obtermos uma melhor estimação de parâmetros são utilizadas diversas técnicas de processamento de sinais.

Dentre várias, nesse relatório descreveremos duas delas: restrição de parâmetros e integração incoerente.

5.3.1 – Restrição de Parâmetros

Restringir os parâmetros significa impor limites no espaço de parâmetros, os quais não podem ser cruzados pelo método durante a busca do ajuste da curva. Um modo de fazê-lo é impondo penalidade à função objetivo quando o método assume valores físicos irreais (Bard, 1974). Isto pode ser feito adicionando a seguinte função a Eq. (5.2):

$$\zeta_j = \frac{\alpha_j}{h_j(P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)}, \quad (5.3)$$

onde α_j é o peso da função e h_j é a penalidade da função para cada parâmetro da Gaussiana. Esta função deve ser positiva na região de busca válida, decrescendo rapidamente à medida que a busca se aproxima da região proibida, e sendo negativa quando o método cruza o limite. Dessa forma, os parâmetros das Gaussianas de espectros com características de irregularidades Tipo 1 e Tipo 2 poderiam ser limitados a valores aceitáveis fisicamente, por exemplo.

5.3.2 – Integração Incoerente

Para melhorarmos a performance dos algoritmos de ajuste de curvas que por ventura apresentam uma maior variância no espectro de potência,, geralmente se aplica a técnica de integração incoerente a espectros consecutivos. Visto que o ruído é uma componente aleatória, o espectro resultante tenderá a possuir menor variância. Uma ilustração da integração incoerente aplicada a cem espectros consecutivos é apresentada na Figura 5.5. A esquerda da figura apresentamos o conjunto de espectro com alta variância enquanto o espectro suavizado está à direita.

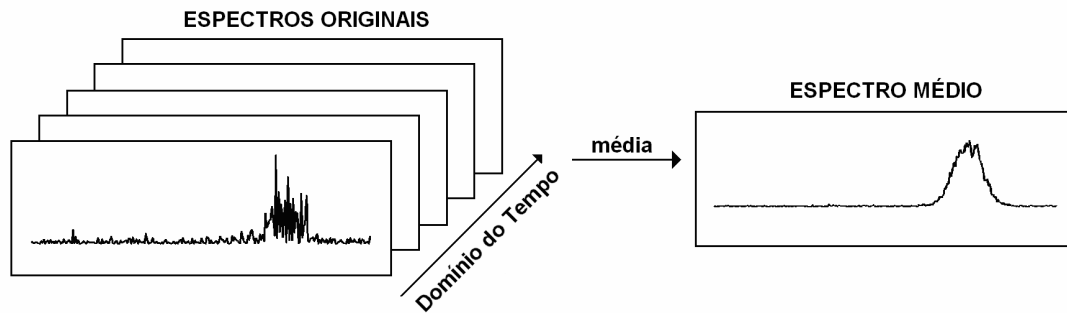


Fig. 5.5 – Ilustração de integração incoerente aplicado aos 100 espectros consecutivos da esquerda e o seu resultado ao lado direito.

A detectabilidade de um espectro Doppler pode ser definida por (Gage e Balsley, 1978):

$$D \equiv \frac{P_S}{\sigma_N} \quad (5.4)$$

onde P_S é o pico de densidade espectral do espectro de potencia e σ_N é o desvio padrão do ruído. A densidade de potência do ruído tem uma distribuição qui-quadrada (χ^2) com 2 graus de liberdade, visto que P_N resulta do somatório dos quadrados das componentes real e imaginária do espectro de amplitudes. A aplicação de integração incoerente, tomando a média dos N_i consecutivos espectros, não altera os valores médios das densidades espectrais do sinal e do ruído. O efeito da integração incoerente está em apenas elevar os graus de liberdade da distribuição χ^2 , ao invés de 2 graus sem integração, resultamos em $2 \times N_i$ graus de liberdade, elevando também a detectabilidade por $\sqrt{N_i}$ (Fukao, 1989). Por esta razão, a curva Gaussiana da Figura 5.5 torna-se mais visível.

CAPÍTULO 6

ATIVIDADES DE PESQUISA

O estudo da eletrodinâmica do eletrojato equatorial envolveu basicamente duas partes: a revisão teórica básica e as atividades relacionadas com o radar RESCO do Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/DAE/CEA/INPE–MCT, localizado no Maranhão, desenvolvido e construído no INPE/MCT. Contudo, as atividades do bolsista não se restringiram somente aos aspectos relacionados com o radar RESCO. O acadêmico deu continuidade ao monitoramento de índices de atividade magnética e ao desenvolvimento de rotinas para análise de dados de magnetômetros. Ainda salientamos a participação do Bolsista em eventos e elaboração de trabalhos científicos. Nas seções que se seguem apresentamos uma breve descrição das atividades mais relevantes desenvolvidas pelo Bolsista durante a vigência da bolsa PIBIC 2005-2006. São apresentados três estudos desenvolvidos pelo Bolsista objetivando uma melhor compressão do eletrojato equatorial, sendo dois relativos a processamento de sinais e outro sobre análise comparativa entre dados do RESCO e magnetômetros. No Apêndice A deste relatório é apresentada uma lista completa das suas publicações para o período de vigência bolsa.

6.1 – Estudo Estatístico da Aplicação de Integração Incoerente a Espectros de Potência das Irregularidades do Eletrojato Equatorial

A análise espectral de ecos recebidos das irregularidades do eletrojato equatorial nos permite identificar as características espectrais das irregularidades de plasma, tais como: o centro de distribuição de frequência, a largura e a potência espectrais. Cada um destes parâmetros fornece informações de diferentes aspectos do meio. O centro de distribuição de frequências, por exemplo, determina o deslocamento Doppler das irregularidades em relação ao sinal transmitido pelo radar. De forma a melhor determinar os parâmetros espectrais dos ecos de radar das irregularidades de plasma do EEJ, técnicas modernas têm sido utilizadas.

Neste trabalho apresentamos um estudo estatístico dos efeitos causados por uma técnica de processamento de sinais de radar aplicada a espectros: a integração incoerente. Esta técnica consiste em suavizar erros calculando a média entre espectros. Por exemplo, uma integração incoerente de 4 espectros consistiria em somar os mesmos e dividir por 4, dessa forma seria calculada a média das quatro curvas. Neste trabalho, aplicamos distintos valores de integração incoerente de forma a reduzir a variância nos espectros e avaliar a resposta do ajuste a esta integração. O resultado da aplicação desta técnica foi submetido em forma de manuscrito com o título “*Statistical Study of Applying Incoherent Integration to Power Spectra of the Equatorial Electrojet Irregularities*” para publicação na edição especial da Revista Brasileira de Geofísica intitulada *Low Latitude Aeronomy*, e será apresentado a seguir.

6.1.1 – Metodologia

Este trabalho foca-se no estudo de espectros de potência do Tipo 1 de sinais retro-espalhados nas irregularidades de plasma de 3 metros do EEJ. A característica principal destas irregularidades é apresentar um pico fino e de grande amplitude em torno de 120 Hz para radares operando na frequência de 50 MHz (frequência do radar RESCO).

O modelo de covariância de Zrnic (1979) foi utilizado para simular 10.000 espectros de potência de irregularidades de plasma com escala de 3 metros que tivessem características de espectros de potência de irregularidades do tipo Farley-Buneman. Cada espectro foi constituído de 256 pontos, com um deslocamento Doppler em frequência $f_d = 120$ Hz e um desvio padrão associado à múltiplos alvos $\sigma = 20$ Hz. Ainda, ruído branco foi adicionado aos dados no domínio do tempo de forma a garantir uma variância mais realística nos espectros de potência.

Uma vez que assumiu-se espectros de potência contendo somente um tipo de irregularidade, a equação do modelo de ajuste de duas Gaussianas (Eq 5.1) pôde ser simplificada para o caso de apenas uma curva, i.e., a série de dados será descrita por uma

função S em relação à frequência f , dada por:

$$S(f) = \frac{P}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\sigma^2}\right] + P_N \quad (6.1)$$

onde P , f_d , σ e P_N são respectivamente, a potência espectral, o centro da distribuição de frequências, a largura espectral e o nível de ruído. Um exemplo de um espectro simulado é apresentado na Fig. 6.1. Na figura, a linha tracejada verde representa P_N , a linha vertical vermelha mostra f_d , a diferença entre as linhas vertical laranja e vermelha determina σ e a área entre as linhas tracejada azul e verde define P .

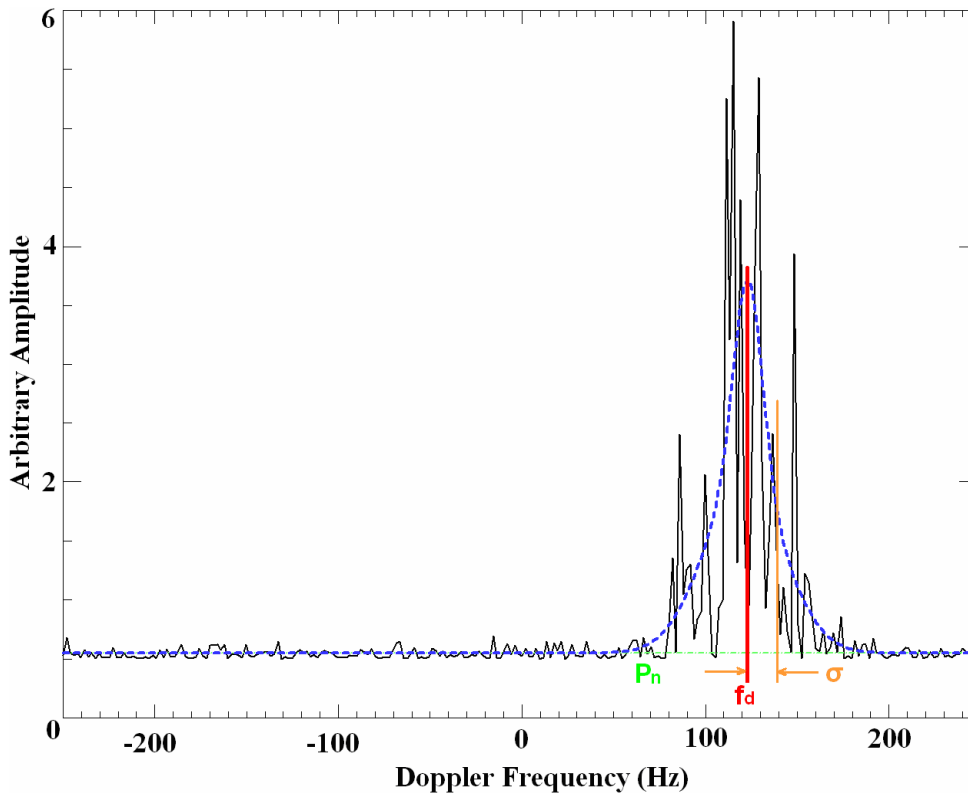


Fig. 6.1 – Espectro de potencia simulado (linha preta) sobreposto por uma curva Gaussiana (linha azul) ajustada ao espectro utilizando o Método de Mínimos Erros Quadráticos. A linha tracejada verde representa a densidade de potência de ruído (P_N), a linha vertical vermelha mostra o centro da distribuição de frequências (f_d), a diferença entre as linhas vertical laranja e vermelha determina o desvio padrão da curva Gaussiana ajustada ao espectro e a área entre a linha tracejada azul e a linha tracejada verde define a potência do sinal (P).

Com o propósito de estudar o efeito da integração incoerente, integramos o grupo de

10.000 espectros originais. Os espectros foram integrados incoerentemente em grupos de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros, de forma a criar dez outras séries de dados. Assim, foram obtidos onze grupos de espectros onde o primeiro possui 10.000 espectros não suavizados, o segundo com 5.000 espectros suavizados por 2 integrações incoerentes, o terceiro com 2.500 espectros suavizados por 4 integrações incoerentes e assim por diante. Após, cada um dos espectros dos onze grupos foram ajustados por uma única Gaussiana (Eq. 6.1) e seus momentos espectrais determinados. A análise básica consistiu em uma comparação direta do parâmetro f_d da curva ajustada com o valor de f_d *a priori* utilizado na geração dos espectros do Tipo 1. Além disso, foi estudada a resposta do ajuste em função do número de integrações incoerentes de forma a quantificarmos seu efeito sobre o ajuste de parâmetros.

6.1.2 – Resultados e Discussões

As distribuições da frequência Doppler do EEJ das curvas Gaussianas Tipo 1 calculadas pelo Método de MLE para diferente número de integrações (NICH) é apresentado na Fig. 6.2. Cada barra é posicionada na frequência central definida no eixo com $\pm 0,5$ Hz de resolução, por exemplo, a barra de 119,5 a 120,5 representa a resposta do ajuste para 120 Hz. Os histogramas da Fig. 6.2 mostram a distribuição da resposta do ajuste para o caso sem integração incoerente e onde integração incoerente de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros foram aplicados. Porém, devemos lembrar que o número de resposta é diferente para cada número de integrações. Para NICH=1 temos 10.000 respostas, para 2 integrações incoerentes nós temos 5.000 respostas, 2.500 para NICH=4 e assim por diante, i.e., o número inicial de espectros (10.000) dividido pelo número de espectros integrados. Contudo, o número de amostras utilizado não sugere em mudanças drásticas nos resultados, como visto ao longo da análise. Além disso, esperamos quase o mesmo limite de confiança em resultados com número diferente de amostras visto que o modo como os espectros foram simulados e o algoritmo utilizado nos ajustes eram os mesmos.

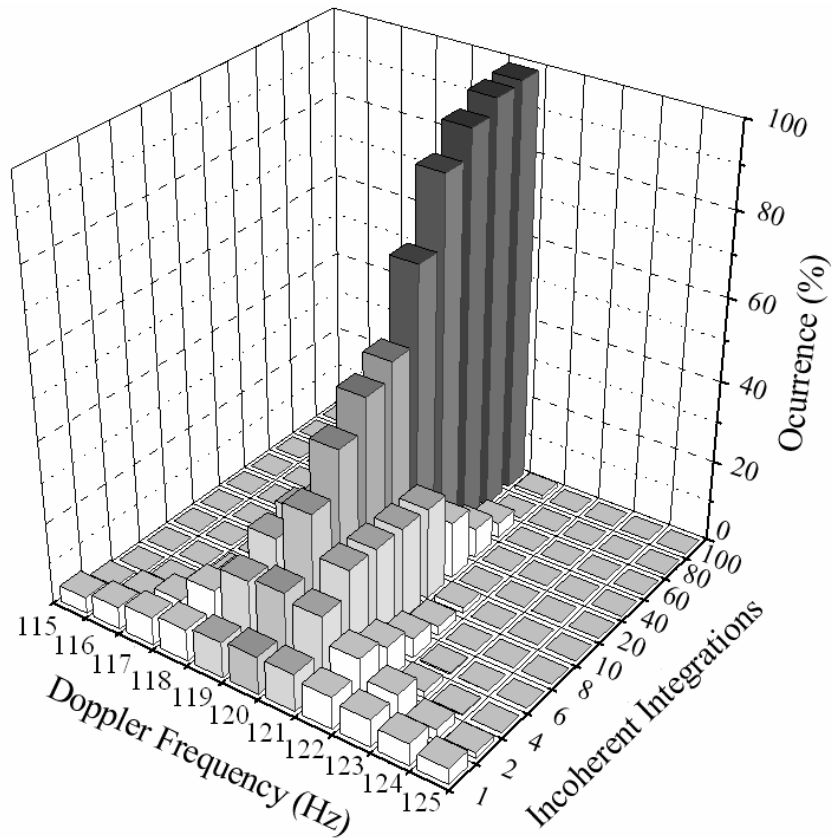


Fig. 6.2 – Porcentagem de ocorrência das frequências Doppler estimadas por MLE utilizando espectros sem integração incoerente e integração de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros. Cada frequência Doppler é centrada na frequência inteira definida no eixo com $\pm 0,5$ Hz de resolução.

Quanto maior o número de integrações incoerentes, maior será o número de respostas próximas do valor correto, como mencionado anteriormente e revelado pelos dados apresentados na Fig. 6.2. Uma interpretação clara deste resultado é assumir que, como o número de espectros na integração incoerente foi aumentado, o grau de sucesso no cálculo do parâmetro de teste (f_d) foi melhorado. Embora o aumento no grau de sucesso seja muito bom, a aplicação da técnica implica em perda de resolução temporal. Por exemplo, no caso de integração incoerente de 10 espectros, a resolução temporal piora por um fator de 10, i.e., nossa resolução sofre deterioração diretamente proporcional ao número de espectros usados na integração.

Quantitativamente, não usando nenhuma integração incoerente, 9,25% das respostas

estavam próximas do valor de f_d *a priori* ($120 \pm 0,5$ Hz). Usando integração incoerente de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros, aumentou-se esta porcentagem para 19,20%, 32,76%, 43,04%, 50,56%, 54,40%, 72,40%, 88,80%, 95,18%, 98,40% e 99,00%, respectivamente. Isto indicou que a eficiência do método aumentou de 9,25% a 99,0%, com um erro estatístico de 0,42% ($\pm 0,5$ Hz), quando não se utiliza integração incoerente para o uso de integração incoerente de 100 espectros. A análise da relação do número de espectros integrados (NICH) e o número de ocorrências perto do valor da frequência Doppler *a priori* ($f_d = 120 \pm 0,5$ Hz) é apresentada na Fig. 6.3. As integrações incoerentes analisadas são os pontos azuis. O erro (região verde) é calculado baseado no número de amostras aplicado à análise, conseqüentemente, como se aumentou o número de integrações incoerentes aumentou-se também o erro. A linha nomeada saturação marca o máximo valor possível de porcentagem, i.e., 100% de ocorrências.

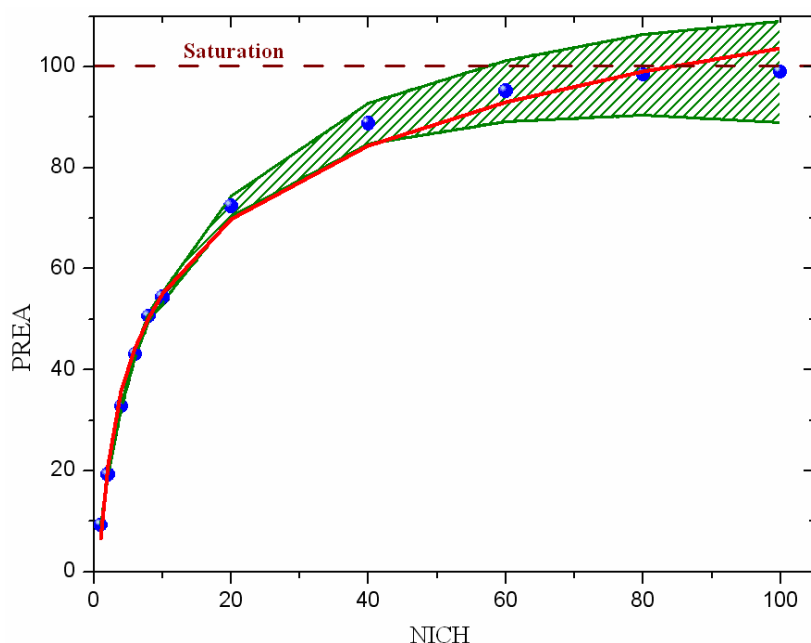


Fig. 6.3 – Porcentagem do número de respostas bem estimadas (*PREA*) em função do número de espectros utilizados nas integrações incoerentes (*NICH*). As integrações incoerentes analisadas estão em azul, o erro estatístico é representado pela região verde e a curva logarítmica ajustada está em vermelho. A linha tracejada mostra a saturação de *PREA*, i.e., 100% das ocorrências.

Esta figura mostra uma dependência logarítmica da porcentagem de respostas corretas em função do número de integrações incoerentes. De forma a quantificar esta relação,

executou-se um ajuste linear de crescimento logarítmico a esta curva, representada pela curva vermelha na Fig. 6.3, dado pela equação:

$$PREA = \alpha * \ln(NICH) + \beta, \text{ para } 1 \leq NICH \leq 100. \quad (6.2)$$

onde NICH é o número de integrações incoerentes, PREA é a porcentagem de respostas estimadas corretamente, α pode ser considerado como um fator de crescimento de PREA e β é a PREA observada quando nenhuma integração de incoerente é aplicada ao conjunto de dados. Os ajustes resultaram em $\alpha = 21,11 \pm 0,60$ e $\beta = 6,49 \pm 1,77$, com um fator de correlação quadrático de $R^2 = 0,9928$. Os pontos com mais baixo NICH são mais bem ajustados que os mais altos por duas razões principais: (a) foi utilizado um número maior de espectros (amostras) para NICH mais baixos e (b) os pontos disponíveis no gráfico estão mais próximos para baixos NICH (2, 4, 6, 8 e 10) em comparação com os pontos obtidos quando NICH é mais alto (20, 40, 60, 80 e 100). Mas apesar do crescimento logarítmico (curva vermelha da Fig. 6.3) não se ajustar perfeitamente aos dados (pontos azuis) para valores de NICH altos, foi obtido um fator de correlação quadrática maior que 99% e o ajuste resultou numa curva dentro da região de erro. Além disso, se tivessem sido estudados valores de NICH mais altos que 100, como por exemplo, 1.000 espectros integrados, esperar-se-ia um melhor ajuste da curva de crescimento logarítmica.

Outro ponto a ser analisado neste trabalho é o passo do aumento de boas estimativas com o aumento do número de integrações incoerentes. Pode ser visto na Fig. 6.3 que a porcentagem de respostas certas difere em menos de 5% quando o NICH é aumentado de 60 a 100. Quando NICH cresce de 60 a 100 integrações, porém, a resolução temporal é aumentada por quase 66%. Isto indica que deve haver algum ponto ótimo sobre o qual o aumento no NICH não melhora a PREA substancialmente sem comprometer a resolução temporal. Dessa forma, se for necessário utilizar integração incoerente, conforme os resultados, deve-se escolher baixos valores de integrações incoerentes, i.e., antes da região assintótica da lei logarítmica (Eq. 6.2). É necessário lembrar que a Eq. (6.2) é um resultado da análise de dados simulados e é possível obter-se diferentes valores de

variância num caso de espectros reais de radar. Assim, apesar de Eq. (6.2) não dar uma descrição dos casos gerais de variância, é esperado que a relação logarítmica entre PREA e NICH permaneça válida, sendo útil para análises qualitativas.

6.1.3 – Conclusões

A técnica de integração incoerente se mostra ser uma valiosa ferramenta resultando numa melhoria significativa na determinação do parâmetro de teste: o centro da distribuição de frequência (f_d) dos espectros de potência dos ecos de radar das irregularidades de EEJ. Aumentar o número de espectros integrados incoerentemente pode resultar numa estimativa de parâmetros melhorada; porém, deve-se aceitar uma piora na resolução temporal. No caso do radar de RESCO, no qual é obtido normalmente um espectro a cada 6 segundos, uma integração incoerente de 10 espectros resultaria numa piora da resolução temporal para um espectro a cada minuto. Para estudos da dinâmica do EEJ este número de integrações não comprometeria a maioria dos resultados da análise. O uso de um alto número de espectros na integração incoerente pode melhorar a estimativa do centro de distribuição de frequência consideravelmente, porém, como foi mostrado no estudo presente, poderia conduzir a uma resolução temporal indesejável. De forma a quantificar esta relação, foi derivada uma lei logarítmica entre a porcentagem de respostas estimadas corretamente e o número de integrações incoerentes (equivalente à resolução temporal): $PREA = 21,11 * \ln(NICH) + 6,49$. Esta relação logarítmica dá uma descrição qualitativa do comportamento do diferente número de integrações aplicada aos espectros e os termos obtidos na análise dão uma descrição quantitativa. Conseqüentemente, a escolha de números de integrações incoerentes antes da porção assintótica da lei logarítmica mostra mais benefícios no equilíbrio entre resolução temporal e boas estimativas no caso de espectros de potência das irregularidades de EEJ. Finalmente, deve ser mencionado que a escolha do número de integrações incoerentes deve ser relacionada ao objetivo da pesquisa, não podendo ser generalizada, sempre dependendo do nível de variância e da resolução temporal do conjunto de dados e do número de amostras utilizadas.

6.2 – Estudo Estatístico da Restrição de Parâmetros Aplicado ao Ajuste de Curvas de Espectros de Potência das Irregularidades do Eletrojato Equatorial

O Estimador de Máxima Verossimilhança, apresentado na seção 4.3.1, é extensivamente utilizado em muitas áreas das ciências espaciais para ajustar equações matemáticas a dados amostrados. Em estudos do EEJ baseado em dados de radar de retro-espalhamento coerente, este método tem sido usado para ajustar a soma de duas Gaussianas aos espectros de potência dos ecos retro-espalhados em irregularidades de plasma com escala de 3 metros. Este ajuste é feito de forma a identificar as velocidades Doppler dos dois tipos de irregularidades de plasma presentes em ecos do EEJ. Para isso, foram simulados ecos de radar coerente para gerar espectros de potência contendo a característica de irregularidades do eletrojato. As simulações foram feitas com base em parâmetros *a priori* de irregularidades de plasma tais como velocidade de grupo e largura espectral. Utilizando o grupo de dados simulados, realizamos um estudo estatístico da restrição do espaço de parâmetros com o estimador MLE aplicado ao ajuste de duas Gaussianas a espectros de potência. A distribuição da variância dos parâmetros da Gaussiana é apresentada e analisada em termos dos pesos das funções de penalidade. Uma análise da variância de cada parâmetro em função do valor da restrição é também apresentada. Os resultados da aplicação desta técnica estão no trabalho “*Statistical Study of Constraining Parameters in Least Square Method Applied to Gaussians Fit to Power Spectra of Simulated Radar Echoes of Electrojet Plasma Irregularities*” e foi apresentado em Nova Delhi, Índia, no XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science, URSIGA, que ocorreu entre os dias 23 e 29 de outubro de 2005. O mesmo estudo será reproduzido a seguir.

6.2.1 – Metodologia

Este trabalho foca-se no estudo de espectros de potência do Tipo 1 de sinais retro-espalhados nas irregularidades de plasma de 3 metros do EEJ. A característica principal destas irregularidades é apresentar um pico fino e de grande amplitude em torno

de 120 Hz para radares operando na frequência de 50 MHz (frequência do radar RESCO). O modelo de covariância de Zrnic (1979) foi utilizado para simular espectros de potência de irregularidades de plasma com escala de 3 metros que tivessem ambas as características de espectros de potência de irregularidades do tipo “dois-feixes” e “deriva de gradiente”, cada espectro contendo 256 pontos. Irregularidades do Tipo 2 foram simuladas com frequência Doppler $f_{d2} = 80\text{Hz}$, desvio padrão $\sigma_2 = 50\text{Hz}$ e relação sinal-ruído $SNR_2 = 3\text{dB}$. Para irregularidades do Tipo 1 foram simulados três grupos de dados possuindo a mesma frequência Doppler (f_{d1}) e desvio padrão (σ_1), isto é, 120Hz e 20Hz, respectivamente. Porém, para cada grupo de espectros do Tipo 1 foi escolhida uma relação sinal-ruído (SNR_1): 3dB, 6dB e 9dB. Em seguida, foram somados cada espectro dos três grupos de espectros do Tipo 1 com cada espectro do conjunto de espectros do Tipo 2. Isto resultou em três grupos de espectros simulados de irregularidades de plasma do EEJ: 1) Tipo 2 com 3dB mais Tipo 1 com 3dB; 2) Tipo 2 com 3dB mais Tipo 1 com 6dB e 3) Tipo 2 com 3dB mais Tipo 1 com 9dB. Ruído branco foi adicionado aos sinais no domínio do tempo de forma a garantir uma variância mais realística nos espectros de potencia. Dessa forma, cada espectro simulado é descrito pela soma de duas Gaussianas e um nível de ruído, onde cada Gaussiana possui três parâmetros: centro da distribuição (frequência Doppler), área (potência) e desvio padrão (largura a meia potência). A fim de determinar os sete parâmetros foi utilizado Estimador de Máxima Verossimilhança (MLE) para ajuste não-linear de curvas. Como forma de aprimorar a determinação dos sete valores acima, o espaço de parâmetros foi restringido, i.e., foram impostos limites inferiores e superiores aos valores que eles poderiam assumir durante a busca do ajuste da curva. Um modo de fazê-lo, o qual foi utilizado neste trabalho, é impondo penalidades à função objetivo quando o método assume valores físicos irreais (Bard, 1974). Isto pode ser feito, conforme descrito no item 5.3.1, utilizando uma função de penalidades (Eq. 5.2), onde α_j é o peso da função e h_j é a penalidade da função para cada parâmetro da Gaussiana. Esta função deve ser positiva na região de busca válida, decrescendo rapidamente à medida que a busca se aproxima da região proibida, e sendo negativa quando o método cruza o limite. Dessa forma, os parâmetros das Gaussianas de espectros com características de irregularidades Tipo 1 e Tipo 2 são limitados a valores aceitáveis

fisicamente. Para este estudo foram simulados 3.000 espectros com características de irregularidades do EEJ dos Tipos 1 e 2, e separadas em três diferentes grupos (contendo 1.000 espectros cada um) de acordo com SNR_1 . Em seqüência, cada espectro foi ajustado por duas Gaussianas, restringindo f_{dI} entre 100 e 150 Hz, o que corresponde a uma velocidade Doppler entre 300 e 450 m/s (para um radar de 50 MHz). Além disso, foi estudada a resposta do ajuste pela restrição de parâmetros com cinco diferentes pesos na função de penalidades 10^0 , 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} e 0. A análise básica consistiu numa comparação direta do f_{dI} dos espectros ajustados utilizando curvas Gaussianas com os valores de f_{dI} *a priori* utilizados na simulação de espectros do Tipo 1. Foram também comparados o comportamento da variância de f_{dI} e o desvio padrão da Gaussiana Tipo 1 (sd_1) em relação aos pesos das funções de penalidades (α_j) e aumento do nível sinal-ruído da Gaussiana Tipo 1 (SNR_1).

6.2.2 – Resultados e Discussões

As distribuições da freqüência Doppler da Gaussiana Tipo 1 (f_{dI}) bem como seu valor estimado pelo Método MLE para diferentes pesos (α_j) na função de penalidades é apresentado na Fig. 6.4. Os resultados para o primeiro grupo de dados, Fig. 6.4-a, mostra o caso para o qual os espectros Tipo 1 foram simulados utilizando $SNR_1 = 3$ dB. Fig. 6.4-a apresenta a distribuição para o caso quando $SNR_1 = 6$ dB e a Fig. 6.4-c exibi a distribuição de f_{dI} versus α_j quando $SNR_1 = 9$ dB. Nesta figura pode ser visto que a distribuição de f_{dI} não se modifica muito decrescendo α_j de 10^0 to 10^{-3} . Contudo, algumas diferenças podem ser notadas na distribuição de f_{dI} quando as funções de penalidades não são aplicadas. A distribuição parece se alargar em torno da freqüência esperada (120 Hz) quando restrições de parâmetros são aplicadas. Este efeito torna-se notável quando SNR_1 é comparável a SNR_2 . Ainda pode ser visto que quando SNR_1 varia de 3 a 9dB o método claramente aumenta a porcentagem de espectros ajustados com o valor correto de f_{dI} . Isto era esperado, mas deve ser lembrado que um aumento na potência do sinal iria elevar a variância em torno do pico do espectro de potência, o que eleva as incertezas do método de ajuste. Contudo, o Método MLE fornece bons resultados até mesmo quando os pontos dos dados têm altos valores de variância (Press et al, 1992), o que parece ser o caso

apresentado.

As distribuições da variância da frequência Doppler estimadas da Gaussiana Tipo 1 (Vf_{dl}) associadas com o método de ajuste para diferentes pesos das funções de penalidades (α_j) é mostrado na Fig. 6.5. Como anteriormente, Fig. 6.5-a mostra os resultados para $SNR_1 = 3\text{dB}$, Fig 6.5-b apresenta as distribuições para $SNR_1 = 6\text{dB}$ e Fig. 6.5-c exibi as distribuições para 9dB . Em todas as figuras os valores baixos de Vf_{dl} (<1) aumentam com a aplicação de restrição de parâmetros, o que poderia levar a interpretação de que f_{dl} está mais bem estimado. Contudo, quando restrições são aplicadas, ou seja, foram impostas penalidades à função objetivo é adicionada Eq. (5.3) com α_j no numerador. Uma vez que Vf_{dl} é derivado do inverso do gradiente da função objetivo, quanto maior α_j , menor Vf_{dl} . Assim, a suposição anterior baseada na Fig. 6.5 de que f_{dl} está mais bem estimada quando utilizando restrição de parâmetros não deve ser considerada como conclusiva. Além disso, Fig. 6.4 mostra que a distribuição de f_{dl} espalha-se para α_j diferente de zero. Uma explicação para o aumento mostrado na Fig. 6.5 é pensada como sendo oriunda do ajuste de picos agudos.

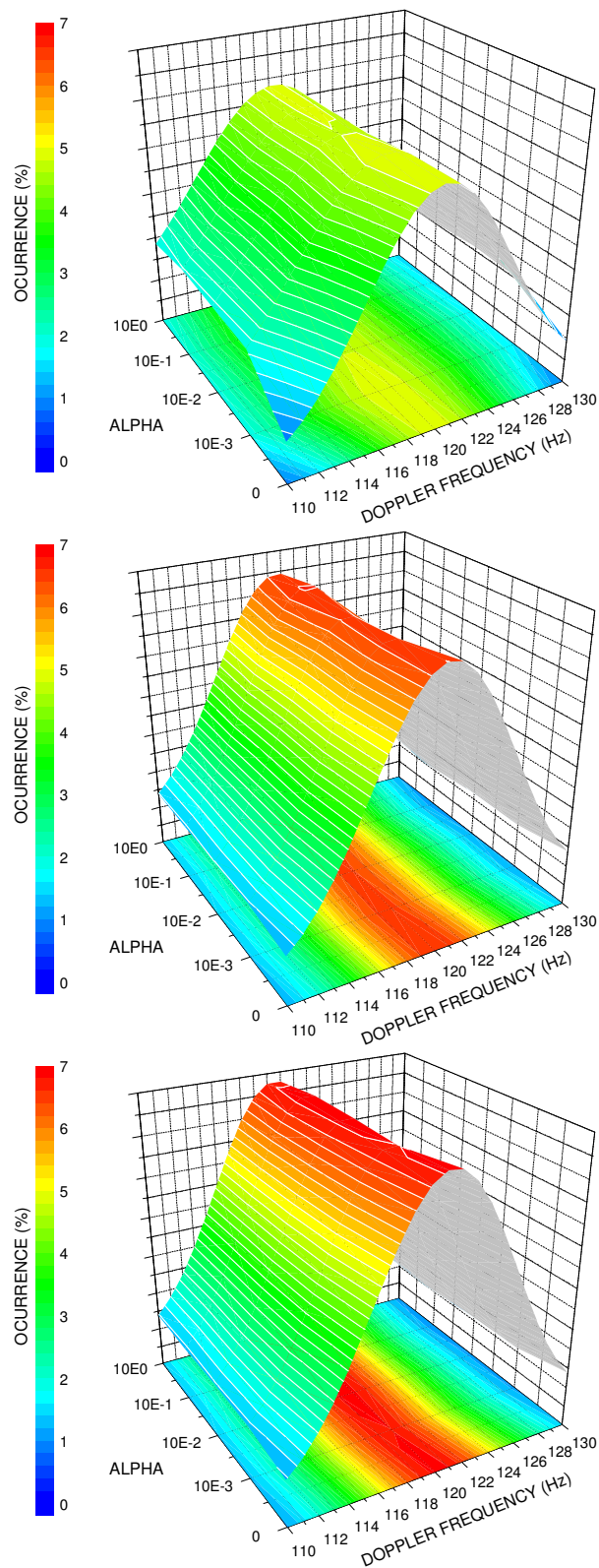


Fig. 6.4. Distribuição da frequência Doppler Tipo 1 versus α_j para SNR₁ igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.

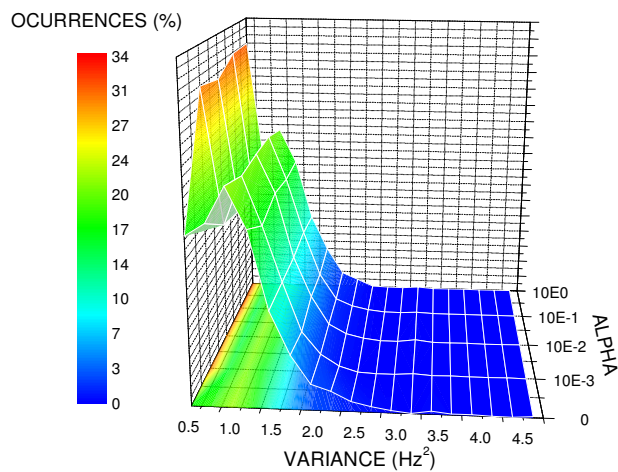
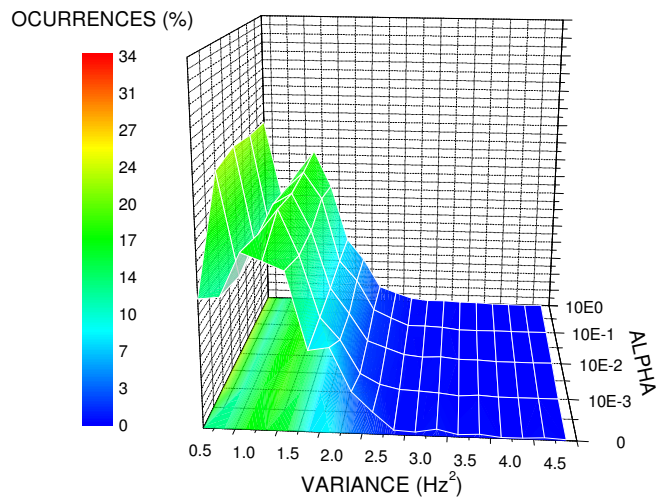
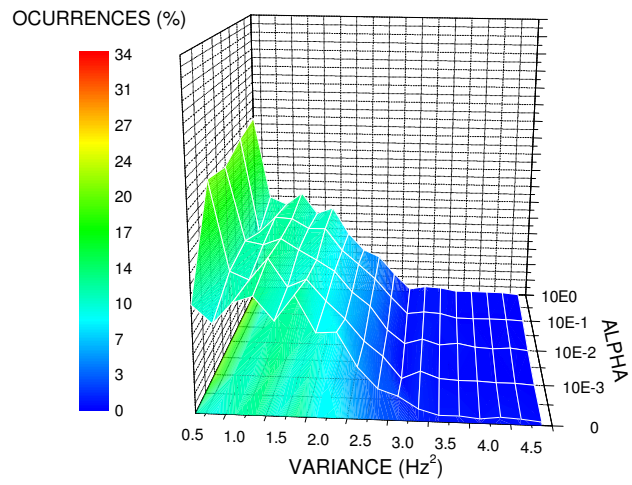


Fig. 6.5. Distribuição da variância da frequência Doppler Tipo 1 versus α_j para SNR_1 igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.

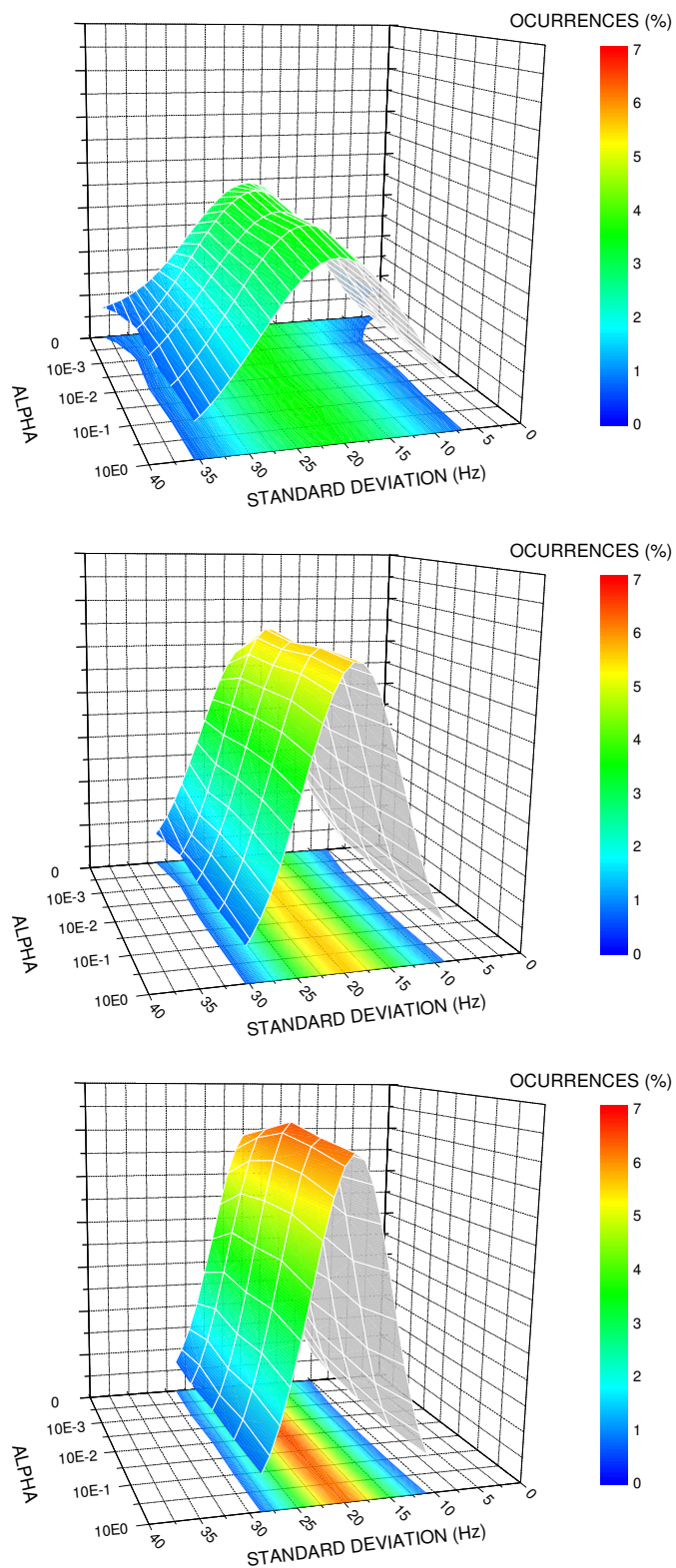


Fig. 6.6. Distribuição do Desvio Padrão da Gaussiana Tipo 1 versus α_j para SNR_1 igual a (a) 3dB, (b) 6dB e (c) 9dB.

As distribuições do desvio padrão (σ_I) estimados para a curva Gaussiana Tipo 1 para diferentes pesos da função de penalidades (α_j) são apresentadas na Fig. 6.6. Fig. 3-a mostra os resultados quando foi usado $SNR_I = 3\text{dB}$, Fig. 2-b apresenta os resultados quando usando 6dB e Fig. 2-c exibe a distribuição para $SNR_I = 9\text{dB}$. Pode ser visto que a distribuição de σ_I torna-se mais estreita com o aumento de SNR_I de 3 para 9dB. Os gráficos individuais mostram que a ocorrência de σ_I próximo de 20 Hz não muda muito com o aumento de α_j de 10^0 to 10^{-3} . Mas alguma diferença é observada na distribuição de σ_I quando não é aplicada restrição de parâmetros. As distribuições se espalham na base e têm sua amplitude diminuída. Isto indica que a precisão na estimação de σ_I aumenta quando α_j difere de zero. Contudo, como mostra a Fig. 6.7, a precisão na estimação de σ_I é balanceada pela redução no número de espectros ajustados. Esta figura mostra que a porcentagem de espectros ajustados em função de α_j para SNR_I igual a 3dB (preto), 6dB (azul marinho) e 9dB (azul claro). De qualquer forma, o aumento na precisão da estimação de σ_I parece ser o melhor resultado da aplicação de restrição de parâmetros.

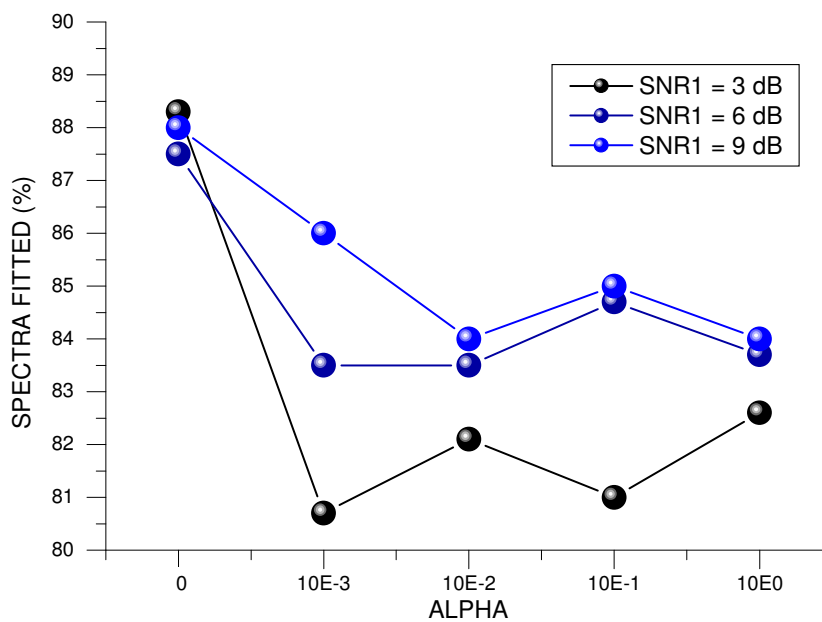


Fig. 6.7. Porcentagem de espectros ajustados em função de α_j para SNR_I igual a 3dB (preto), 6dB (azul marinho) e 9dB (azul claro).

6.2.3 – Conclusões

Neste trabalho de pesquisa foi estudado o efeito da restrição de parâmetros das curvas Gaussianas durante ajuste de curvas aplicado a espectros de potência simulados contendo características da presença das bem conhecidas irregularidades de plasma dos Tipos 1 e 2 do eletrojato equatorial. A conclusão principal é que a aplicação de restrição de parâmetros pode comprometer a estimação da frequência Doppler f_{dI} , aumentando as incertezas entorno do valor “correto”. Por outro lado, o desvio padrão da Gaussiana Tipo 1 parece estar mais bem ajustada, como apresentado na Fig. 6.6. Os resultados mostram que a aplicação de restrição aparentemente reduz a variância da curva. Entretanto, esta redução parece não conduzir a um bom ajuste uma vez que f_{dI} não se comporta da mesma forma. Pelo contrário, sua distribuição espalha-se quando α_j difere de zero. Além disso, a inclusão da Eq. (5.3) com α_j no numerador da função objetivo irá reduzir Vf_{dI} , como demonstrado. A observação de somente Vf_{dI} para o ajuste de um único espectro poderia induzir a má interpretação da qualidade do ajuste. Embora estas conclusões pareçam simples, elas têm impacto direto na análise de dados de ecos de radares de retro-espalhamento coerente. Uma aplicação da restrição do espaço de parâmetros sem a consideração do que foi apresentado no trabalho não iria comprometer qualquer resultado baseado na velocidade Doppler das irregularidades do Tipo 1. Certamente, isto poderia levar a um erro maior e talvez a propagação de erros na determinação de quantidades dependentes como campos elétricos inferidos a partir das velocidades Doppler das irregularidades. Finalmente, é importante mencionar que a escolha da restrição de parâmetros deve ser relacionada ao objetivo da pesquisa e não pode ser generalizada para todos os casos.

6.3 – Estudo do Eletrojato Equatorial Durante Períodos Perturbados Utilizando Magnetômetros e Radar Coerente

A presença do eletrojato equatorial ao longo do equador geomagnético gera campos magnéticos induzidos que podem ser sentidos ao nível do solo, sobrepondo-se ao campo geomagnético. O efeito aproximado do campo magnético do EEJ sobre a componente horizontal (H) do campo geomagnético pode ser investigado analisando-se a diferença entre as medidas desta componente obtidas por magnetômetros (ΔH) localizados adequadamente. Para isso, um magnetômetro deve estar localizado numa região de influência do EEJ e outro fora desta região. Desta forma, podem ser feitas comparações entre os dados do EEJ obtidos utilizando o Radar RESCO e os magnetogramas obtidos de observatórios magnéticos adequadamente localizados. Neste trabalho, foi realizado um estudo comparativo entre o ΔH e a potência retro-espalhada nas irregularidades do eletrojato equatorial utilizando o radar RESCO. As duas técnicas são apresentadas e discutidas focando o eletrojato durante dias magneticamente perturbados. Os resultados deste estudo estão no trabalho “*Comparative Studies of Equatorial Electrojet Using Back-Scatter Radar and Magnetometer Data*” que foi apresentado no Rio de Janeiro, no 11th Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium, o qual ocorreu entre os dias 6 a 10 de março de 2006. Os principais pontos deste trabalho serão apresentados a seguir.

6.3.1 – Metodologia

O radar RESCO é operado rotineiramente durante duas semanas por mês. Ele é usualmente configurado para sondagem do EEJ transmitindo um pulso a cada 1-2 ms. Além disso, os espectros de potência com as frequências Doppler obtidos após a análise espectral possuem frequência de corte de 500-250 Hz, respectivamente. A resolução em frequência é determinada pelo número de pulsos subsequentes utilizados na análise espectral (usualmente 256 pulsos) e pela frequência de corte. A largura do pulso é configurada para 20 ms e o atraso no tempo para 600 ms.

Para a determinação do ΔH utilizando magnetômetros é necessário que estes equipamentos estejam instalados em observatórios magnéticos adequadamente localizados, como mencionado anteriormente. Um observatório deve estar localizado na região de influência do campo magnético do EEJ, como São Luís (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5), e o outro em uma latitude magnética próxima ao primeiro, mas fora da região de influência do EEJ, como em Vassouras (22.40° S, 43.65° W, DIP: -12.5). Primeiro, devemos remover o efeito da calibração do magnetômetro reduzindo o valor da componente H à meia-noite LT (hora local) da série diária da componente. Realizando o procedimento para as duas estações magnéticas, São Luís e Vassouras, e calculando a diferença entre o ΔH delas ($\Delta H_{SLZ} - \Delta H_{VSS}$), determinamos a influência do EEJ em solo.

O índice Dst para novembro de 2003 é apresentado na Fig. 6.8. Este índice foi utilizado com um indicador da atividade magnética. Baseados no gráfico foram escolhidos dois dias em que o RESCO operou próximo ao período da tempestade magnética, mostrado em azul. Foram utilizados um dia pertencente ao período magneticamente calmo (18 de novembro) e outro do período perturbado (20 de novembro). Neste último, pode ser notado que não há o início súbito da tempestade magnética. Isto acontece, pois esta fase da tempestade é somente detectada quando ocorrem compressões das linhas do campo geomagnético por parte da estrutura magnética que chega a Terra. Como o campo geomagnético possui orientação norte-sul magnético no sentido sul-norte geográfico, a não ocorrerá compressão caso a estrutura magnética interplanetária esteja com orientação sul-norte magnético (norte-sul geográfico). Dessa forma esta estrutura se conectará com a magnetosfera terrestre sem que seja detectado qualquer início súbito visto no índice Dst.

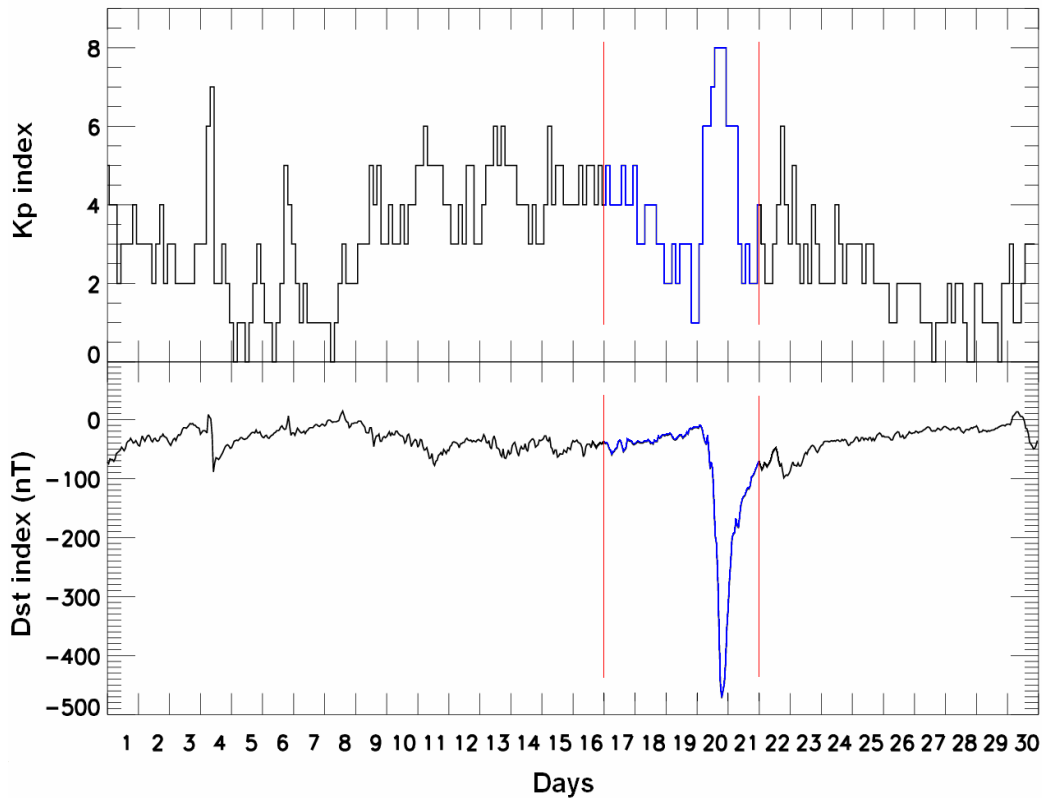


Fig 6.8 – Índice Dst para novembro de 2003. O período analisado é mostrado em azul.

6.3.2 – Resultados e Discussões

A variação da componente ΔH nas estações de São Luís (linha vermelha) e Vassouras (linha azul) e efeito em solo do EEJ (linha preta) obtidos como descrito anteriormente são apresentadas na Fig. 6.9. Podem ser visualizadas as ocorrências de duas tempestades magnéticas, entorno dos dias 4 e 21 de novembro, onde o traço das três componentes aparece distorcido apresentando baixos valores.

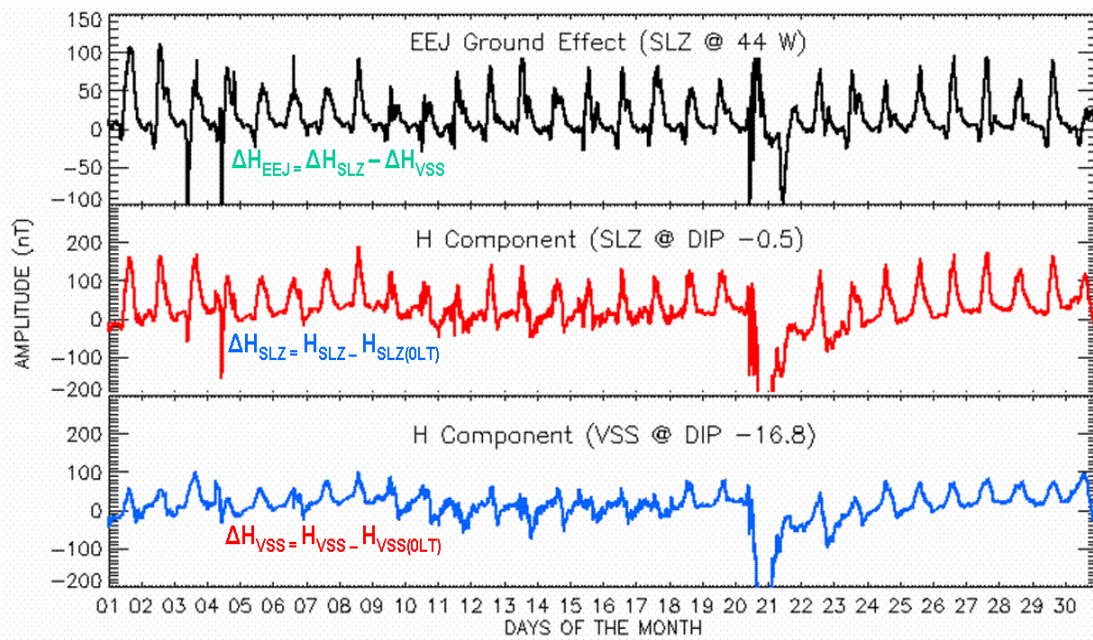


Fig. 6.9 – Parâmetros ΔH_{EEJ} (painel superior), ΔH_{SLZ} (painel central) e ΔH_{VSS} (painel inferior) para novembro de 2003. Podem ser visualizadas as ocorrências de duas tempestades magnéticas, entorno dos dias 4 e 21 de outubro, onde o traço das três componentes aparece distorcido apresentando baixos valores.

O mapa de intensidade em função da altura e tempo (RTI) e os espectrogramas correspondentes para os dois dias selecionados são mostrados na Fig. 6.10 e Fig. 6.11. O mapa RTI apresentado é para o feixe do radar inclinado de 30° para leste em relação ao zênite no plano magnético leste-oeste. Os espectrogramas cobrem as alturas entre 94.76 – 107.75 km em passos de 2.6 km e estão centrados na altura indicada no canto inferior esquerdo de cada espectrograma. Todos eles mostram deslocamentos Doppler positivos das irregularidades, i.e., deslocamento para oeste, indicando condições normais do EEJ para período diurno. Na Fig 6.10, o EEJ é detectado durante um período entre as 10h e às 11h (LT) e após as 13h. Contudo, não há detecção do EEJ para o período próximo às 12h (LT), horário em que esperado que ele possua a máxima intensidade de corrente. Na Fig 6.11 a potência do EEJ é forte para todo o período apresentado. Entretanto, não há dados para o período posterior às 13h (LT).

Uma avaliação comparativa dos dados do radar e de magnetômetros para o período calmo mostra que o ΔH_{EEJ} tem intensidade baixa, assim como a potência retro-espalhada nas

irregularidades do EEJ recebida pelo RESCO. Durante o período perturbado, dia 20 de novembro, no qual ocorre a tempestade magnética, pode ser notado que o parâmetro ΔH_{EEJ} apresenta variações bruscas de amplitude, assim como os dados do radar mostram uma intensificação nos campos elétricos da Região E ionosférica. Desta forma, podemos dizer que numa avaliação comparativa simples entre os dados de magnetômetros e os dados de radar apresentam as mesmas assinaturas durante períodos calmos e perturbados. Contudo, para uma resposta mais conclusiva, seria necessária a análise de um conjunto maior de dados.

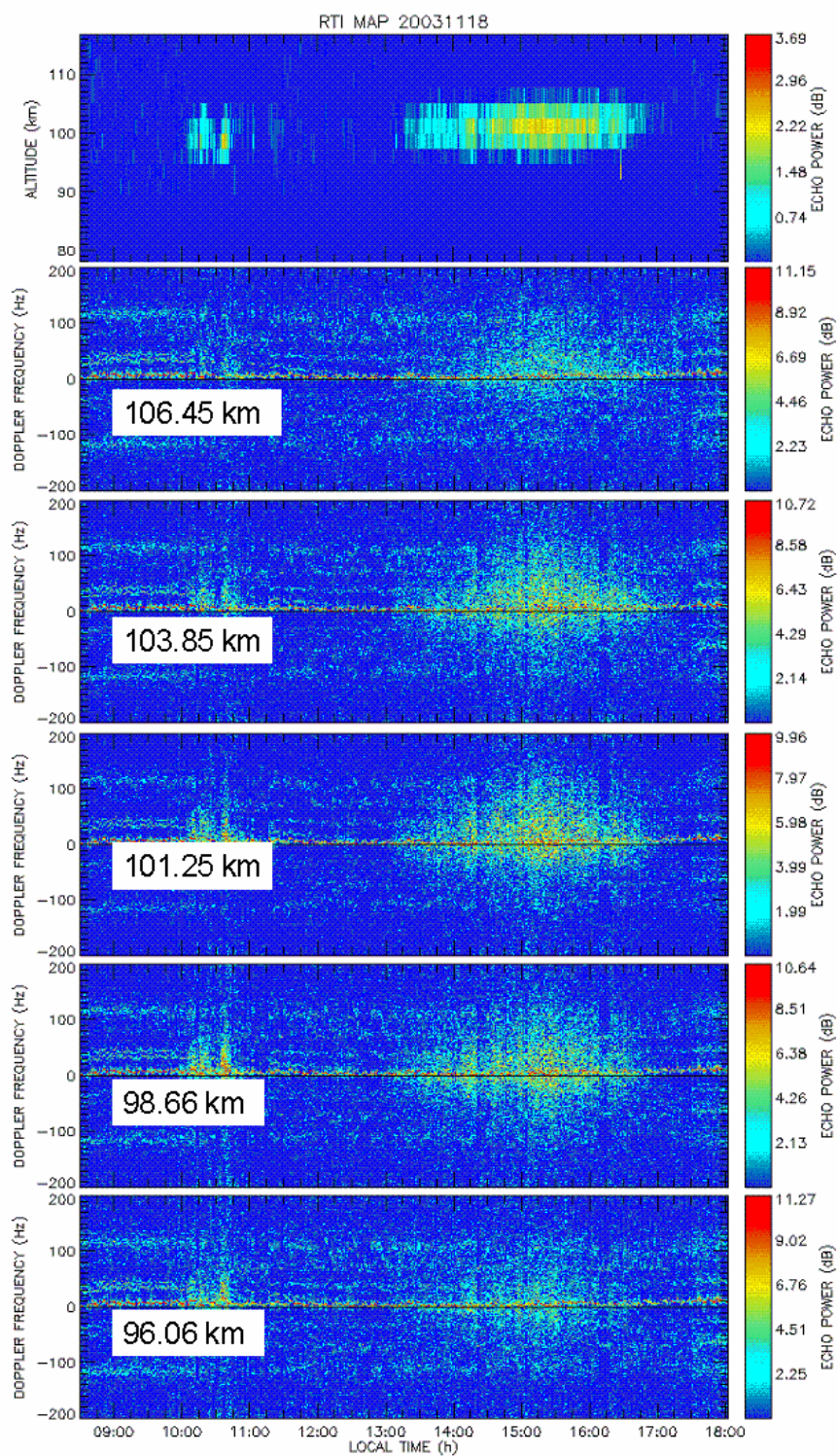


Fig 6.10 – Mapa RTI e espectrogramas para o dia 18 de novembro. O EEJ é detectado durante um período entre as 10h e às 11h LT e após as 13h. Não há detecção do EEJ para o período próximo às 12h LT, horário em que esperado que ele possua a máxima intensidade de corrente.

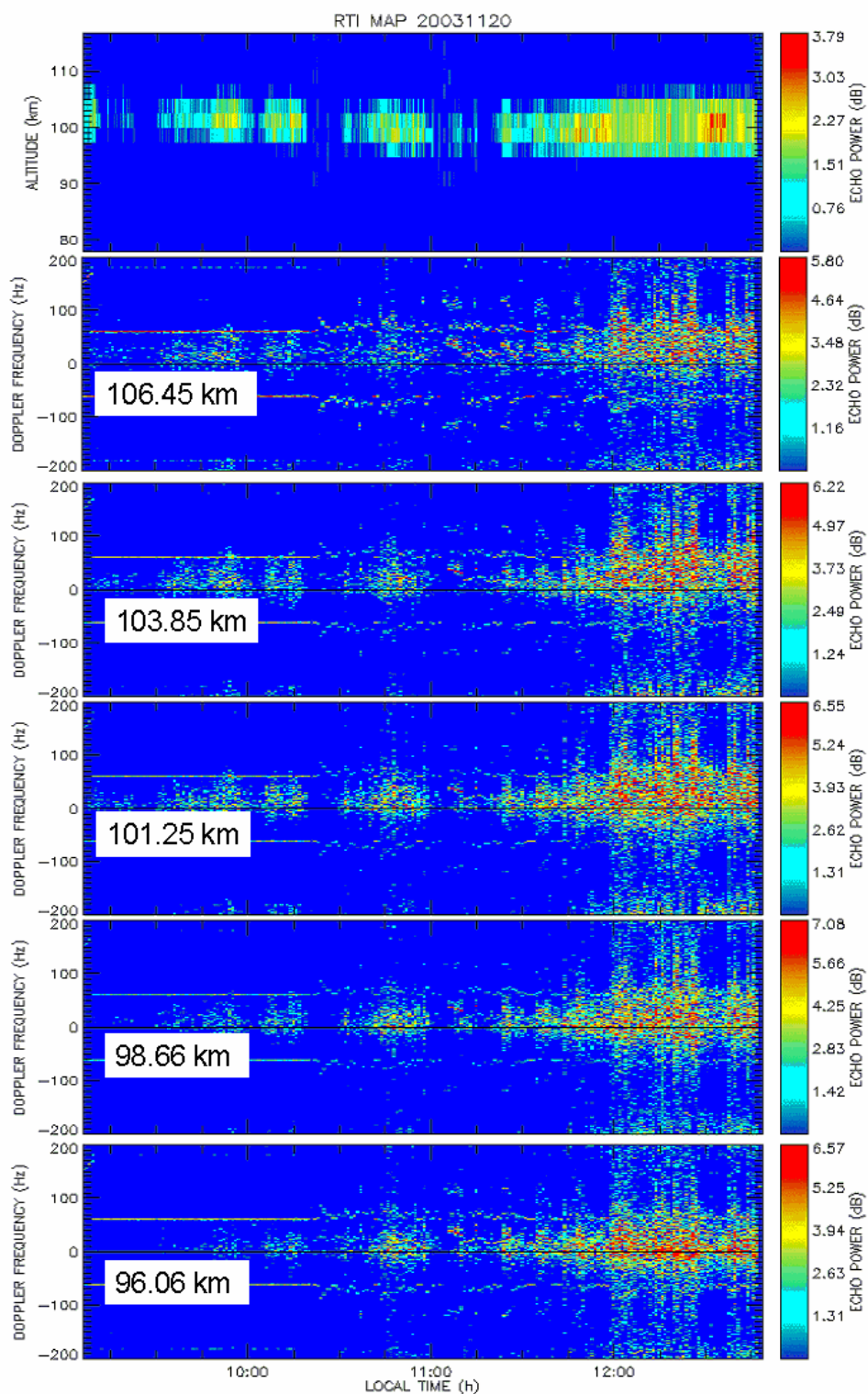


Fig 6.11 – Mapa RTI e espectrogramas para o dia 20 de novembro. A potência do EEJ é forte para todo o período apresentado. Contudo, não há dados para o período posterior às 13h LT.

6.3.3 – Conclusões

Neste trabalho foram apresentados resultados da comparação entre os dados do radar RESCO, instalado na região do equador magnético, e dados da rede de magnetômetros da região brasileira. Foram utilizados um dia magneticamente calmo e outro perturbado para análise. De acordo com os resultados apresentados, o parâmetro ΔH_{EEJ} se mostrou um bom instrumento avaliador do comportamento diário do efeito do EEJ ao nível de solo, uma vez que o campo elétrico deste provou ter relação direta com seu campo magnético induzido em solo. Ele ainda pode ser utilizado para estudo do EEJ em períodos no qual o Radar RESCO não esteve em operação.

Os resultados do parâmetro ΔH_{EEJ} apresentaram bom acordo com os resultados do radar RESCO para os períodos magneticamente calmo e perturbado analisados. Contudo, para uma resposta mais conclusiva, seria necessária a análise de um conjunto maior de dados. Atualmente, poucos períodos foram analisados, mas objetiva-se estender o período da análise até os dias atuais.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O estudo da eletrodinâmica do eletrojato equatorial é de grande importância para a compreensão do sistema ionosfera-atmosfera neutra. Ele participa do controle dos fenômenos ionosfera-termosfera equatorial na Região do Centro Espacial do Centro de Lançamento de Alcântara do DEPF/D – Comando da Aeronáutica do Ministério da Defesa, Região que deve ser cientificamente melhor caracterizada e monitorada. Para este estudo, é necessário aprimorar tecnologicamente o Radar RESCO, instalado no Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/INPE – MCT, no Maranhão, e melhorar a qualidade dos dados obtidos por este equipamento. A partir deste objetivo, foram desenvolvidas pelo Bolsista, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, no âmbito da Parceria INPE-UFSM, análises matemáticas, que além da programação, envolvem processamento de sinais digitais, estatística e o conhecimento do próprio fenômeno, o eletrojato equatorial.

Durante o período de vigência da bolsa PIBIC/INPE-CNPq/MCT 2005-2006, o bolsista conduziu as atividades previstas em seu plano de trabalho de acordo com as suas capacidades específicas e com o tempo disponível para o desenvolvimento do Projeto. Os principais objetivos propostos para o referido período foram: estudar a climatologia da região E da ionosfera equatorial; estudar a variação do campo elétrico do dínamo da região E da ionosfera através do monitoramento das velocidades de deslocamento Doppler das irregularidades de plasma; estudar a resposta do eletrojato equatorial à atividade magnetosféricas; continuar o desenvolvimento de rotinas e métodos de otimização da análise dos dados, permitindo melhor determinação de frequência Doppler; acompanhar a evolução do equador magnético através de dados de magnetômetros; realizar estudos comparativos entre os dados do radar coerente e os dados reduzidos por nossa equipe de dados de sondadores digitais, na medida em que houver dados de

comparação; e participar em eventos / encontros científicos de divulgação dos resultados obtidos.

Com relação aos objetivos específicos de estudar a eletrodinâmica da região E da ionosfera equatorial, o bolsista vem reduzindo sob seus próprios critérios e julgamentos, em Santa Maria, os dados de espalhamento coerente coletados com o radar RESCO. Ele apresentou diversos dias de dados do ano de 2003 completamente reduzidos e analisados. Incluso nesta atividade, se encontra o cumprimento dos objetivos propostos de estudo da variação do campo elétrico da região E ionosférica. As velocidades de deslocamento das irregularidades de plasma observadas pelo radar são diretamente proporcionais aos campos elétricos nas alturas do eletrojato. Uma vez que o bolsista apresentou, juntamente com os mapas de variação temporal de intensidade do eletrojato, os espectrogramas destas irregularidades, foi possível observar de forma indireta o comportamento dia-a-dia dos campos elétricos.

O estudo da aplicação da integração incoerente a espectros simulados de retro-espalhamento das irregularidades do eletrojato equatorial, originou o trabalho "*A Statistical Study of the Application of Incoherent Integration to Simulated Equatorial Electrojet Irregularities Power Spectra*" apresentado no 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (CISBGf), Salvador, 2005. Nesse trabalho é feito um estudo estatístico da aplicação da referida técnica com o objetivo de minimização do erro da estimação dos momentos espectrais dos dados do radar RESCO. Como prosseguimento deste estudo foi submetido um trabalho "*Statistical Study of Applying Incoherent Integration to Power Spectra of the Equatorial Electrojet Irregularities*" para a edição especial intitulada *Low Latitude Aeronomy Special Issue* da Revista Brasileira de Geofísica.

Outro estudo desenvolvido sobre tecnologias aplicáveis ao radar RESCO foi "*Statistical Study of Constraining the Parameters Space in the Least Square Fit Method Applied to Gaussians Fit to Power Spectra Obtained from Simulated Equatorial Electrojet Plasma Irregularities Back-Scatter Coherent Radar Echoes*", apresentado no XXVIIIth General

*Assembly of International Union of Radio Science, (URSIGA), em Nova Delhi, Índia, 2005. Este estudo tratou da utilização de restrição de parâmetros ao ajuste Gaussiano aplicado a espectros de irregularidades do eletrojato, objetivando a modernização das tecnologias do Radar RESCO. **Por este trabalho, o Bolsista recebeu o prêmio Young Scientist Award da International Union of Radio Science, URSI.***

Com relação aos estudos propostos de análises comparativas entre dados de magnetômetros e dados do radar RESCO, o bolsista não teve tempo hábil de atingir a totalidade deste objetivo, i.e., a análise dos dados para todo ano de 2003. Contudo, ele realizou um trabalho sobre comparações entre o radar RESCO e magnetogramas para uma tempestade magnética intensa. Este trabalho, denominado *Comparative Studies of Equatorial Electrojet Using Back-Scatter Radar And Magnetometer Data*, foi apresentado no 11th *Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium*, Rio de Janeiro, 2006.

Por incentivo dos orientadores Dr. Clezio De Nardin, Dr. Nelson Jorge Schuch e Dr. Mangalathayil Ali Abdu, a participação em eventos foi muito importante para o Bolsista. Desta forma, ele interagiu com pesquisadores de áreas como: Clima Espacial, Aeronomia, Geomagnetismo, Astrofísica, Meteorologia, Computação e Engenharias. Dentre todos os eventos científicos mencionados na Seção 6.5, o de maior importância foi o XXVIIIth *General Assembly of URSI, (URSIGA), em Nova Delhi, Índia.*

Finalmente, o bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, cujo Projeto de pesquisa foi desenvolvido no âmbito da parceria INPE-UFSM, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, CRSPE-INPE/MCT, em Santa Maria, RS, e cujas atividades técnicas estão relacionadas ao Radar RESCO, instalado e em operação no Observatório Espacial do INPE/MCT em São Luís do Maranhão, cumpriu em grande parte o cronograma estabelecido no Projeto. Portanto, consideramos que este relatório reflete as atividades desenvolvidas, as quais consideramos cumprir satisfatoriamente os objetivos do programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, M. A., Denardini, C. M., Sobral, J. H. A., Batista, I. S., Muralikrishna P., Iyer, K. N., Veliz, O. and de Paula, E. R., 2003, *Equatorial electrojet 3 m irregularity dynamics during magnetic disturbances over Brazil: results from the new VHF radar at São Luís*: **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Vol. 65, No. 14-15, p.1293-1308.
- Akasofu, S. I.; Chapman, S. *Solar-Terrestrial physics*. Oxford: Oxford University Press, 1972.
- Bard, Y. *Nonlinear Parameter Estimation*. Academic Press University Press, 1974.
- Campbell, W. H. *Introduction to Geomagnetic Fields*. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- Chapman, S.; Bartels, J. *Geomagnetism*. London: Oxford University Press, 1940.
- Denardini, C. M. *Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão*. São José dos Campos: INPE, 1999. (INPE-7174-TDI/676).
- Denardini, C. M. *Estimação de parâmetros de dados físicos*. São José dos Campos: INPE, 2003. (INPE-10047-PUD/130).
- Denardini, C. M., Abdu, M. A. and Sobral, J. H. A., 2004, *VHF radar studies of the equatorial electrojet 3-m irregularities over São Luís: day-to-day variabilities under auroral activity and quiet conditions*: **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Vol. 66, n17, p.1603-1613.

Forbes, J. M. *The equatorial electrojet*. **Reviews of Space Geophysics and Space Physics**, v. 19, n.3, p. 469-504, Aug. 1981.

Fukao, S. **Middle atmosphere program – Handbook for map: International school on atmospheric radar**, v.30, Urbana (IL): SCOSTEP Secretariat, Oct. 1989.

Gage, K. S.; Balsley, B. B. *Doppler radar probing of the clear atmosphere*. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.59, n.9, p. 1074-1093, Sep. 1978.

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

Janardhanan, K. V. *A coherent VHF backscatter radar for INPE*. São José dos Campos: INPE, 1983. (INPE-2808-NTI/180).

Kelley, M. C. *The Earth's Ionosphere*. San Diego: Academic Press, 1989.

Kivelson, M. G; Russel, C. T. *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center (NOAA.NGDC). *Solar-Terrestrial Physics Data via FTP*. [online] <http://sec.noaa.gov/ftplib/plots/2003_plots/kp/> Oct. 2003.

Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Rostoker, G. *Geomagnetic Indices*. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, n. 4, p. 935-950, Nov. 1972.

Skolnik, M. I. *Introduction to radar systems*. New York: McGraw Hill, 1962.

World Data Center for Geomagnetism – Kyoto (WDCG). *Geomagnetic Data Service*.

[online]

< <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> > Oct. 2005.

APÊNDICE A

TRABALHOS DE CONGRESSOS E CURSOS

Artigos Submetidos em 2005-2006.

- 1 - **Título:** STATISTICAL STUDY OF APPLYING INCOHERENT INTEGRATION TO POWER SPECTRA OF THE EQUATORIAL ELECTROJET IRREGULARITIES.

Autores: Henrique C. Aveiro, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Revista: Revista Brasileira de Geofísica.

Trabalhos Completos em Anais de Eventos em 2005-2006.

- 1 - **Título:** STATISTICAL STUDY OF CONSTRAINING THE PARAMETERS SPACE IN THE LEAST SQUARE FIT METHOD APPLIED TO GAUSSIANS FIT TO POWER SPECTRA OBTAINED FROM SIMULATED EQUATORIAL ELECTROJET PLASMA IRREGULARITIES BACK-SCATTER COHERENT RADAR ECHOES.

Autores: Henrique C. Aveiro, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science, URSIGA.

Local: Nova Delhi – Índia.

Período: 23 a 29 de outubro de 2005.

- 2 - Título: A STATISTICAL STUDY OF THE APPLICATION OF INCOHERENT INTEGRATION TO SIMULATED EQUATORIAL ELECTROJET IRREGULARITIES POWER SPECTRA.**

Autores: Henrique C. Aveiro, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, CISBGf.

Local: Salvador – Bahia.

Período: 11 a 14 de setembro de 2005.

- 3 - Título: RESULTADOS PRELIMINARES DE ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CAMADA F IONOSFÉRICA SOB O EQUADOR MAGNÉTICO A PARTIR DE DADOS DE DIGISSONDA.**

Autores: Cleomar P. Silva, Luzia L. Lock, Inês S. Batista, Clezio M. Denardini, Nelson J. Schuch, Henrique C. Aveiro.

Evento: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, CISBGf.

Local: Salvador – Bahia.

Período: 11 a 14 de setembro de 2005.

Trabalhos Resumidos em Anais de Eventos em 2005-2006.

- 1 - Título: DETERMINAÇÃO DA EVOLUÇÃO DIÁRIA DO CAMPO ELÉTRICO DO ELETROJATO EQUATORIAL UTILIZANDO DADOS DE MAGNETÔMETROS.**

Autores: Henrique C. Aveiro, Lilian P. Moor, Fagner C. Rother, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia.

Local: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR.

Período: 5 a 7 de novembro de 2005.

2 - Título: REDUÇÃO DE RUÍDO AMOSTRAL DE DADOS OBSERVACIONAIS DE RADAR IONOSFÉRICO DE ESPALHAMENTO COERENTE UTILIZANDO FILTRO SAVITZKY-GOLAY.

Autores: Henrique C. Aveiro, Lilian P. Moor, Fagner C. Rother, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia.

Local: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR.

Período: 5 a 7 de novembro de 2005.

3 - Título: ANÁLISE DO TEMPO DE CONVERGÊNCIA DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS.

Autores: Henrique C. Aveiro, Lilian P. Moor, Fagner C. Rother, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia.

Local: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR.

Período: 5 a 7 de novembro de 2005.

4 - Título: ESTUDO DAS BOLHAS IONOSFÉRICAS UTILIZANDO GPS.

Autores: Lilian P. Moor, Henrique C. Aveiro, Fagner C. Rother, Eurico R. de Paula, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia.

Local: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR.

Período: 5 a 7 de novembro de 2005.

5 - Título: ANALYSIS OF GEOMAGNETIC STORM EFFECTS ON THE SIGNATURES OF EQUATORIAL ELECTROJET PLASMA IRREGULARITIES.

Autores: Henrique C. Aveiro, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: III El Leoncito School on Solar Physics.

Local: Universidad de San Juan, San Juan – Argentina.

Período: 28 de novembro a 5 de dezembro de 2005.

6 - Título: ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DO ELETROJATO EQUATORIAL BASEADO EM DADOS OBSERVACIONAIS DE RADARES COERENTES, IONOSSONDAS DIGITAIS E MAGNETÔMETROS.

Autores: Henrique C. Aveiro, Mangalathayil A. Abdu, Clezio M. Denardini, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada – JAI.

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

Período: 8 a 10 de março de 2006.

7 - Título: EQUIPAMENTOS DE SONDAÇÃO IONOSFÉRICA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL SUL.

Autores: Lilian P. Moor, Henrique C. Aveiro, Eurico R. de Paula, Clezio M. Denardini, Nelson J. Schuch.

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada – JAI.

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

Período: 8 a 10 de março de 2006.

8 - Título: COMPARATIVE STUDIES OF EQUATORIAL ELECTROJET USING BACK-SCATTER RADAR AND MAGNETOMETER DATA.

Autores: Henrique C. Aveiro, Clezio M. Denardini, Mangalathayil Ali Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: 11th Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium.

Local: Rio de Janeiro - RJ.

Período: 6 a 10 de março de 2006.

9 - Título: ANALYSIS OF METEORS PRECIPITATION USING IONOSPHERIC BACK-SCATTER RADAR (aceito).

Autores: Henrique C. Aveiro, Lilian P. Moor, Clezio M. Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson J. Schuch.

Evento: 36th COSPAR Scientific Assembly.

Local: Beijing, China.

Período: 16 a 23 de julho de 2006.

Cursos – Participação como Aluno.

1 - Título: III EL LEONCITO SCHOOL ON SOLAR PHYSICS.

Local: Universidad de San Juan, San Juan – Argentina.

Período: 28 de novembro a 5 de dezembro de 2005.

Carga horária: 60 horas.

2 - Título: II RADAR SCHOOL OF JICAMARCA.

Local: Radio Observatorio de Jicamarca, Jicamarca – Peru.

Período: 20 a 31 de março de 2006.

Carga horária: 80 horas.

3 - Título: INTERNATIONAL ADVANCED SCHOOL ON SPACE WEATHER.

Local: Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics – Trieste, Itália.

Período: 2 a 19 de maio de 2006.

Carga horária: 120 horas.

A.1.1

Title of the Manuscript, Título do Trabalho:

(In) Statistical Study of Applying Incoherent Integration to Power Spectra of the Equatorial Electrojet Irregularities.

(Pt) Estudo Estatístico da Aplicação de Integração Incoerente a Espectros de Potência de Irregularidades do Eletrojato Equatorial.

Short Title, Título Abreviado:

(In) Statistics of Incoherent Integration of Electrojet Power Spectra.

(Pt) Estatísticas de Integração Incoerente de Espectros de Potência do Eletrojato.

Full Name of the Authors, Nome Completo do(s) Autor(es):

Henrique Carlotto Aveiro, Clezio Marcos Denardini, Mangalathayil Ali Abdu, Nelson Jorge Schuch.

Professional Address, Instituição de Origem:

Henrique Carlotto Aveiro:

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. Roraima, s/n
Bairro Camobi
Santa Maria, RS - Brasil
CEP 97 110-970, Caixa Postal 5021
Telefone: +55 55 3220 8021
Fax: +55 55 3220 8007
E-mail: aveiro@lacs.m.ufsm.br

Clezio Marcos Denardini:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1.758
Jardim da Granja
São José dos Campos, SP - Brasil
CEP 12227-010, Caixa Postal 515
Telefone: +55 12 3945 7156
Fax: +55 12 3945 6990
E-mail: denardin@dae.inpe.br

Mangalathayil Ali Abdu:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1.758
Jardim da Granja
São José dos Campos, SP - Brasil
CEP 12227-010, Caixa Postal 515
Telefone: +55 12 3945 7149
Fax: +55 12 3945 6990
E-mail: maabdu@dae.inpe.br

Nelson Jorge Schuch:

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. Roraima, s/n
Bairro Camobi
Santa Maria, RS - Brasil
CEP 97 110-970, Caixa Postal 5021
Telefone: +55 55 3220 8021
Fax: +55 55 3220 8007
E-mail: njschuch@lacs.m.ufsm.br

Notes about the Authors:

Henrique Carlotto Aveiro, referenciado como AVEIRO, H. C., é Técnico em Telecomunicações formado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas, CEFET-RS, em 2001, e aluno de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria desde 2002. Tem trabalhado com pesquisas na área de aeronomia em sua iniciação científica, mais especificamente com processamento de sinais de radares ionosféricos e estudos da ionosfera equatorial. No ano de 2005 recebeu o Prêmio Jovem Cientista (“Young Scientist Award”) da International Union of Radio Science, URSI. Atualmente é membro da equipe de pesquisadores e engenheiros da Divisão de Aeronomia do INPE/MCT, exercendo suas atividades no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

Dr. Clezio Marcos De Nardin, referenciado como DENARDINI, C. M., é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria em 1997, Mestre em 1999 e Doutor em 2003, ambos em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Participou da cooperação entre o INPE, o Laboratório Philips da Força Aérea Norte-Americana e a Universidade Federal de Santa Maria (INPE / AFPL / UFSM) para estudos da Camada Es-Esporádica e de rastros de meteoros utilizando rádio enlace em VHF. Nesta época recebeu prêmio da Associação Brasileira de Ensino de Engenharia pelo seu trabalho apresentado no XI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Participou no desenvolvimento do radar de espalhamento coerente de 50 MHz de São Luís (RESCO) e analisou os primeiros dados deste radar. Atualmente, é Pesquisador Adjunto do INPE e membro da equipe de pesquisadores e engenheiros do grupo da ionosfera que participam do projeto do radar RESCO. Seu interesse atual refere-se ao estudo dos campos elétricos do eletrojato equatorial e nas correntes induzidas no solo por este.

Dr. Mangalathayil Ali Abdu referenciado como ABDU, M. A., é formado em Física pela Universidade de Kerala, Índia em 1959; Mestre em eletrônica e física em 1961 pela Universidade de Kerala, e Doutor (Ph. D.) em 1967, em Aeronomia pela Universidade de Gujarat, Índia. A pesquisa de doutorado foi desenvolvida no departamento de ciências espaciais do “Physical Research Laboratory”, Ahmedabad, hoje um dos centros de pesquisa e desenvolvimento do ISRO (Indian Space Research Organization). A sua tese de doutorado foi voltada ao estudo da ionosfera tropical e baseada em técnicas de absorção de sinais cósmicos pela ionosfera. Realizou pós-doutorado no departamento de Física da Universidade de Western Ontario, Canadá, onde foi responsável pelo desenvolvimento de técnica de estudos ionosféricos através traços meteoricos. Ele tem mais de 150 trabalhos publicados nas revistas especializadas, e orientou diversas teses de mestrado e doutorado no curso de pós-graduação em Geofísica Espacial do INPE. Foi responsável pelos projetos de colaboração internacionais patrocinados pela IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) e SCOSTEP (Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics). É assessor da FAPESP, do CNPq, de NSF e da NASA. Já participou no quadro de editores de revistas internacionais. Atualmente é Pesquisador Titular do INPE dedica-se ao estudo da dinâmica do sistema ionosfera-termosfera-magnetosfera-meio interplanetário por meio de técnicas ópticas e de radiofrequência.

Nelson Jorge Schuch é graduado em Física pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, em 1972. Mestrado em Astrofísica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie em 1975. Doutorado em Física, concentração - Astrofísica pela Universidade de Cambridge em 1979. Pós-Doutorado em Astrofísica pela Universidade de Cambridge em 1980. De 1980 a 1995, atuou como Pesquisador Titular/Vice-Diretor do Observatório Nacional. Em 1996 foi nomeado coordenador do Projeto Radioastronomia – RA, no âmbito da Parceria INPE – UFSM. É Chefe da Unidade Regional Sul de Pesquisas Espaciais e Coordenador das ações 1275 e 6237 do PPA2004-2007 de Implantação e Funcionamento do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais do PNAE, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Possíveis Revisores: (4 revisores)

Dr. Rui Tertuliano de Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
Rua dos Cisnes, 7989 - Cidade Satélite
Pitimbu
59072-970 - RN - Brasil
Phone: +55 84 2319586 Fax: +55 84 2319749
E-mail: rui@dfte.ufrn.br

Dr. Jean-Pierre St.-Maurice
Department of Physics & Engineering Physics and
Institute for Space and Atmospheric Studies
University of Saskatchewan
Saskatoon, Saskatchewan, Canada
Phone: (306) 966-2906 Fax: (306) 966-6400
E-mail: jp.stmaurice@usask.ca

Dr. Barclay Robert Clemesha
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758
Jardim da Granja
São José dos Campos, SP - Brasil
12227-010
Phone: +55 12 3945 6953
E-mail: bclem@laser.inpe.br

Dr. Eurico Rodrigues de Paula
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1.758
Jardim da Granja
São José dos Campos, SP - Brasil
12227-010
Phone: +55 12 3945 7149 Fax: +55 12 3945 6990
E-mail: eurico@dae.inpe.br

Statistical Study of Applying Incoherent Integration to Power Spectra of the Equatorial Electrojet Irregularities

Abstract

The RESCO 50 MHz coherent back-scatter radar has been operated since 1998 at the São Luís Space Observatory (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5°), Brazil, situated near the dip equator, to study the equatorial electrojet dynamics. Spectral analysis of the received echoes from equatorial electrojet irregularities allow us to identify the characteristics of the Doppler spectra of plasma irregularities, such as: center of frequency distribution, spectral width and power. Each one of these parameters provides an understanding of the different aspects of the medium. The center of frequency distribution, for example, gives the Doppler shift of the received irregularities echoes in relation to the transmitted frequency, that is closely related to the electric fields that drives the plasma instabilities in the case of Type 2 irregularities. In order to obtain such information from plasma irregularity spectra modern techniques have been used to better determine the spectral parameters of the radar echoes. In this paper we present a statistical study of the effects caused by integrating incoherently the power spectra before estimating the spectral parameters. For the present work we have simulated echo signals from 3-meter plasma irregularities corresponding to the Type 1 spectra using a Gaussian Model spectral shape with the addition of white noise. The spectra were fitted by Gaussian curves using Least Square Fitting to estimate the above mentioned parameters.

The estimated parameters were then compared to the *a priori* known Gaussian parameters used during the data simulation. We have applied distinct values of incoherent integration in order to reduce the variance in the spectra and evaluate the response of the fitting to such integration. The results of our analysis is presented and discussed focusing on the parameter estimation of power spectra of back-scatter echoes from Type 1 irregularities applying incoherent integration, as well as the advantages and disadvantages of using this technique.

Keywords: Ionosphere, Aeronomy, Radar, Digital Signal Processing, Curve Fitting.

Estudo Estatístico da Aplicação de Integração Incoerente a Espectros de Potência das Irregularidades do Eletrojato Equatorial.

Resumo

O radar RESCO de retro-espalhamento coerente em 50 MHz é operado desde 1998 no Observatório Espacial de São Luís (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5°), Brasil, sob a região do equador geomagnético para estudo da dinâmica do eletrojato equatorial. A análise espectral de ecos recebidos das irregularidades do eletrojato equatorial nos permite identificar as características espectrais das irregularidades de plasma, tais como: o centro de distribuição de frequência, a largura e a potência espectrais. Cada um destes parâmetros fornece informações dos diferentes aspectos do meio. O centro de distribuição de frequência, por exemplo, determina o deslocamento Doppler dos sinais em relação ao sinal transmitido por radar, o que é relacionado aos campos elétricos que dirigem as instabilidades de plasma no caso das irregularidades do Tipo 2. De forma a utilizar esta informação das irregularidades de plasma, técnicas modernas tem sido utilizadas para melhor determinar os parâmetros espectrais dos ecos de radar. Neste trabalho apresentamos um estudo estatístico dos efeitos causados pela integração incoerente a espectros de potência antes da estimação dos parâmetros espectrais. Para o presente trabalho simulamos sinais de ecos de irregularidades de escala de 3 metros correspondendo ao espectro Tipo 1 utilizando um Modelo Gaussiano para a forma espectral com adição de ruído branco. Os espectros foram ajustados por curvas Gaussianas utilizando Mínimos Erros Quadráticos para estimar os parâmetros mencionados acima. Os parâmetros estimados foram comparados aos parâmetros *a priori* conhecidos das Gaussianas utilizados durante a simulação dos dados. Aplicamos distintos valores de integração incoerente de forma a reduzir a variância nos espectros e avaliar a resposta do ajuste a esta integração. Os resultados da análise são apresentados e discutidos focando a estimação de parâmetros dos espectros de potência de ecos retro-espalhados de irregularidades do Tipo 1 aplicando integração incoerente, bem como as vantagens e desvantagens do uso desta técnica.

Palavras Chaves: Ionosfera, Aeronomia, Radar, Processamento de Sinais Digitais, Ajuste de Curvas.

1 INTRODUCTION

The equatorial electrojet current (EEJ) flows in the height region from about 90 to about 120 km (in the E region of the ionosphere) and it covers a latitudinal range of $\pm 3^\circ$ around the dip equator (Forbes, 1981). It is driven by the E region dynamo electric field (Fejer and Kelley, 1980) and it represents an important aspect of the phenomenology of the equatorial ionosphere-thermosphere system. The EEJ was initially detected in the first half of the twentieth century from the geomagnetic field horizontal component variations of large amplitude observed at stations close to the dip equator. Egedal (1948) was the first to state that this variation was due to an electric current flow along the magnetic dip equator. However, it was Chapman (1951) who first explained it terming this phenomenon as equatorial electrojet.

Sounding observations of the equatorial ionospheric E region using VHF radars have shown echoes back-scattered from electron density irregularities in the EEJ. These echoes have Doppler shifted frequencies due to the drift of the irregularities that produce them and they present distinct spectral signatures called the Type 1 and the Type 2 spectra. The Type 1 spectrum is known to be produced by irregularities generated by the two-stream plasma instability process (Farley, 1963; Buneman, 1963) and the Type 2 spectrum is produced by the irregularities originating from the gradient drift instability mechanism (Rogister and D'Angelo, 1970). Several experiments have been conducted to investigate the EEJ irregularities in order to characterize its spectra and explain the phenomenology (Reddy, 1981; Fejer and Kelley, 1980; Forbes, 1981, and references there in).

In 1998, the RESCO 50 MHz coherent back-scatter radar entered in operation at the São Luís Space Observatory, Brazil, located close to the magnetic equator. Since then several studies have been conducted on the dynamics and morphology of the EEJ irregularities in the Brazilian sector (Abdu et al. 2002, 2003; Denardini et al., 2004). The RESCO radar is operated routinely 10 to 14 days per month. The radar is usually operated at a transmitted pulse repetition rate of 512-1024 sequential pulses per second, an inter-pulse period of 1-2 ms, a pulse width of 20 μ s and a time delay of 600 μ s between transmission and acquisition. Therefore, the Doppler power spectra obtained from

the Fast Fourier Transform (FFT) technique, have an aliasing frequency of 250-500 Hz. The frequency resolution will be the aliasing frequency divided by the number of sequential pulses (512-1024).

After obtaining the power spectrum using an FFT algorithm, we usually fit the sum of two Gaussian curves to the power spectrum, each one representing one irregularity type, and shifted by a DC noise level in the Y axis. In this way, each spectrum is described by a quantity S which is a function of the frequency f , given by:

$$S(f) = \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d1})^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d2})^2}{2\sigma_2^2}\right] + P_N \quad (1)$$

where P_N , P_i , σ_i and f_{di} are the noise level, spectral power, spectral width and Doppler frequency, respectively. The index i indicates the type of the described irregularity: Type 1 ($i=1$) or Type 2 ($i=2$). To determine the 7 parameters of each spectrum, $a = \{f_{d1}, f_{d2}, \sigma_1, \sigma_2, P_1, P_2, P_N\}$, the Maximum Likelihood Estimate (MLE) was used for nonlinear fitting. This method is based on finding the parameters a that maximize the probability function $P(y_1 \dots y_n | a)$ of observed data set $y = \{y_1 \dots y_n\}$. It is also a problem of finding the parameters a that minimize the square sum of residual errors between the data set y and the Gaussians $S(f)$, considering the uncertainty σ_i related to each point y_i . In view of this, the Eq. (2) below presents our objective function to be minimized. Here N is the number of frequency points, y_i is the observed spectral amplitude for one given frequency in the power spectrum and all the other parameters have been introduced before.

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - S(f_i; P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)]^2}{\sigma_i} \quad (2)$$

However, curve fitting algorithms usually did not present satisfactory enough results for our purpose when the data variance is high, a common case in radar data. To attempt reducing the signal variance, we usually integrate incoherently consecutive spectra (Fukao, 1989), i. e., we calculate the average of the power spectral density to each frequency using consecutive spectra. Once the white noise is a random component, the resultant spectrum will tend to have lower

variance. Figure 1 presents an illustration of incoherent integration applied to hundred consecutive spectra like the first on the left side, with the resulting mean spectra on the right side. In this illustration we see a noisy bunch of spectra (represented by the first one) on the left side transformed into a smoothed one on the right side.

The application of incoherent integration, by averaging consecutive spectra, does not change the mean values of spectral densities of signal and noise. Therefore, increasing the number of integrated spectra we reduce the variance and better define the power spectra. But we should remember that integrating incoherently we are increasing the time resolution too. So, what should be the ideal number of spectra integrated incoherently with no much compromise in the time resolution? That is the aim of this paper. In order to improve the techniques of RESCO radar data analysis, we have used the incoherent integration technique applied to power spectra of EEJ's simulated back-scatter signals from Type 1 irregularities. This statistical study is aimed at quantifying the advantages and disadvantages of applying such technique.

2 METHODOLOGY

This work focuses on the study of Type 1 power spectrum of the back-scattered signals from 3-m EEJ plasma irregularities that should present a sharp peak centered at around 120 Hz corresponding to the radar operating frequency at 50 MHz. The Gaussian covariance model of Zrnic (1979) was used to simulate power spectra of 3-m plasma irregularities that have characteristics of typical Farley-Buneman irregularities power spectra. We have simulated 10,000 Gaussian like power spectra that have within them white noise imbedded. Each spectrum is constituted of 256 points, with the parameters $f_d = 120$ Hz and $\sigma = 20$ Hz. The white noise was added to the data in time domain in order to assure a more realistic variance in the power spectra. Since we assume that we have just one type of irregularity, we can simplify the Eq. 3 to a case of just one Gaussian curve, i.e., our data set is described by one function S in relation to the frequency f , as given by:

$$S(f) = \frac{P}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma^2}\right] + P_N, \quad (3)$$

where P , f_d , σ and P_N are, respectively, the spectral power, the center of frequency distribution (corresponding to Doppler shift due the irregularities displacement as observed by the radar), the spectral width and the noise level. An example of a simulated spectrum is presented in Figure 2. The color lines superimposed to this figure, accompanied by the respective symbol, localizes in the power spectrum the quantities mentioned above. The green dashed line represents the power density of the noise (P_N), the vertical red line shows the center of frequency distribution (f_d), the difference between the vertical orange and red lines determines the standard deviation of the curve fitted to the power spectrum and the area between the blue dashed line and the green dashed line defines the power of the signal (P).

After having a proper data set of power spectra with Type 1 characteristics, we used MLE minimizing the square sum of residual error to fit a Gaussian curve to each power spectrum of the data set controlling its parameters. Now, we could establish comparison between the Gaussian parameters used during the data simulation and the parameters estimated by fitting. And, with the purpose of studying the effect of incoherent integration we have integrated incoherently groups of spectra from the current data set and then performed the same fitting. We have chosen to integrate groups of 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 consecutive spectra.

In short, 10,000 simulated power spectra was generated within the EEJ's Type 1 irregularity characteristics, such as $f_d = 120$ Hz and $\sigma = 20$ Hz. Afterwards, we have integrated incoherently every group of 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 spectra, in order to create ten other data sets. So, we have obtained eleven groups of spectra were the first one have 10,000 spectra not smoothed, the second one have 5,000 spectra smoothed by 2 incoherent integrations, the third one have 2,500 spectra smoothed by 4 incoherent integrations and so on. Every spectrum of the eleven groups was fitted by a single Gaussian (Eq. 3) using MLE to analyze the result of the curve fitting regarding the incoherent integration. The basic analysis consisted in a direct comparison of the f_d fitted to the

spectra using Gaussians curves with the *a priori* f_d value used to generate the Type 1 spectra. Moreover, we have studied the response of the goodness of the fit in function of the number of incoherent integrations.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

The distributions of the EEJ's Doppler frequency of the Gaussian Type 1 (f_d) as it was estimated by the MLE Method for different number of integrations is presented in Fig. 1. Each bar is centered in the integer frequency defined in the axis with ± 0.5 Hz of resolution, for example, the range from 119.5 to 120.5 represents the answer of fitting for 120 Hz. The histograms of Fig. 3 show the distribution of the response of fitting to the case with no incoherent integration and where incoherent integration of 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 spectra was applied. One should remember, however, that the number of answer is different for the different number of integrations. For NICH=1 we have 10,000 answers, for 2 incoherent integrations we have 5,000 answers, 2,500 for NICH=4 and so on, i.e., the initial number of spectra (10,000) divided by the number of integrated spectra. Nevertheless, the number of samples used does not imply in drastic changes in the results, as seen along the analysis. Moreover, we expect almost the same confidence limit in results with different number of samples if the spectra were simulated in the same way and the same algorithm was used for fitting.

The Fig. 3 reveals that the higher the number of incoherent integrations the higher the number of answers close to the right value, as mentioned before. A clear interpretation of this result is to assume that, as we increase the number of spectra in the incoherent integration, we improve the degree of success in estimating the test parameter (f_d). However, the application of the technique implies in loss of time resolution. For example, in the case of incoherent integration of 10 spectra, the time resolution is worsen by a factor of 10, i.e., our resolution suffers deterioration directly proportional to the number of spectra used in the integration.

Quantitatively, using no incoherent integration, 9.25% of the answers were close to the *a priori* f_d value (120 ± 0.5 Hz). Using incoherent integration of 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 spectra, we increased this percentage to 19.20%, 32.76%, 43.04%, 50.56%, 54.40%, 72.40%, 88.80%, 95.18%, 98.40% and 99.00%, respectively. This indicated that the efficiency of the method increased from 9.25% to 99.0%, with a statistical error of 0.42% (± 0.5 Hz), when we go from no use of incoherent integration to the use of incoherent integration of 100 spectra. The analysis of relation of the number of spectra integrated and the number of occurrences close to the *a priori* f_d value ($f_d = 120 \pm 0.5$ Hz) are presented in the Fig. 4. The analyzed incoherent integrations are the blue dots. The error (green region) are calculated based on the number of samples applied to the analysis, hence, as we increase the number of incoherent integrations we increase the error. The line named saturation marks the maximum possible value of percentage, i.e., 100% of occurrences. This figure clearly shows a dependence of the percentage of right answers from the logarithmic of the number of incoherent integrations. In order to quantify this relation, we have performed a linear fitting of logarithmic growth on this curve, represented by the red curve in Fig. 4 and given by the equation:

$$PREA = \alpha * \ln(NICH) + \beta, \text{ for } 1 \leq NICH \leq 100. \quad (4)$$

where $NICH$ is the Number of InCoherent Integrations, $PREA$ is the Percentage of Right Estimated Answers, α could be considered as a growing factor of $PREA$ and β is the $PREA$ observed when no coherent integrations is applied to the data set before using curve fitting. The fitting resulted an $\alpha = 21.11 \pm 0.60$ and a $\beta = 6.49 \pm 1.77$, with a quadratic correlation factor as $R^2 = 0.9928$. The points with lower $NICH$ are better fitted than the higher ones because two mainly reasons: (a) we have used a larger number of spectra (samples) for lower $NICH$ and (b) the points are closer for lower $NICH$ (2, 4, 6, 8 and 10) in comparison with the higher $NICH$ (20, 40, 60, 80 and 100). But despite the logarithmic growing (red curve of Fig. 4) did not fit perfectly to the data (blue points) at high $NICH$ values, we have obtained a quadratic correlation factor higher than 99 %

and the fit resulted in a curve inside the error region. Moreover, if we had studied *NICH* higher than 100, let us say 1000, we would expect a better fitting of the logarithmic growing curve.

Other point we would like to address in this paper is the step that the good estimates increases as we increase the number of incoherent integrations. It can be seen in the Fig. 4 that the percentage of right answers differs in less than 5% when the *NICH* is increased from 60 to 100. When increasing *NICH* from 60 to 100 however, the temporal resolution is increased by almost 66%. This indicates there should be some optimal point above which increases in the *NICH* do not improve substantially the *PREA* without compromise the time resolution. Therefore, if you have to use incoherent integration our results show that you must choose lower number of incoherent integration, i. e., before the asymptotic region of the logarithmic law (Eq. 4). We should also remember that Eq. (4) is a result of the analysis from simulated data and we may obtain higher or lower values of variance in a case of real spectra of radar. So, in spite of Eq. (4) does not give a description of general cases of variance, it is expected that the logarithmic characteristic among *PREA* and *NICH* remains valid, being helpful to a qualitative analysis.

4 CONCLUSIONS

The technique of incoherent integration is shown to be a valuable tool with significant improvement in the determination of the test parameter: the center of the frequency distribution (f_d) of the power spectra from the radar echoes of the EEJ irregularities. Increasing the number of incoherently integrated spectra can result in improved parameters estimation; however, we have to accept worsen time resolution. In the case of the RESCO radar, where we normally have one spectrum per 6 seconds, incoherent integration using 10 spectra would mean a worsen time resolution of one spectrum per minute. For EEJ dynamics studies this number of integrations would not compromise the most of the results expected from the analysis. The use of a high number of spectra in the incoherent integration could improve considerably the estimation of the center of frequency distribution, however as we have shown in the present study, it could lead to an undesirable time

resolution. In order to quantify this compromise we have derived a logarithmic law between the percentage of right estimated answers of fitting methods and the number of incoherent integrations (equivalent to time resolution): $PREA = 21.11 * \ln(NICH) + 6.49$. This logarithmic relationship gives a qualitative description of the behavior of different number of integrations applied to the spectra and the terms we have obtained in the analysis gives the quantitative description. Hence, the choice of numbers of incoherent integrations before the asymptotic portion of the logarithmic law shows more benefits in the balance between temporal resolution and good estimates in the case of power spectra from the EEJ irregularities. Finally, we should mention that this choice should be related to the objective of the research and it can not be generalized for all the cases, always depending on the variance level and the time resolution of the data set and on the number of possible samples taken.

5 ACKNOWLEDGMENTS

H. C. A. wishes to thank CNPq/MCT for financial support to their undergraduate program through the project 107616/2003-3. C. M. D. wishes to thank FAPESP (2005/01113-7) for the financial support to attend the 9^o CISBGf in which congress this work has been presented.

6 REFERENCES

- ABDU, M. A., DENARDINI, C. M., SOBRAL, J. H. A., BATISTA, I. S., MURALIKRISHNA, P. & DE PAULA, E. R., 2002, Equatorial electrojet irregularities investigations using a 50 MHz back-scatter radar and a Digisonde at São Luís: Some initial results: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, No. 12-14, p.1425-1434.
- ABDU, M. A., DENARDINI, C. M., SOBRAL, J. H. A., BATISTA, I. S., MURALIKRISHNA P., IYER, K. N., VELIZ, O. & DE PAULA, E. R., 2003, Equatorial electrojet 3 m irregularity dynamics during magnetic disturbances over Brazil: results from the new VHF radar at São Luís: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 65, No. 14-15, p.1293-1308.

- BUNEMAN, O., 1963. Excitation of field aligned sound waves by electron streams: *Physical Review Letters*, Vol. 10, No. 7, p.285-287.
- CHAPMAN, S., 1951, The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution about Huancayo, Peru and elsewhere: *Archives Fur Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*, A44, p.368-390.
- DENARDINI, C. M., ABDU, M. A. & SOBRAL, J. H. A., 2004, VHF radar studies of the equatorial electrojet 3-m irregularities over São Luís: day-to-day variabilities under auroral activity and quiet conditions: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 66, n17, p.1603-1613.
- EGEDAL, J., 1948, Daily variation of the horizontal magnetic force at the magnetic equator: *Nature*, Vol. 161, p.443-444.
- FARLEY, D. T., 1963, A plasma instability resulting in field aligned irregularities in the ionosphere: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. A22, p.6083-6097.
- FEJER, B. G. & KELLEY, M. C., 1980, Ionospheric Irregularities: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 18, No. 2, p.401-454.
- FORBES, J. M., 1981, The Equatorial Electrojet: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 19, No. 3, p.469-504.
- FUKAO, S., 1989, Middle atmosphere program – Handbook for map: International school on atmospheric radar, Vol. 30, Urbana (IL): SCOSTEP Secretariat.
- REDDY, C. A., 1981, The equatorial electrojet: a review of ionospheric and geomagnetic aspects: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 43, No. 5/6, p.557-571.
- ROGISTER, A. AND D'ANGELO, N., 1973, Type II irregularities in the equatorial electrojet: *Journal of Geophysical. Research*, Vol. 75, p.3879-3887.
- ZRNIC, D. S., 1979, Estimation of spectral moments of weather echoes: *IEEE Transactions of Geoscience on Electronics*, Vol. 17, p.113-128.

Figure Captions:

Figure 1 – Illustration of incoherent integration applied to hundred consecutive spectra (left) and the resultant spectrum (right).

Figure 2 – Power spectrum simulated (black line) superimposed by a Gaussian curve (blue line) fitted to the spectrum using Least Square Error Method. The green dashed line represents the noise power density (P_N), the vertical red line shows the center of frequency distribution (f_d), the difference between the vertical orange and red lines determines the standard deviation of the Gaussian curve fitted to the spectrum and the area between the blue dashed line and the green dashed line defines the power of the signal (P).

Figure 3 – Percentage of occurrences of Doppler Frequencies estimated by MLE using spectra with no incoherent integration and integration of 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 spectra. Each Doppler frequency is centered in the integer frequency defined in the axis with ± 0.5 Hz of resolution.

Figure 4 – Percentage of right estimated answers ($PREA$) in function of the number spectra used in the incoherent integrations ($NICH$). The analyzed incoherent integrations are the blue dots, the statistical error is represented by the green region and the logarithmical fitting is the red curve. The dashed line shows the saturation of $PREA$, i.e, 100% of occurrences.

Legenda de Figuras:

Figura 1 – Ilustração da integração incoerente aplicada a cem espectros consecutivos (à esquerda) e o espectro resultante (à direita).

Figura 2 – Espectro de potencia simulado (linha preta) sobreposto por uma curva Gaussiana (linha azul) ajustada ao espectro utilizando o Método de Mínimos Erros Quadráticos. A linha tracejada verde representa a densidade de potência de ruído (P_N), a linha vertical vermelha mostra o centro da distribuição de frequências (f_d), a diferença entre as linhas vertical laranja e vermelha determina o desvio padrão da curva Gaussiana ajustada ao espectro e a área entre a linha tracejada azul e a linha tracejada verde define a potência do sinal (P).

Figura 3 – Porcentagem de ocorrência das frequências Doppler estimadas por MLE utilizando espectros sem integração incoerente e integração de 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 espectros. Cada frequência Doppler é centrada na frequência inteira definida no eixo com ± 0.5 Hz de resolução.

Figura 4 – Porcentagem do número de respostas bem estimadas ($PREA$) em função do número espectros utilizados nas integrações incoerentes ($NICH$). As integrações incoerentes analisadas estão em azul, o erro estatístico é representado pela região verde e a curva logarítmica ajustada está em vermelho. A linha tracejada mostra a saturação de $PREA$, i.e., 100% das ocorrências.

Fig 1.

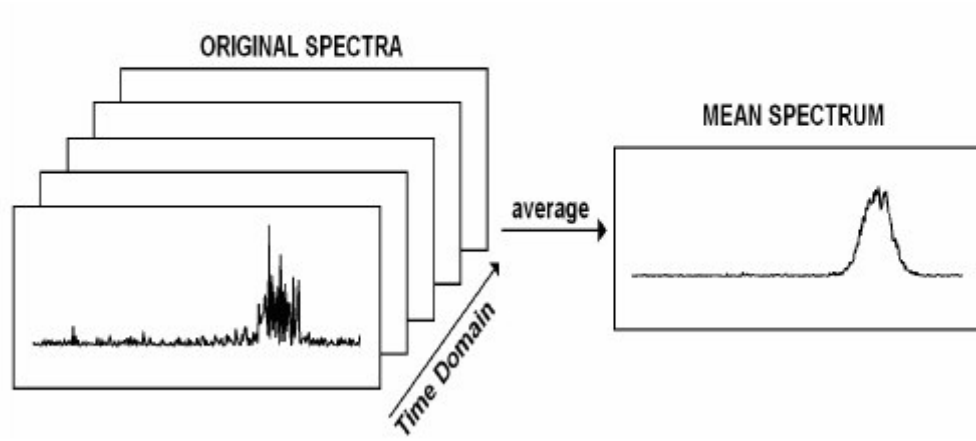


Fig 2.

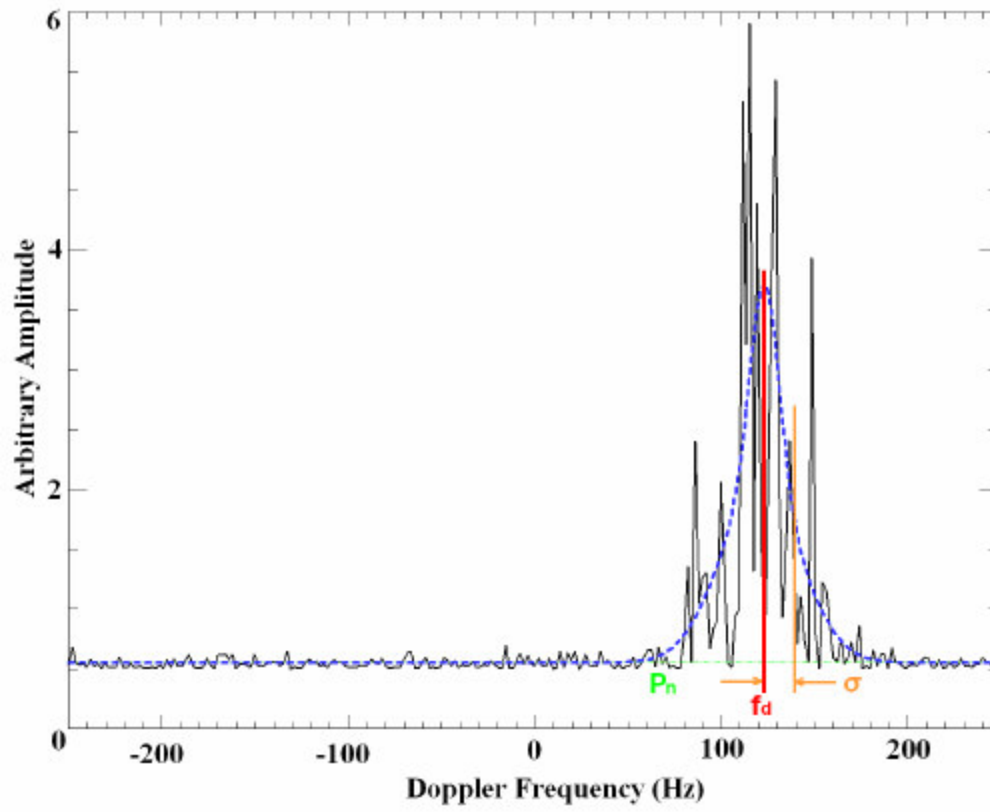


Fig 3.

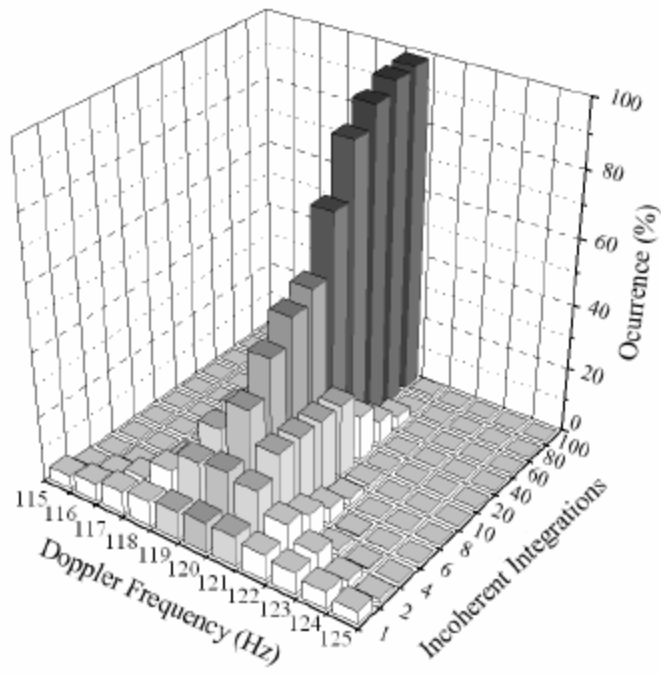
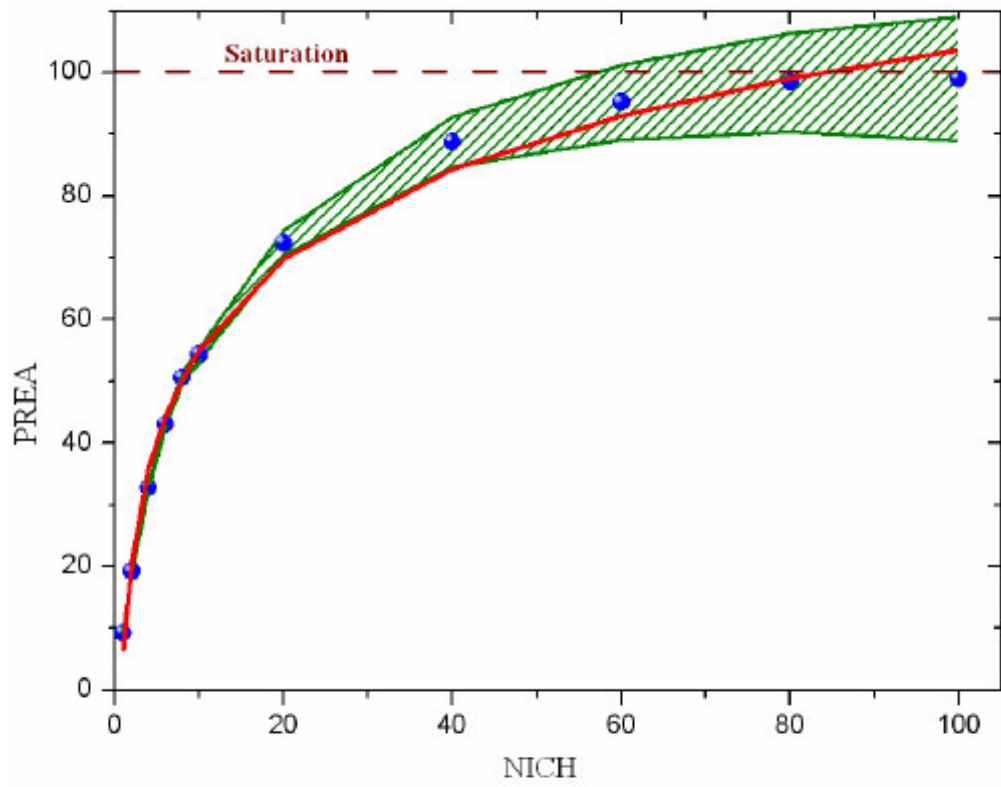


Fig 4.



A2.1

STATISTICAL STUDY OF CONSTRAINING PARAMETERS IN LEAST SQUARE METHOD APPLIED TO GAUSSIANS FIT TO POWER SPECTRA OF SIMULATED RADAR ECHOES OF ELECTROJET PLASMA IRREGULARITIES

H. C. Aveiro^(1,2), C. M. Denardini⁽³⁾, M. A. Abdu⁽³⁾, N. J. Schuch⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, PO 515 - S. J. Campos, SP, Brazil

Corresponding author: aveiro@lacsma.ufsm.br

Abstract

The Least Square Fit Method modified by Levenberg-Marquardt is intensively used in many areas of space sciences for fittings mathematical equations to sample data. In equatorial electrojet studies based on back-scatter coherent radar data this method has been used to fit the sum of two Gaussians to the power spectra of the echoes back-scattered from 3-meter plasma irregularities. This fitting is done in order to identify the Doppler velocities of the two types of plasma irregularities power spectra present in the electrojet echoes. For the present work we have simulated coherent radar echoes to generate power spectra having the characteristic of the electrojet irregularities. The simulations were made based on *a priori* parameters of the plasma irregularities such as group velocity and spectral width. Using this simulated data set, we have performed a statistical study of constraining the parameters space in the Least Square Fit Method applied to two Gaussians fit to power spectra. The variance distribution of the Gaussian parameters is presented and analyzed in terms of the weights of the penalty functions, which prevent the method to converge to a local minimum. An analysis of the variance of each parameter as a function of its constraining value is also presented.

Introduction

At about 105 km of altitude in the equatorial E region and covering a latitudinal range of $\pm 3^\circ$ around the dip equator flows an intense electric current named equatorial electrojet (EEJ) [1]. It is driven by the E region dynamo [2]. Studies of the equatorial ionosphere using VHF radars have shown echoes back-scattered from plasma irregularities in the EEJ. These studies showed distinct spectral signature for the two observed irregularities, Type 1 and Type 2, also known as two-stream [3,4] and gradient drift [5], respectively. They have been studied in order to characterize its spectra and explain the phenomenology [1, 2, 6, and references therein]. They have also been studied in order to understand the E region electric fields [7, 8, 9], its primary driver. Since 1998, when the Brazilian 50 MHz coherent back-scatter became fully operational, such studies have also been conducted in the Brazilian longitude sector [10, 11, 12, 13]. For such studies, a precise determination of the Doppler shift of the irregularities is a crucial requirement. And the curve fitting is presented as an efficient tool to determine the irregularity Doppler shift [14, 15, 16]. The curve fitting as a parameter estimation technique is based on finding the parameters of a well known mathematic equation, trying to minimize the mean square errors between observational data and the fit curve [17]. In this work we have studied the implications of constraining the parameters of Gaussian curves fitted to power spectra of simulated back-scatter radar signals from Type 1 irregularities. This statistical study aims to quantify the advantages and disadvantages of applying such technique. The methodology of this work as well as the results are discussed in the following section.

Theory and Method

This work focuses on the study of Type 1 power spectrum of the back-scattered signals from 3-m EEJ plasma irregularities that should present a sharp peak centered at around 120 Hz corresponding to the radar frequency of 50MHz. The Gaussian covariance model of Zrníc [18] was used to simulate power spectra of 3-m plasma irregularities containing both the characteristics of the gradient drift and two-stream instability, each spectra having 256 points. Type 2 irregularities were simulated with Doppler frequency $f_{d2} = 80\text{Hz}$, standard deviation $\sigma_f = 50\text{Hz}$ and signal-to-noise ratio $\text{SNR}_2 = 3\text{dB}$. For Type 1 irregularities we have simulated three data set having the same Doppler frequency (f_{d1}) and standard deviation (σ_f), namely, 120Hz e 20Hz, respectively. However, each set of Type 1 spectra was chosen to have different signal-to-noise ratio (SNR_1): 3dB, 6dB and 9dB. Thereafter, we have summed each spectrum of the three sets of Type 1 spectra with one spectrum of the set of Type 2 spectra. This resulted in three sets of simulated EEJ plasma irregularities spectra: 1) Type 2 with 3dB plus Type 1 with 3dB; 2) Type 2 with 3dB plus Type 1 with 6dB and 3) Type 2 with 3dB plus Type 1 with 9dB. White noise was added to signals in time domain in order to assure a more

realistic variance in the power spectra. In this way, each simulated spectrum is described by the sum of two Gaussians and a noise level, i.e., it was described by one function S in relation to the frequency f , given by:

$$S(f) = \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f-f_{d1})^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f-f_{d2})^2}{2\sigma_2^2}\right] + P_N \quad (1)$$

where P_1 and P_2 are, respectively, the areas of the Gaussians representing Type 1 and Type 2 spectra, P_N is the noise power, and the other parameters have been described above. To determine the 7 parameters of each spectrum, $a = \{f_{d1}, f_{d2}, \sigma_1, \sigma_2, P_1, P_2, P_N\}$, the Maximum Likelihood Estimate (MLE) was used for nonlinear fitting. This method is based on finding the parameters a that maximize the probability function $P(y_1 \dots y_n | a)$ of observing the data set $y = \{y_1 \dots y_n\}$. It is also a problem of finding the parameters a that minimize the square sum of residual errors between the data set y and the Gaussians $S(f)$, considering the uncertainty σ_i related to each point y_i . In view of this, equation (2) below presents our objective function to be minimized. Here N is the number of frequency points, y_i is the observed spectral amplitude for one given frequency in the power spectrum and all the other parameters have been introduced before.

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - S(f_i; P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)]^2}{\sigma_i} \quad (2)$$

Constraining the parameters search means to impose boundaries in the space of parameters, which can not be crossed by the method during the search. One way of doing this is by imposing penalties to the objective function when the method assumes unrealistic physical values [19]. We have done this by adding the following function to (2):

$$\zeta_j = \frac{\alpha_j}{h_j(P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)} \quad (3)$$

where α_j is the weight of the function and h_j is penalty function for each Gaussian parameter. Such function should be positive in the valid region of search, decrease rapidly as the search approach of the prohibited region, and be negative when the method crosses the boundary. In this way, the search for Gaussian parameters of spectra characteristics of irregularities Type 1 and Type 2 are limited to physically acceptable values. For this study we have used the method described above to simulated 3000 spectra characteristic of Type 1 and Type 2 EEJ irregularities, and separated them in three different groups (having 1000 spectra each one) according the SNR_1 . Afterwards, every spectrum was fitted by two Gaussians, constraining f_{d1} between 100 and 150 Hz, which corresponds to a Doppler velocity between 300 and 450 m/s. Moreover, we have studied the response of the fitting by constraining the parameter with five different weights in the penalty function: $10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ and 0. The basic analysis consisted in a direct comparison of the f_{d1} fitted to the spectra using Gaussians curves with the *a priori* f_{d1} value used to generate the Type 1 spectra. We have also compared the behavior of the variance of the f_{d1} and the standard deviation of the Gaussian Type 1 (sd_1) as the weight of the penalty functions (α_j) and power-to-noise level of the Gaussian Type 1 (SNR_1) increase.

Results and Discussions

The distributions of the Doppler frequency of the Gaussian Type 1 (f_{d1}) as it was estimated by the MLE Method for different weights (α_j) in the penalty function is presented in Fig. 1. The results for the first data set, Fig. 1-a, shows when spectra Type 1 were simulated using $\text{SNR}_1 = 3\text{dB}$. Fig. 1-b shows the distribution for the case when $\text{SNR}_1 = 6\text{dB}$ and Fig. 1-c gives the distribution of f_{d1} versus α_j when $\text{SNR}_1 = 9\text{dB}$. In this figure we see the distribution of f_{d1} do not change much as α_j decreased from 10^0 to 10^{-3} . However, some differences can be noted in the distribution of f_{d1} when no penalty functions are applied. It seems the distribution spreads out from the expected frequency of 120Hz when applying constraints. This effect becomes notable when SNR_1 is comparable to SNR_2 . We also see that as SNR_1 goes from 3 to 9dB the method clearly increased the percentage of spectra fitted with the right f_{d1} . This seems expected, but we should remember the increase in the signal power would increase the variance in the peak of the power spectrum, which in turn increases the uncertainties of the fitting method. Nevertheless, the MLE Method provides good results even when the data points have a large variance [14], which seems to be the case here.

The distributions of the variance of Doppler frequency estimated from the Gaussian Type 1 (Vf_{d1}) associated with the fitting method for different penalty function weights (α_j) is shown in Fig. 2. Like before, Fig. 2-a shows the results for $\text{SNR}_1 = 3\text{dB}$, Fig. 2-b shows the distribution for $\text{SNR}_1 = 6\text{dB}$, and Fig. 2-c gives the distribution for 9dB. In all these figures the low values of Vf_{d1} (<1) increase with applying constraints, which would lead to the interpretation that f_{d1} is better estimated. However, when applying constraints we have imposed penalties to the objective function by adding (3) with α_j in the numerator. Once Vf_{d1} is derived from the inverse of the gradient of the objective function, the higher α_j the lower Vf_{d1} . Thereafter, the above assumption based on Fig. 2 that f_{d1} is better estimated when using constraints should not be considering conclusive. Moreover, Fig. 1 shows that distribution of f_{d1} spreads out as α_j differs from zero. A tentative explanation for the increase shown in Fig. 2 is thought in terms of fitting sharp peaks.

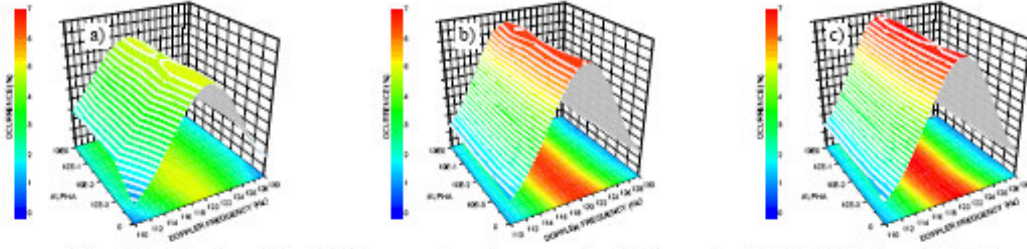


Fig. 1. Distribution of Doppler frequency type 1 versus α_j for SNR_1 equal to (a) 3dB, (b) 6dB and (c) 9dB.

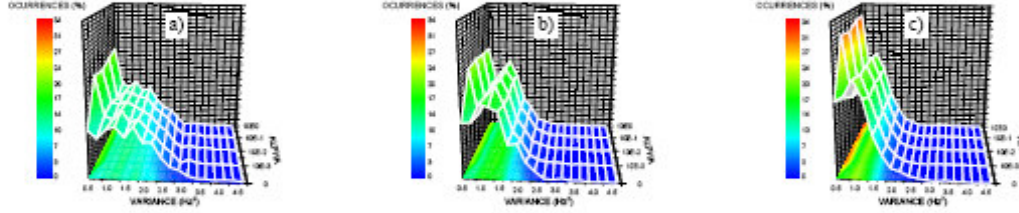


Fig. 2. Distribution of variance of Doppler frequency type 1 versus α_j for SNR_1 equal to (a) 3dB, (b) 6dB and (c) 9dB.

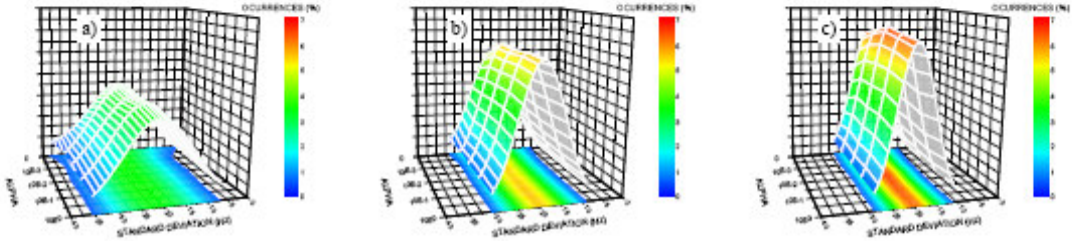


Fig. 3. Distribution of Standard Deviation type 1 in function of α_j for SNR_1 equal to (a) 3dB, (b) 6dB and (c) 9dB.

The distributions of the standard deviation (σ_j) estimated for the Gaussian curve Type 1 for different penalty function weights (α_j) is presented in Fig. 3. Fig. 3-a shows the results when it was used $\text{SNR}_1 = 3\text{dB}$, Fig. 2-b shows the results when using 6dB, and Fig. 2-c gives the distribution for $\text{SNR}_1 = 9\text{dB}$. Here we see the distribution of the σ_j gets sharp as SNR_1 increases from 3 to 9dB. Each individual graph shows the occurrence of σ_j close to 20 Hz do not change much as α_j decreased from 10^0 to 10^{-3} . But some difference is observed in the distribution of σ_j without constraints. The distribution spreads in the base and decreases in amplitude. It indicates that the precision in estimating σ_j increases when α_j differs from zero. However, as shown in Fig. 4 below, the good precision in estimating σ_j is balanced by the reduction in the number of fitted spectra. This figure shows the percentage of fitted spectra in function of α_j for SNR_1 equal to (black) 3dB, (navy) 6dB and (blue) 9dB. Anyway, the increases in the precision in estimating σ_j seem to be the best result of applying constraints.

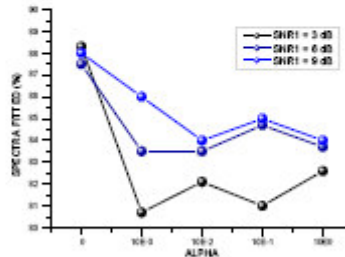


Fig. 4. Percentage of fitted spectra in function of α_j for SNR_1 equal to (black) 3dB, (navy) 6dB and (blue) 9dB.

Conclusions

We have studied the effect of constraining the range of Gaussian curves parameters during curve fitting methods applied to simulated power spectra having signatures of the presence of the well known Type 1 and Type 2 plasma

irregularities from the equatorial electrojet. The main conclusion is that the application of constraints could compromise the estimation of the Doppler frequency f_{dt} , increasing the uncertainty around the “right” value. On the other hand, the standard deviation of the Gaussian Type 1 seems to be better fitted, as was presented in the Fig. 3. The results have shown the application of constraints apparently reduces the variance of the curve. However, this reduction seems not to lead to a better fitting because our statistics studies have shown the f_{dt} did not behave in the same way. On the contrary, its distributions had spread out when α_j differed from zero. Moreover, including (3) with α_j in the numerator to the objective function will reduce Vf_{dt} , as demonstrated. Indeed, observing Vf_{dt} alone for fitting one single spectrum could induce a misinterpretation of the quality of the fitting. Despite these conclusions seem to be simple, they have direct impact into the data analysis from coherent back-scatter radars echoes. An application of constraint without consider what we have present here would not compromise seriously any result based on the Doppler velocity of irregularities type 1. But it will certainly lead to a higher error and maybe to error propagations into the determination of dependent quantities like electric field inferred from the Doppler velocities from such irregularities. Finally, we should mention that the choice for constraining the parameters should be related to the objective of the research and its can not be generalized for all the cases.

Acknowledgments

H. C. A. wishes to thank CNPq for the support to his program through the project nr. 107616/2003-3.

References

- [01] Forbes, J. M., 1981, The Equatorial Electrojet: Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 19, No. 3, p.469-504.
- [02] Fejer, B. G. and Kelley, M. C., 1980, Ionospheric Irregularities: Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 18, No. 2, p.401-454.
- [03] Farley, D. T., 1963, A plasma instability resulting in field aligned irregularities in the ionosphere: Journal of Geophysical Research, Vol. 68, No. A22, p.6083-6097.
- [04] Buneman, O., 1963. Excitation of field aligned sound waves by electron streams: Physical Review Letters, Vol. 10, No. 7, p.285-287.
- [05] Rogister, A. and N. D'Angelo, Type II irregularities in the equatorial electrojet, J. Geophys. Res., 75, 3879-3887, 1970.
- [06] Reddy, C. A., 1981, The equatorial electrojet: a review of ionospheric and geomagnetic aspects: Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 43, No. 5/6, p.557-571.
- [07] Reddy, C. A., Vikramkumar, B. T. and Viswanathan, K. S., 1987, Electric fields and currents in the equatorial electrojet deduced from VHF radar observations – I. A method of estimating electric fields: Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 49, No. 2, p.183-191.
- [08] Hysell, D. L., Larsen, M. F. and Woodman, R. F., 1997, JULIA radar studies of the electric field in the equatorial electrojet: Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 13, p.1687-1690.
- [09] Hysell, D. L. and Burcham, J. D., 2000, Ionospheric electric field estimates from radar observations of the equatorial electrojet: Journal of Geophysical Research, Vol. 105, No. A2, p.2443-2460.
- [10] Abdu, M. A., Denardini, C. M., Sobral, J. H. A., Batista, I. S., Muralikrishna, P. and de Paula, E. R., 2002, Equatorial electrojet irregularities investigations using a 50 MHz back-scatter radar and a Digisonde at São Luís: Some initial results: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 64, No. 12-14, p.1425-1434.
- [11] Abdu, M. A., Denardini, C. M., Sobral, J. H. A., Batista, I. S., Muralikrishna P., Iyer, K. N., Veliz, O. and de Paula, E. R., 2003, Equatorial electrojet 3 m irregularity dynamics during magnetic disturbances over Brazil: results from the new VHF radar at São Luís: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 65, No. 14-15, p.1293-1308.
- [12] Denardini, C. M., Abdu, M. A. and Sobral, J. H. A., 2004, VHF radar studies of the equatorial electrojet 3-m irregularities over São Luís: day-to-day variabilities under auroral activity and quiet conditions: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 66, n17, p.1603-1613.
- [13] Denardini, C. M., 2004, Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002): São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Thesis.
- [14] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [15] Kudeki, E., Bhattacharyya, S. and Woodman, R. F., 1999, A new approach in incoherent scatter F region E x B drift measurements at Jicamarca: Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. A12, p.28145-28162.
- [16] Denardini, C. M., 2003, Estimación de parâmetros de dados físicos: São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- [17] Bevington, P. R. and Robinson, D. K., 1992, Data reduction and error analysis for the physical science. McGraw-Hill.
- [18] Zrnic, D. S., 1979, Estimation of spectral moments of weather echoes: IEEE Transactions of Geosciences on Electronics, Vol. 17, p.113-128.
- [19] Bard, Y., 1974, Non linear parameter estimation. Academic Press.



A Statistical Study of the Application of Incoherent Integration to Simulated Equatorial Electrojet Irregularities Power Spectra

Henrique C. Aveiro*^(1,2), Clezio M. Denardini⁽³⁾, Mangalathayil A. Abdu⁽³⁾, Nelson J. Schuch⁽¹⁾, Cleomar P. da Silva^(1,2)

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria, RS, Brazil;

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brazil;

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Aeronomia – São José dos Campos, SP, Brazil.

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The RESCO 50 MHz coherent back-scatter radar has been operated since 1998 at the INPE/MCT's São Luís Space Observatory (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5°), Brazil, on the dip equator to study the equatorial electrojet dynamics. Spectral analysis of the received echo from equatorial electrojet irregularities allow us to identify the dominant type of plasma irregularities in the electrojet bulk observed by the radar. Using curve fitting methods on the resulting power spectra it is also possible to obtain other characteristics from the echoes, such as: center of frequency distribution, spectral width and power. The usual approach in this analysis is through a Gaussian fitting based on the method of Least Square Error to parameters estimation. Before fitting the power spectra it is usual to smooth it in order to reduce the noise level and define better the center of frequency distribution. From the center of frequency distribution, we are able to deduce the Doppler shift of the irregularities in relation to the radar, which is close related to the electric fields that drives the plasma instabilities. In this work, we have simulated echoes signals from 3-meter type 1 plasma instabilities, and analyzed it in order to recover the center of frequency distribution used to simulate the data generated. As a smoothing method we have used incoherent integration. We have applied three distinct levels of smoothing in order to evaluate the response of the fitting to this technique. The advantages and disadvantages of applying different levels of incoherent integration over power spectra of back-scatter echoes from type 1 irregularities in the parameter estimation are presented and discussed.

Introduction

Between about 90 and 120 km of altitude (at the E region heights) and covering a latitudinal range of $\pm 3^\circ$ around the dip equator flows an intense electric current, denominated equatorial electrojet, EEJ (Forbes, 1981). It is driven by the E region dynamo (Fejer and Kelley, 1980) and it plays an important role in the phenomenology control of the ionosphere-thermosphere system. The EEJ was initially

detected in the first half of the twentieth century as geomagnetic large scale variations in magnetic observatories close to the equator. Egedal (1948) was the first one to conclude that this variation was due to an electric current flow under the magnetic dip equator; however, it was Chapman (1951) who first explained it, terming this phenomenon as equatorial electrojet.

Studies of the equatorial ionosphere using VHF radars have shown echoes back-scattered from electron density irregularities in the EEJ. These studies showed distinct spectral signature for the two types of irregularities, called type 1 and type 2, also known as two-stream (Farley, 1963; Buneman, 1963) and gradient drift, respectively. Several experiments have been done to investigate the EEJ irregularities in order to characterize its spectra and explain the phenomenology (Bowles et al., 1963; Bowles and Cohen, 1962; Cohen and Bowles, 1967; Balsley, 1969; Gupta and Krishna Murthy, 1975; Hanuise et al., 1979; Crochet et al., 1979).

In 1998, the RESCO 50 MHz coherent back-scatter radar entered in operation at the INPE/MCT's São Luís Space Observatory, Brazil, on the magnetic equator. Since then several studies have been conducted in the Brazilian sector (Abdu et al. 2002, 2003; Denardini et al., 2004). Through the constant monitoring of the EEJ irregularities, we can have a radiography of E region electric fields (Schieldge et al., 1973, Farley and Fejer, 1975; Reddy, 1981; Reddy and Devasia, 1981; Viswanathan et al., 1987; Reddy et al., 1987; Hysell et al., 1997; Hysell and Burcham, 2000; Denardini, 2003). In this context, the correct estimation of the Doppler shift from the irregularities echoes power spectra is a crucial point. And the curve fitting is presented as an efficient tool to determine the irregularities Doppler shift (Kudeki et al., 1999; Denardini, 2004). The curve fitting as a parameter estimation technique is based on finding the parameters of a well known mathematic equation, trying to minimize the mean square errors between observational data and the fit curve (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

It is known that the incoherent integration reduces the signal variance (Fukao, 1989). In order to improve the techniques of RESCO radar data analysis, we have study the incoherent integration technique applied to power spectra of simulated back-scatter signals from type 1 irregularities from EEJ. This statistical study aimed to quantify the advantages and disadvantages of applying such technique. The methodology of this work as well as the results is discussed in details.

Theory and Method

The RESCO coherent back-scatter radar is operated routinely during two weeks per month. It is usually set for EEJ sounding transmitting one pulse each 1-2 ms with pulse width of 20 μs and time delay of 600 μs . Therefore, the power spectra within the Doppler frequencies, related to the Doppler shift, obtained from Fast Fourier Transform (FFT), have an aliasing frequency of 250-500 Hz. The frequency resolution is determined by the number of subsequent pulses taken for the FFT analysis and by the aliasing frequency.

From each spectrum, seven parameters are estimated through curve fitting. We usually fit the sum of two Gaussian curves to the spectrum, each one related to one type of irregularity.

Once the focus of the work is the study of type 1 irregularity spectra, the Gaussian covariance model of Zrníc (1979) was used to simulate power spectra of 3-meters plasma irregularities containing only the characteristics of the Farley-Buneman instability. Type 1 power spectra were simulated having 256 points each one. All these spectra were chosen to have $f_d = 120$ Hz,

$\sigma = 20$ Hz, $P_N = 0.5$ W and signal-to-noise ratio (SNR) equals to 3 dB. The white noise was added to the data in time domain in order to assure a more realistic variance in the power spectra. So, each spectrum simulated is described by a noise level added to a Gaussian curve (Takeda et al., 2001), i.e., our data set was described by one function S in relation to the frequency f , given by:

$$S(f) = \frac{P}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\sigma^2}\right] + P_N, \quad (1)$$

where P , f_d , σ and P_N are, respectively, the spectral power, the center of frequency distribution (corresponding to Doppler shift), spectral width and noise level. An example of a spectrum simulated is presented in Figure 1 where the quantities mentioned above are indicated in different colors. The green dashed line represents the noise power density (P_N), the vertical red line shows the center of frequency distribution (f_d), the difference between the vertical orange and red lines determines the standard deviation of the curve fitted to the power spectrum and the area between the blue dashed line and the green dashed line defines the power of the signal (P).

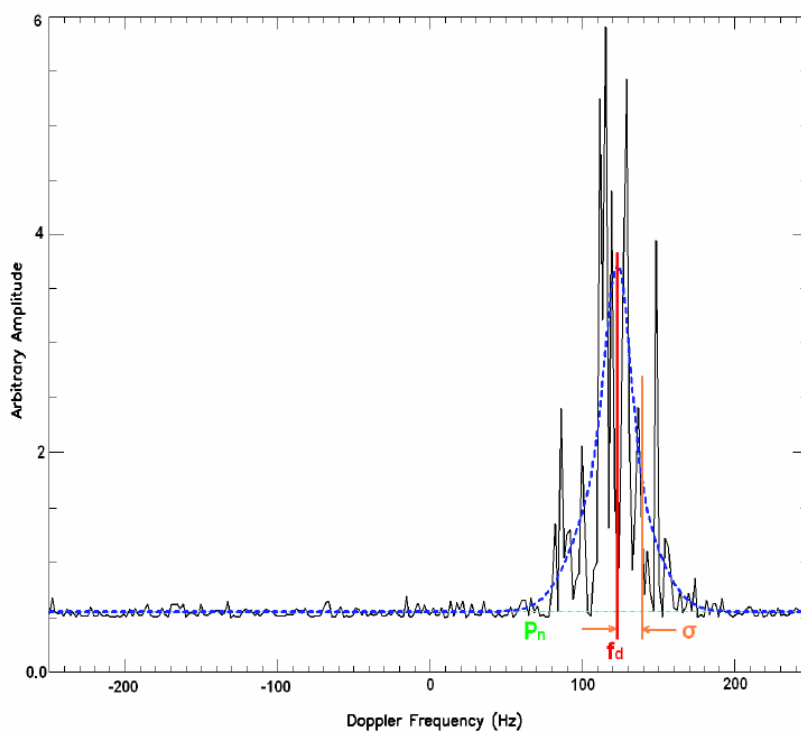


Figure 1 – Power spectrum simulated (black line) superimposed by a Gaussian curve (blue line) fitted to the spectrum using Least Square Error Method. The green dashed line represents the noise power density (P_N), the vertical red line shows the center of frequency distribution (f_d), the difference between the vertical orange and red lines determines the standard deviation of the Gaussian curve fitted to the spectrum and the area between the blue dashed line and the green dashed line defines the power of the signal (P).

We started step two analyzing the simulated power spectra after having a proper data set with a *a priori* type 1 characteristics from which we could establish comparison with the parameters estimated by the method. To reduce our data set of 256 points to 4 parameters, we have used the Maximum Likelihood Estimation with the purpose of minimize the square sum of residual error as given by (Woodman, 1985):

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N [y_i - S(f_i; P, f_d, \sigma)]^2, \quad (2)$$

where N is the number of frequency points and y_i is the observed spectral amplitude for one given frequency.

Curve fitting algorithms usually give not good result when the data variance is high. To attempt reducing the variance, we usually integrate incoherently consecutive spectra, i.e., we smooth the spectra. Once the noise is a random component, the resultant spectrum will tend to have minor variance. An illustration of incoherent integration applied to hundred consecutive spectra like the first on the left side, with the resulting mean spectra aside is presented in Figure 2. In this illustration we see a noise bunch of spectra (represented by the first one) on the left side transformed into a smoothed one on the right side.

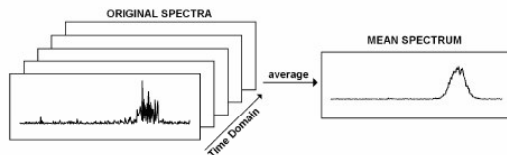


Figure 2 – Illustration of incoherent integration applied to hundred consecutive spectra like the first on the left side.

The detectability of a Doppler spectrum can be defined as per (Gage and Balsley, 1978):

$$D \equiv \frac{P_s}{\sigma_N}, \quad (3)$$

where P_s is the peak spectral density of the power spectrum and σ_N is the standard deviation of noise. The noise power density has a chi-squared distribution with 2 degrees of freedom, since P_N results from the squared sum of real and imaginary components of the amplitude spectrum. The application of incoherent integration, by averaging the N_i consecutive spectra, does not change the mean values of spectral densities of signal and noise. The effect of incoherent integration is just increasing the degrees of freedom of the chi-squared distribution, instead of 2 degrees with no integration, it would have $2 \times N_i$ degrees of freedom, increasing too the detectability by $\sqrt{N_i}$ (Fukao, 1989). For this reason the Gaussian curve becomes more visible in Figure 2.

Results

It was generated 10,000 simulated power spectra within type 1 irregularity characteristics, such as $f_d = 120$ Hz. Afterwards, we have integrated incoherently every group

of 10 and 100 spectra, in order to create two other data set. So, we have three groups of spectra were the first one have 10,000 spectra not smoothed, the second one have 1,000 spectra smoothed by 10 incoherent integrations, and the third one having 100 spectra smoothed by 100 incoherent integrations.

Every spectrum of the three groups was fitted by a single Gaussian to analyze the result of the fitting using Least Square Error. After estimating the spectral moments of the individual curves, we analyze the answer of the method in the determination of f_d in relation to the *a priori* f_d values used to generate the power spectra with type 1 characteristics. As a result of our analysis, we present in Figure 3 the histograms of the Doppler frequencies estimated from the simulated data. Each bar is centered in the integer frequency defined in the Y axis with ± 0.5 Hz of resolution. The red bar shows the locus of $f_d = 120 \pm 0.5$ Hz used to simulate the spectra, and, hence, the expected answer. The histogram of Figure 3-a shows the distribution of the answer of fitting method to the case with no incoherent integration applied to the spectra. The histogram of the Figure 3-b shows the distribution of the answer of fitting method to the case were incoherent integration of 10 spectra was applied. And the histogram of 3-c shows the distribution of the answer of fitting method to the case were incoherent integration of 100 spectra was applied. One should remember, however, that the number of answer is different for the different histograms in Figure 3. For the histogram 3-a, we have 10,000 answers while for 3-b we have 1,000 and 100 for the 3-c. Nevertheless, the number of samples used do not imply in drastic changes in the results. We expect the same confidence limit in results with different number of samples.

The Figure 3 reveals the higher the number of incoherent integration the higher the number of answers close to the right value. A clear interpretation of this result is to assume that, as we increase the number of spectra in the incoherent integration, we improve the number of success in estimating the test parameter (f_d). However, the application of the technique implies in increasing time resolution. In the case of incoherent integration of 10 spectra, the time resolution is increased by 10, i.e., our resolution suffers an increase directly proportional to the number of spectra used in the integration.

Quantitatively, using no incoherent integration, 9.25% of the answer where close to the *a priori* f_d value. Using incoherent integration of 10 spectra, 54.40% of the answer where close to the *a priori* f_d value. And, using incoherent integration of 100 spectra, 99.00% of the answer where close to the *a priori* f_d value. This indicated that the efficiency of the method was increased from 9.5% to 99.0%, with a statistical error of 0.42% (± 0.5 Hz), when we go from no use of incoherent integration to the use of incoherent integration of 100 spectra. In this case, the degrees of freedom of P_N were increased from 2 to 200 and the detectability of the Doppler spectrum was increased by 10. In the same way, using 10 spectra, the degrees of freedom of P_N were increased from 2 to 20 and the detectability of the Doppler spectrum was increased by 3.16.

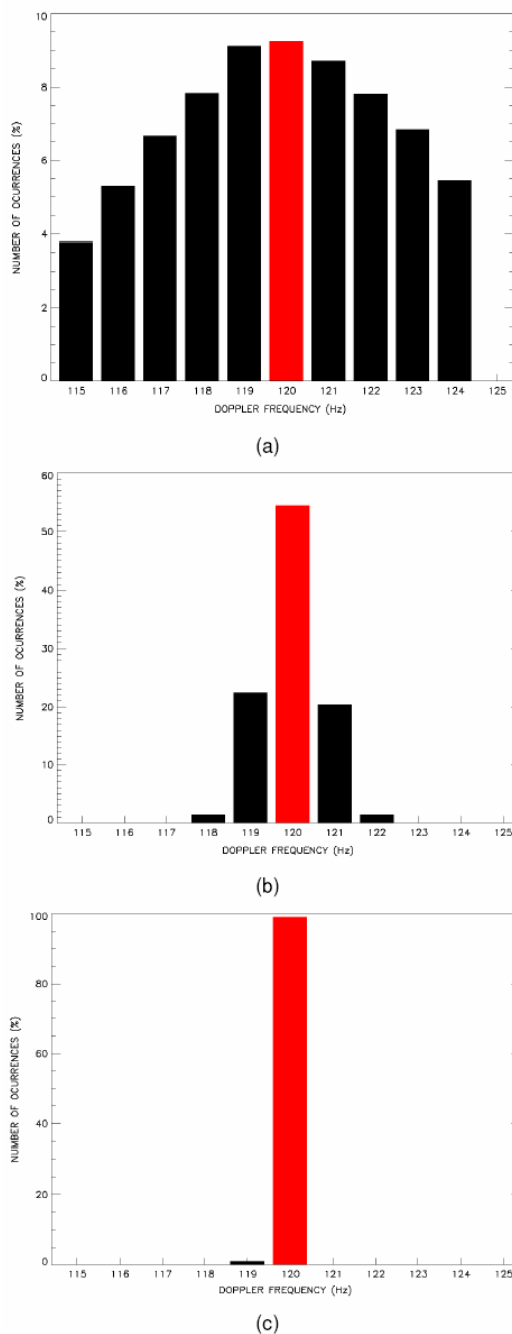


Figure 3 – Histograms of Central Frequency estimated by Least Square Error using spectra with no incoherent integration (3.a), integration of 10 spectra (3.b) and integration of 100 spectra (3.c). In the figures, the red bars mean the expected result of the estimation, $f_d = 120 \pm 0.5$ Hz.

Conclusions

The technique of incoherent integration showed itself a valuable tool with significant improvement in the determination of the test parameter, the center of the frequency distribution (f_d) of the EEJ irregularities power spectra. Increasing the number of incoherently integrated spectra, we can improve the parameters estimation; however, we have depreciation of the time resolution. In the case of the RESCO radar, where we normally have one spectrum per 6 seconds, integrate incoherently 10 spectra would mean to increase the resolution to one spectrum per minute. For EEJ dynamics studies this number of integrations would not compromise the analysis. However, despite a high number of integrated spectra would improve considerably the estimation of the center of frequency distribution, as we have shown in the present study, it could lead to an undesirable time resolution. This could compromise future analyses of correlation, as between the RESCO radar data and auroral indices, for example.

Acknowledgments

H. C. A. and C. P. S. wish to thank CNPq/MCT for financial support to their undergraduate programs through the projects nr. 107616/2003-3 and 104427/2004-3, respectively.

References

- Abdu, M. A., Denardini, C. M., Sobral, J. H. A., Batista, I. S., Muralikrishna, P. and de Paula, E. R., 2002, Equatorial electrojet irregularities investigations using a 50 MHz backscatter radar and a Digisonde at São Luís: Some initial results: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64, No. 12-14, p.1425-1434.
- Abdu, M. A., Denardini, C. M., Sobral, J. H. A., Batista, I. S., Muralikrishna P., Iyer, K. N., Veliz, O. and de Paula, E. R., 2003, Equatorial electrojet 3 m irregularity dynamics during magnetic disturbances over Brazil: results from the new VHF radar at São Luís: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 65, No. 14-15, p.1293-1308.
- Balsley, B. B., 1969. Some characteristics of non-two-stream irregularities in the equatorial electrojet: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, p.2333-2347.
- Bowles, K. L. and Cohen, R., 1962. A study of radio wave scattering from sporadic E near the magnetic equator, in *Ionospheric Sporadic E*, edited by E. K. Smith and S. Matsushita, Pergamon, New York.
- Bowles, K. L., Balsley, B. B. and Cohen, R., 1963. Field-aligned E region irregularities identified with ion acoustic waves: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, p.2485-2497.
- Buneman, O., 1963. Excitation of field aligned sound waves by electron streams: *Physical Review Letters*, Vol. 10, No. 7, p.285-287.
- Chapman, S., 1948, The abnormal daily variation of horizontal force at Huancayo and Uganda: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 53, p.247-250.
- Chapman, S., 1951, The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution about Huancayo, Peru and elsewhere: *Archives Fur Meteorology, Geophysics and Bioclimatologie*, A44, p.368-390.
- Cohen, R. and Bowles, K. L., 1967. Secondary irregularities in the equatorial electrojet: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, p.885-894.
- Crochet, M., Hanuise, C. and Broche, P., 1979, HF radar studies of two-stream instability during a equatorial counter-electrojet: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, p.5223-5233.

- Denardini, C. M.**, 2003, Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002): São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Thesis.
- Denardini, C. M.**, 2004, Estimação de parâmetros de dados físicos: São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Denardini, C. M., Abdu, M. A. and Sobral, J. H. A.**, 2004, VHF radar studies of the equatorial electrojet 3-m irregularities over São Luis: day-to-day variabilities under auroral activity and quiet conditions: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 66, n17, p.1603-1613.
- Egedal, J.**, 1948, Daily variation of the horizontal magnetic force at the magnetic equator: *Nature*, Vol. 161, p.443-444.
- Farley, D. T.**, 1963, A plasma instability resulting in field aligned irregularities in the ionosphere: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. A22, p.6083-6097.
- Farley, D. T. and Fejer, B. G.**, 1975, The effect of the Gradient Drift term on type 1 electrojet irregularities: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. A22, p.3087-3090.
- Fejer, B. G. and Kelley, M. C.**, 1980, Ionospheric Irregularities: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 18, No. 2, p.401-454.
- Forbes, J. M.**, 1981, The Equatorial Electrojet: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 19, No. 3, p.469-504.
- Fukao, S.**, 1989, Middle atmosphere program – Handbook for map: International school on atmospheric radar, Vol. 30, Urbana (IL): SCOSTEP Secretariat.
- Gage, K. S. and Balsley, 1978**, Doppler radar probing of the clear atmosphere: *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 59, p.1074-1093.
- Gupta, K. S. and Krishna Murthy, B. V.**, 1975, On the sudden disappearance of equatorial sporadic E: *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, Vol. 27, p.131-138.
- Hanuise, C., Crochet, M., Gouin, P. and Ogubazghi, G.**, 1979, Radar observation of the equatorial counter-electrojet: *Annales Geophysicae*, Vol. 35, p.201-202.
- Hysell, D. L. and Burcham, J. D.**, 2000, Ionospheric electric field estimates from radar observations of the equatorial electrojet: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. A2, p.2443-2460.
- Hysell, D. L., Larsen, M. F. and Woodman, R. F.**, 1997, JULIA radar studies of the electric field in the equatorial electrojet: *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 13, p.1687-1690.
- Kudeki, E., Bhattacharyya, S. and Woodman, R. F.**, 1999, A new approach in incoherent scatter F region E x B drift measurements at Jicamarca: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. A12, p.28145-28162.
- Levenberg, K.**, 1944, A method for the solution of certain non-linear problem in least square: *Quarterly Applied Mathematics*, Vol. 2, No. 1, p.164-168.
- Marquardt, D. W.**, 1963, An algorithm for least square estimation of non linear parameters: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 2, No. 2, p.431-441.
- Reddy, C. A.**, 1981, The equatorial electrojet: a review of ionospheric and geomagnetic aspects: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 43, No. 5/6, p.557-571.
- Reddy, C. A. and Devasia, C. V.**, 1981, Height and latitude structure of the electric fields and currents due to local East-West winds in the equatorial electrojet: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. A7, p.5751-5767.
- Reddy, C. A., Vikramkumar, B. T. and Viswanathan, K. S.**, 1987, Electric fields and currents in the equatorial electrojet deduced from VHF radar observations – I. A method of estimating electric fields: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 49, No. 2, p.183-191.
- Schildge, J. P., Venkateswaran, S. V. and Richmond, A. D.**, 1973, Ionospheric dynamo and equatorial magnetic variations: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 35, No. 6, p.1045-1061.
- Takeda, S., Nakamura, T. and Tsuda, T.**, 2001, An improvement of wind velocity estimation from radar Doppler spectra in the upper mesosphere: *Annales Geophysicae*, Vol. 19, p.837-844.
- Viswanathan, K. S., Vikramkumar, B. T. and Reddy, C. A.**, 1987, Electric fields and currents in the equatorial electrojet deduced from VHF radar observations – II. Characteristics of electric fields on quiet and disturbed days: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 49, No. 2, p.193-200.
- Woodman, R. F.**, 2001, Spectral moment estimation in MST radars: *Radio Science*, Vol. 20, No. 6, p.1185-1195.
- Zrnic, D. S.**, 1979, Estimation of spectral moments of weather echoes: *IEEE Transactions of Geoscience on Electronics*, Vol. 17, p.113-128.



Resultados Preliminares de Estudo do Comportamento da Camada F Ionosférica sob o Equador Magnético a partir de Dados de Digissonda.

Cleomar P. Silva^(1,2), Luzia L. Lock^(1,2), Inez S. Batista⁽³⁾, Clezio M. Denardini⁽³⁾, Nelson J. Schuch⁽¹⁾, Henrique C. Aveiro^(1,2)

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria, RS, Brazil;

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brazil;

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Aeronomia – São José dos Campos, SP, Brazil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The pre-reversal enhancement is a phenomenon of the evening equatorial ionosphere that has been pointed as decisive factor in the formation of the plasma bubbles of the F region. This enhancement can be observed through the data analysis of several equipments, among them: radars and digisondes. A digisonde 256 of INPE is installed and collecting data in São Luís (2.33° S, 44.2° W, dip: -0.5°). In the present work we have used the peak height of the F2 layer (hmF2) and the virtual height of the F layer (h'F) from some selected days in 2003 to study of speed of the layer F ascent in the equatorial zone during the pre-reversal period. The peak heights of the F2 layer obtained from the data analysis are compared with the same parameter obtained from simulations of electron density profiles. For the simulations we have used the International Reference Ionosphere model - IRI. The speed of vertical drift is calculated from the data collected by the digisonde. The data set selected for this analysis covers some days from the periods around summer solstice and around autumn equinox in 2003. According the level of magnetic activity, the days of data acquisitions were classified between calm and disturbed. The results are presented and discussed in terms of the season and in terms of magnetic disturbance level.

Introdução

A ionosfera é a porção ionizada da Atmosfera Terrestre que vai de, aproximadamente, 70 km até cerca de 1000 km de altura. Uma das características da ionosfera é a sua capacidade de interação com a atmosfera neutra, formando um sistema acoplado de energia eletromecânica de enorme complexidade (Hargreaves, 1992; Kivelson e Russel, 1995). Pode-se dizer que a eletrodinâmica da ionosfera só começou a ser estudada no século passado quando foi desenvolvida, quantitativamente, a teoria do dínamo (Baker e Martyn, 1953). Atualmente, já há um grande conjunto de informações a respeito deste assunto, contudo, ainda restam algumas questões a serem resolvidas e/ou aprimoradas. Entre elas, citamos o fenômeno de

formação de bolhas ionosféricas (Abdu, 1993). Neste contexto, a amplitude do pico de pré-reversão, caracterizado pela subida do plasma que ocorre ao entardecer (Abdu et al., 2004), tem sido apontada como fator determinante na formação de bolhas de plasma. Este pico pode ser observado através da análise de dados de diversos equipamentos, entre eles: radares e digisondas.

Neste trabalho apresentamos alguns resultados da comparação da amplitude do pico de pré-reversão entre períodos magneticamente calmos e perturbados observado em dados coletados pela digissonda instalada em São Luís do Maranhão (2,33° S; 44,2° O; dip: -0,5°), que se encontra sob o equador magnético. Para este estudo foram selecionados alguns dias dos solstícios e equinócios do ano de 2003. Os resultados obtidos também foram comparados com resultados de simulações do modelo *International Reference Ionosphere* - IRI 2000-2005.

Método de Análise de Dados

O sistema digissonda instalado em São Luís é do modelo 256. Ele é constituído de uma antena transmissora, quatro antenas receptoras tipo loop-cruzado, um computador para controle da transmissão-recepção e outro para armazenamento e transmissão dos dados (Reinisch et al., 1989). As sondagens de densidade eletrônica são feitas em intervalos de 15 minutos. Durante cada uma delas, é emitida uma seqüência de pulsos eletromagnéticos de onda senoidal, com frequência variável entre 0,5 e 30 MHz. As ondas, que são refletidas em diferentes alturas e de acordo com a densidade eletrônica, são captadas pelas antenas receptoras. O sinal captado sofre um pré-processamento digital e em seguida é arquivado. Os dados obtidos com este equipamento permitem a inferência de perfis de densidade eletrônica da ionosfera, os ionogramas. O sistema da digissonda possui também um programa interpretador automático de ionogramas, denominado SAO-X. Contudo, nossa experiência tem mostrado que é necessário que um operador faça uma revisão da interpretação automática para assegurar que os dados utilizados não contenham quaisquer erros provenientes de uma eventual má interpretação do programa.

A partir dos ionogramas, vários parâmetros das diferentes camadas ionosféricas podem ser deduzidos. Dentre eles citamos: a altura real do pico da camada F2 (hmF2), obtida a partir do modelo NHPC (Huang and Reinisch, 1996), e a altura virtual da base da camada F

(h'F), obtida diretamente do ionograma. Neste trabalho serão utilizados os parâmetros: hmF2, o qual é utilizado para comparação do comportamento da camada F2 entre as estações do ano, de acordo com o nível de atividade magnética, e com os resultados previstos pelo modelo IRI; e o parâmetro h'F, o qual é utilizado no cálculo de sua derivada temporal ($\Delta h'F / \Delta t$), a qual pode, sob determinadas circunstâncias, ser representativo da deriva vertical da camada F da ionosfera.

A escolha dos dias a serem analisados foi baseada em vários critérios, dentre eles: a disponibilidade de dados de digissonda durante períodos simultâneos de operação do radar de espalhamento coerente em 50 MHz (RESCO), também instalado em São Luís. Este critério visa o desenvolvimento de futuros trabalhos de comparações entre dados dos dois equipamentos. Entre os dados disponíveis foram escolhidos dias em torno do solstício de verão e equinócio de outono de 2003. Isto foi feito porque a maior ocorrência de bolhas de plasma no setor brasileiro ocorre em torno dos solstícios de verão, enquanto a maior incidência de bolhas no setor peruano é distribuída em torno dos equinócios (ver, por exemplo, Batista, 1985). Os dias selecionados foram classificados

entre calmos e perturbados, com base no índice de atividade magnética relacionado com a corrente anelar Kp . Os dias de sondagens que apresentaram, em qualquer horário do dia, um índice Kp maior que 3+ foram classificados como dias perturbados, todos os demais foram considerados calmos. A classificação dos dados deste estudo, de acordo com os critérios expostos, é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos dias de 2003 selecionados para análise, de acordo com a atividade magnética e com as estações do ano.

Condição Magnética	Meses	Dias
Calma	Novembro	19
	Dezembro	16, 17, 18, 19, 23, 26
	Janeiro	24, 25
	Março	24, 25
Perturbada	Dezembro	23, 24
	Fevereiro	19, 20

Para todos os dias com dados de digissonda analisados,

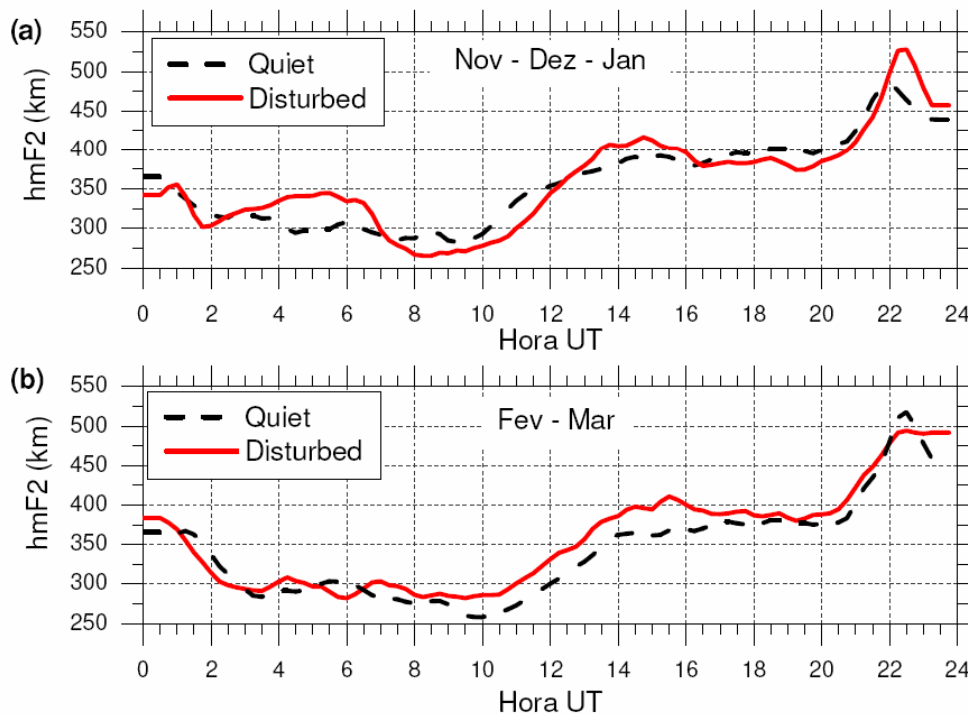


Figura 1 - Variação horária da altura real do pico da camada F2 para os meses de (a) novembro, dezembro e janeiro de 2003 e (b) fevereiro e março de 2003 sob condições calma (linha tracejada preta) e perturbada (linha cheia vermelha) obtidos pela análise dos dados de digissonda.

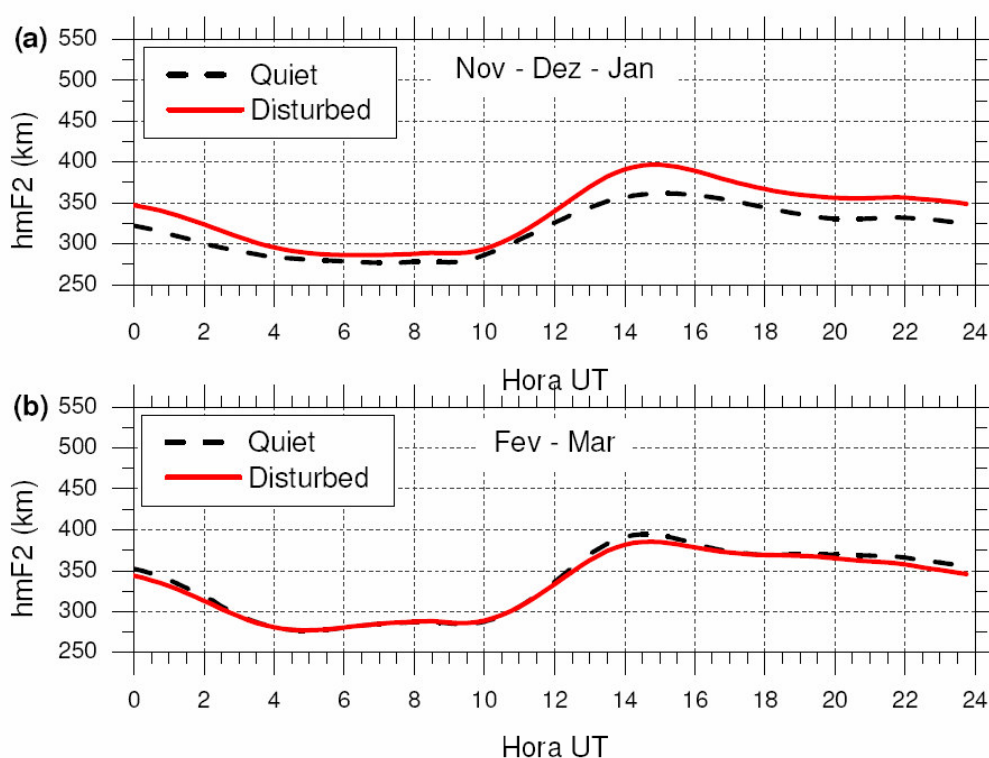


Figura 2 - Variação horária da altura real do pico da camada F2 (hmF2) para os meses de (a) novembro, dezembro e janeiro de 2003 e (b) fevereiro e março de 2003 sob condições calma (linha tracejada preta) e perturbada (linha cheia vermelha) previstos pelo modelo IRI.

foram realizadas simulações de perfis de densidade eletrônica com o modelo IRI, versão 2000-2005, disponível *on line* (Bilitza, 2001; Bilitza, 2005). O parâmetro obtido para fazer comparações foi a altura real do pico da camada F2 (hmF2).

Já as velocidades de deriva vertical ($\Delta h'F / \Delta t$), calculadas a partir dos dados da digissonda, foram obtidas pela seguinte relação (Abdu et al., 1981 e Bittencourt e Abdu, 1981):

$$V_z = \frac{\Delta h'F}{\Delta t} \quad (1)$$

onde $\Delta h'F$ é a variação da altura virtual da camada F e Δt é o intervalo de tempo decorrido entre duas sondagens sucessivas. É importante ressaltar que a deriva assim calculada só é representativa da deriva eletromagnética vertical do plasma ionosférico, nos horários próximos ao por do sol, quando a camada F se encontra em altitudes nas quais os efeitos de recombinação não são importantes.

Resultados Obtidos e Discussão

Os gráficos da figura 1 mostram a variação horária da altura real do pico da camada F2 para os períodos de solstício e equinócio sob condições calma e perturbada obtidos pela análise dos dados da digissonda. Para obtenção das variações horárias da altura real da camada F2 foi tomada a média aritmética simples entre as amostras de dias consecutivos correspondentes ao mesmo horário. Os dias utilizados podem ser encontrados na tabela 1.

Para efeito de comparação, os gráficos da figura 2 apresentam as variações horárias da altura real da camada F2 previstas pelo modelo ionosférico IRI. O processo de obtenção utilizado foi semelhante ao empregado para os dados da digissonda, ou seja, tomou-se a média aritmética simples entre as amostras de dias consecutivos correspondentes ao mesmo horário.

As variações da altura real da camada F2 obtidas pela digissonda e as previstas pelo modelo ionosférico IRI apresentam sensíveis diferenças entre os horários 18-23 horas UT. Estes resultados estão de acordo com

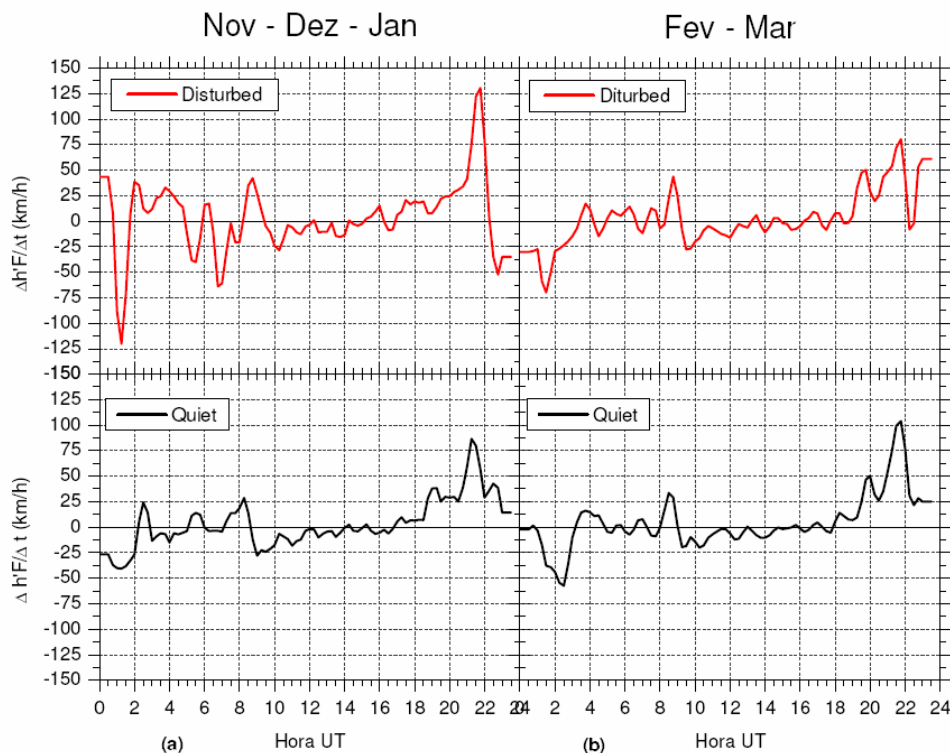


Figura 3 - Variação horária da velocidade de deriva vertical ($\Delta h'F/\Delta t$) obtida a partir dos dados de digissonda analisados para os períodos de (a) novembro, dezembro e janeiro e (b) fevereiro e março sob condições calma (linha preta) e perturbada (linha vermelha).

observações anteriores feitas na região brasileira (por exemplo Abdu et al., 2004; Batista e Abdu, 2004). Nesse horário pode-se verificar a presença do pico de pré-reversão nos dados da digissonda (figura 1). Mas o mesmo não está presente na previsão feita pelo modelo IRI (figura 2). Nos demais períodos do dia o modelo IRI apresenta uma previsão que se aproxima da condição natural encontrada na ionosfera e observada nos dados da digissonda.

Os gráficos da figura 3 mostram a variação horária da velocidade de deriva vertical ($\Delta h'F/\Delta t$) obtida a partir dos dados da digissonda analisados para os períodos de solstício e equinócio sob condições calma e perturbada.

Observando-se a variação horária da velocidade de deriva ($\Delta h'F/\Delta t$) pode-se verificar que as maiores velocidades de subida da camada F se encontram entre 20-22 horas UT, aumento este, que é conhecido como pico de pré-reversão da deriva vertical. Conforme já mencionado anteriormente, somente em torno destes horários a deriva vertical pode ser calculada como a variação temporal da altura da camada.

Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os resultados preliminares dos estudos da amplitude do pico de pré-reversão entre períodos magneticamente calmos e perturbados dos solstícios e equinócios do ano de 2003, observado em dados de digissonda sob o equador magnético.

De modo geral, o modelo ionosférico IRI não consegue prever a subida da camada F nos horários após o por do sol, observada em dados de digissonda nas localidades situadas sob o equador magnético. Porém, para os demais períodos do dia a previsão apresenta um nível de aproximação satisfatório.

Agradecimentos

C. P. S. e H. C. A. agradecem ao CNPq pelo financiamento da suas pesquisas através de bolsas de iniciação científica vinculadas aos processos ns. 104427/2004-3 e 107616/2003-3.

Referências Bibliográficas

- Abdu, M. A., Batista, I. S., Bittencourt, J. A.**, 1981, Some characteristics of spread F at magnetic equatorial station Fortaleza: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, n.A8, p6838-6842.
- Abdu, M. A., Batista, I. S., Reinisch, B. W., Carrasco, A. J.**, 2004, Equatorial F-layer heights, evening prereversal electric field, and night E-layer density in the American sector: IRI validation with observations: *Advances in Space Research*, Vol. 34, p1953-1965.
- Abdu, M. A.**, 1993. Equatorial spread F and ionosphere - thermosphere system: A review, *Geophysical Research Letters*, 2, 193-209.
- Batista, I. S.**, 1985, Dinamo da região F equatorial: Assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano, INPE, São José dos Campos, (INPE-3760(-TDL/206).
- Batista, I. S., Abdu, M. A.**, 2004, Ionospheric variability at Brazilian low and equatorial latitudes: comparison between observations and the IRI model, *Advances in Space Research*, Vol. 34, 1894-1900.
- Baker, W. G., Martyn, D. F.**, 1953, Electric currents in the ionosphere, I. The conductivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. A246, n. 913, p. 281-294.
- Bilitza, D.** International Reference Ionospheric Model - IRI. Disponível em:
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri_n.htm> Acesso em: Jan. 2005.
- Bittencourt, J. A., Abdu, M. A.**, 1981, Theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, n.A4, p2451-2454.
- Hargreaves, J. k.**, 1992, *The Solar-terrestrial Environment*: Cambridge University Press.
- Huang, X., Reinisch, B. W.**, 1996, Vertical electron density profiles from the digisonde network. *Advances in Space Research*, Vol. 18, n. 6, p.121-129.
- Kivelson, M. G., Russell, C. T.**, 1995, *Introduction to space physics*: Cambridge University Press.
- Reinisch, W. B., Bibl, K., Kitzrosser, D. F., Sales, G. S., Tang, J. S., Zhang, Z., Bullett, T. W., Ralls, J. A.**, 1989, The Digisonde 256 ionospheric sounder: *Wits Handbook*, Vol. 2, p350-380.

A3.1

XX CRICTE - CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e V FEIRA DE PROTÓTIPOS
de 05 a 07 de novembro de 2005 - Foz do Iguaçu - PR.

3.12.06.00-0

DETERMINAÇÃO DA EVOLUÇÃO DIÁRIA DO CAMPO ELÉTRICO DO ELETROJATO EQUATORIAL UTILIZANDO DADOS DE MAGNETÔMETROS

Henrique Carlotto Aveiro, LILIAN PIECHA MOOR, FAGNER CHAGAS ROTHER, CLEZIO
MARCOS DENARDINI, NELSON JORGE SCHUCH, MANGALATHAYIL ALI ABDU
aveiro@lacesm.ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria

Entre aproximadamente 70 a 2000 km de altitude, encontra-se a porção ionizada da atmosfera terrestre, denominada ionosfera. Dentre os mais diversos processos que ocorrem nesta faixa de alturas, podemos citar o dínamo atmosférico da Região E ionosférica, tendo seu principal motor nos gradientes de pressão devido ao aquecimento solar. Na sua porção equatorial, a geometria entre o campo geomagnético e os campos elétricos, devidos ao dínamo atmosférico, junto ao efeito combinado das condutividades elétricas, resultam em uma condutividade máxima em torno de 105 km originando a circulação de uma corrente elétrica horizontal, denominada eletrojato equatorial (EEJ). Ela flui de oeste para leste, no lado iluminado pelo sol, e de leste para oeste, do lado da noite, possuindo maior intensidade entre as 11 e 14 horas local. A presença desta corrente ao longo do equador geomagnético gera campos magnéticos induzidos que podem ser sentidos ao nível do solo, sobrepondo-se ao campo geomagnético. Para medir as diferentes componentes do campo geomagnético são utilizados magnetômetros. Estes equipamentos são, essencialmente, bobinas orientadas em direções específicas para registrar variações de campos magnéticos, em três direções distintas, de forma a compor o campo total. O efeito aproximado do campo magnético do EEJ sobre a componente horizontal (H) do campo geomagnético também pode ser investigado analisando-se a diferença entre as medidas desta componente obtidas por magnetômetros (ΔH). Para isso, é necessário que estes equipamentos estejam instalados em observatórios magnéticos adequadamente localizados. Um observatório deve estar localizado na região de influência do campo magnético do EEJ, como São Luís - MA, e o outro em uma latitude magnética próxima ao primeiro, mas fora da região de influência do EEJ, como em Eusébio - CE. Utilizando a diferença entre as medidas do campo entre estes dois observatórios, foi calculado ΔH . Este parâmetro serve como um instrumento avaliador do comportamento diário do efeito do EEJ ao nível de solo, uma vez que o campo elétrico deste possui relação direta com seu campo magnético induzido em solo. Neste trabalho são apresentados estudos do campo magnético induzido em solo devido ao EEJ, obtidos pela análise de dados de magnetômetros de dois observatórios magnéticos, e uma avaliação da excursão diária do traço do campo elétrico para períodos magneticamente calmos e perturbados.

A3.2

XX CRICTE - CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e V FEIRA DE PROTÓTIPOS
de 05 a 07 de novembro de 2005 - Foz do Iguaçu - PR.

3.12.06.00-0

REDUÇÃO DE RUÍDO AMOSTRAL DE DADOS OBSERVACIONAIS DE RADAR IONOSFÉRICO DE ESPALHAMENTO COERENTE UTILIZANDO FILTRO SAVITZKY- GOLAY

Henrique Carlotto Aveiro, LILIAN PIECHA MOOR, FAGNER CHAGAS ROTHER, CLEZIO
MARCOS DENARDINI, NELSON JORGE SCHUCH, MANGALATHAYIL ALI ABDU
aveiro@lacesm.ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria

Com o objetivo de estudar o eletrojato equatorial (EEJ) e irregularidades presentes na ionosfera equatorial, tais como bolhas de plasma, foi construído pela Divisão de Aeronomia da Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas, DAE/CEA/INPE - MCT, um radar de espalhamento coerente. Operando em 50 MHz, o radar detecta as irregularidades de plasma com escala de 3 metros de comprimento perpendiculares ao campo geomagnético. A análise espectral dos ecos recebidos das irregularidades do EEJ permite determinar o deslocamento Doppler e identificar os tipos de espectros que caracterizam as suas irregularidades. O Radar de Espalhamento Coerente de 50 MHz (RESCO) está instalado no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão -MA (2,33° S; 44,20° O). Neste sítio, o ângulo de inclinação do campo magnético terrestre é de 0,5 S. O radar é operado durante duas semanas a cada mês, de acordo com o Calendário Geofísico Internacional ou devido a necessidades emergentes. A análise da variação temporal do sinal recebido pelo radar RESCO mostra a presença de picos espúrios em meio aos dados devidos à presença de ruído aleatório na recepção do sinal retro-espalhado pelas irregularidades do EEJ. O constante desenvolvimento dos modernos sistemas de rádio sondagem proporciona uma melhor compreensão da fenomenologia dos eventos observados. Neste contexto, o grupo de pesquisa da Parceria INPE-UFSM sempre procura aprimorar as técnicas de observação e análise dos fenômenos, especialmente no que tange ao aprimoramento da resolução espacial e/ou temporal. Para este fim, desenvolveu-se uma rotina de *software* para corrigir o ruído durante o pré-processamento do sinal utilizando o filtro Savitzky-Golay. Esta ferramenta se encontra completamente integrada à biblioteca de rotinas do Radar RESCO e está sendo utilizada para as análises atuais. Neste trabalho, apresentamos estudos do retro-espalhamento de potência pelas irregularidades do EEJ utilizando dados do radar RESCO, bem como análise da redução de picos espúrios na amostragem do equipamento a partir da aplicação do filtro Savitzky-Golay.

A3.3

XX CRICTE - CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e V FEIRA DE PROTÓTIPOS
de 05 a 07 de novembro de 2005 - Foz do Iguaçu - PR

3.12.06.00-0

ANÁLISE DO TEMPO DE CONVERGÊNCIA DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

Henrique Carlotto Aveiro, LILIAN PIECHA MOOR, FAGNER CHAGAS ROTHER, CLEZIO MARCOS DENARDINI, NELSON JORGE SCHUCH, MANGALATHAYIL ALI ABDU
aveiro@lacesm.ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria

Desde 1998, tem sido operado no Observatório Espacial de São Luís (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5°), OESLZ/INPE - MCT, na região do equador geomagnético, um radar de retro-espalhamento de 50 MHz (RESCO) para estudar fenômenos da ionosfera equatorial, com especial interesse no eletrojato equatorial (EEJ). A análise espectral do eco recebido do EEJ nos permite identificar os dois tipos de irregularidades de plasma dominantes, observadas por radar no volume do eletrojato. Pelo estudo dos espectros de potência obtidos pela análise espectral dos ecos recebidos pelo radar, é possível obter as características das irregularidades de plasma que geraram estes ecos. Para tanto, é importante determinar-se com precisão o centro da distribuição de frequências, a largura e a potência espectral. A partir dos centros de distribuição de frequências é possível deduzir os deslocamentos Doppler das irregularidades em relação ao radar, o qual é relacionado aos campos elétricos que controlam as instabilidades de plasma. Um meio bastante usual para determinar parâmetros espectrais é através do ajuste de duas curvas gaussianas utilizando-se do método de Mínimos Erros Quadráticos para estimação de parâmetros. Neste trabalho foram simulados ecos de radar coerente para gerar espectros de potência contendo as características das irregularidades do EEJ. Estas simulações foram feitas baseadas em parâmetros conhecidos das irregularidades de plasma como velocidade de grupo e largura espectral. Foram considerados diferentes níveis para a razão sinal/ruído (SNR). Em seguida, o método de estimação de parâmetros pelo método de Mínimos Erros Quadráticos foi aplicado a cada espectro de potência, para que fosse ajustado o somatório de duas curvas gaussianas, representando as distribuições de potências que se observa nos espectros, devido à presença dos dois tipos de irregularidades de plasma no EEJ. A partir disso, foi determinada o tempo de convergência do método para que as curvas fossem bem ajustadas aos espectros. Além disso, comparamos as respostas entre os três diferentes valores de SNR. Neste trabalho são apresentados estudos da estimação de parâmetros utilizando o método de Mínimos Erros Quadráticos para o ajuste de curvas gaussianas a espectros de potência simulados de retro-espalhamento das irregularidades do EEJ. A análise do tempo de convergência do método para três diferentes valores de SNR é discutida, mostrando a dependência da convergência em relação à SNR aplicada aos dados simulados.

A3.4

XX CRICTE - CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA V FEIRA DE
PROTÓTIPOS de 05 a 07 de novembro de 2005 - Foz do Iguaçu - PR

3.12.06.00-0

ESTUDO DAS BOLHAS IONOSFÉRICAS UTILIZANDO A REDE GPS DE SATÉLITES

Lilian Piecha Moor, Eurico Rodrigues de Paula, Henrique Carlotto Aveiro, Maiquel dos
Santos Canabarro, Nelson Jorge Schuch, Clezio Marcos Denardini
lilian@lacesm.ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria

A ionosfera é a porção ionizada da atmosfera terrestre, situada entre aproximadamente 60 e 1000 km de altitude. Possui densidade eletrônica que depende de vários fatores, entre eles: posição geográfica, estação do ano, hora local e atividade solar cuja radiação varia com um ciclo de 11 anos e que é a principal fonte de ionização da atmosfera neutra. Também durante tempestades magnéticas devido a processos no Sol a densidade eletrônica da ionosfera apresenta variações. Devido as diferentes composições químicas, processos de ionização, densidade eletrônica e altura, a ionosfera é dividida em três regiões básicas: camadas D, E e F. Nas regiões E e F, devido a instabilidades da densidade eletrônica, podemos encontrar irregularidades no plasma, tais como: as irregularidades do eletrojato equatorial (Região E) e as bolhas de plasma (Região F). Estas últimas consistem em regiões de rarefação do plasma ionosférico, paralelas ao campo geomagnético e deslocando-se no sentido oeste-leste. Este fenômeno ocorre no período noturno e com mais frequência nas regiões equatoriais e de baixas latitudes. Estas irregularidades podem provocar interferências nos sinais de rádio, radares espaciais e sistemas de orientação de aviação e navegação. O grupo de pesquisadores do Observatório Espacial do Sul (OES), situado em São Martinho da Serra - RS, em cooperação com os pesquisadores da Divisão de Aeronomia (DAE) da Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) e com os pesquisadores da Universidade de Cornell, EUA, vêm desenvolvendo pesquisas baseadas no estudo dessas irregularidades através do monitoramento da cintilação da amplitude do sinal recebido via satélites GPS. Os dados são coletados diariamente por placas GEC *Plessey GPS Builder II*[®], capaz de rastrear simultaneamente até 11 satélites com uma taxa de 50 amostras por segundo. A aquisição dos dados é feita com o auxílio de um software desenvolvido exclusivamente para monitorar as cintilações ionosféricas durante irregularidades do plasma, denominado SCINTMON. Também são estudados os efeitos das irregularidades sobre a performance do próprio sistema GPS. Neste trabalho são apresentados estudos das bolhas de plasma ionosférico utilizando receptores GPS, bem como a análise de danos causados às telecomunicações. Ele visa proporcionar um melhor entendimento funcional da ionosfera, bem como acumular conhecimento para que sistemas/processos sejam desenvolvidos para amenizar tais problemas na transmissão de sinais.

A3.5

10) Henrique Carlotto Aveiro (CRSPE/INPE-MCT)

“Statistical Analysis of Geomagnetic Storm effects on the signatures of equatorial electrojet plasma irregularities”

Abstract:

A 50 MHz coherent back-scatter radar, also known by the anachronism RESCO, has been operated since 1998 at São Luis (2.33 S, 44.2 W, DIP: -0.5), on the dip equator to study the equatorial electrojet dynamics. Spectral analyses of the received echoes from equatorial electrojet (EEJ) irregularities allow us to identify the dominant type of plasma instabilities in the electrojet bulk. From the frequency distribution of the irregularities echoes power spectra, we are also able to deduce the Doppler shift caused by the irregularities drift in relation to the radar beam. Such drift is closely related to the electric fields that drive the plasma instabilities. Through the analysis of the spectrograms (each one corresponding to one range gate) in distributed periods, it has been possible to observe effects in the EEJ electric fields associated with possible prompt penetration (PP) electric fields. The PP electric fields show themselves as increases or decreases in the generation of 3-meter plasma irregularities, according to its polarity in relation to the EEJ electric fields. This paper shows a statistical study of RESCO spectrograms with increases/decreases of 3-meter EEJ irregularities generation associated with possible PP electric fields in geomagnetic disturbed days as well as the results of EEJ in quiet days. The methodology and the results are discussed and analyzed.

A3.6

SICINPE 2005 – ESTUDO DA ELETRODINÂMICA ELETROJATO EQUATORIAL BASEADO EM DADOS OBSERVACIONAIS DE RADARES COERENTES, IONOSSONDAS DIGITAIS E MAGNETÔMETROS¹.

Henrique Carlotto Aveiro², Mangalathayil Ali Abdu³,
Clezio Marcos Denardini⁴, Nelson Jorge Schuch⁵

Com o objetivo de estudar o eletrojato equatorial, a Divisão de Aeronomia da Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas, DAE/CEA/INPE – MCT, possui instalado um radar de espalhamento coerente operando em 50 MHz, RESCO, no Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/DAE/CEA/INPE – MCT, no Maranhão, com coordenadas geográficas 2,33° S e 44,20° O, e 0,5° de ângulo DIP. A análise espectral dos ecos recebidos pelo radar RESCO das irregularidades do eletrojato permite determinar o deslocamento Doppler em frequência e identificar os tipos de espectros que caracterizam as suas irregularidades. Visando à pesquisa do eletrojato equatorial com melhor resolução espacial e/ou temporal e permitindo maior confiabilidade nos dados e análises, o Grupo de Pesquisa Parceria INPE-UFSM busca o constante desenvolvimento e aprimoramento tecnológico dos equipamentos de pesquisa Geofísica. Desta forma, foi desenvolvido no software IDL[®] um programa para corrigir o ruído durante o pré-processamento dos dados do radar RESCO, denominado "Remove_Outliers.PRO", baseado no desvio padrão dos dados e na suavização pelos métodos de Média Móvel ou Savitzky-Golay, de acordo com a escolha do operador. Além disso, com os mesmos objetivos, foi feito o estudo estatístico da aplicação da técnica de integração incoerente aos espectros originados no pré-processamento dos dados, sendo analisadas as vantagens e desvantagens da sua aplicação. Neste trabalho são apresentados estudos do eletrojato equatorial utilizando dados observacionais do Radar RESCO, desenvolvidos no CRSPE/INPE - MCT, em Santa Maria, RS, bem como a comparação entre os métodos Savitzky-Golay e Média Móvel na remoção de picos espúrios e a aplicação da integração incoerente aos espectros; as duas técnicas visando o mesmo objetivo: a pesquisa do eletrojato equatorial.

1 - Trabalho desenvolvido no Laboratório de Sondagem Ionosférica, Média e Alta Atmosferas do CRSPE/INPE – MCT, em Parceria com o LACESM/CT – UFSM.

2 – Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM.

3 – Orientador: Pesquisador da Divisão de Aeronomia, DAE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP.

4 – Co-orientador: Pesquisador da Divisão de Aeronomia, DAE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP.

5 – Co-orientador: Pesquisador e Coordenador da Ação 1275 do PNAE – Implantação do CRSPE/INPE – MCT.

XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, 19, 20 e 21 de outubro de 2005.

A3.7

EQUIPAMENTOS DE SONDAGEM IONOSFÉRICA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL¹

Lilian Picha Moor², Eurico Rodrigues de Paula³, Henrique Carlotto Aveiro⁴, Maiquel S. Canabarro⁵, Nelson J. Schuch⁶, Clezio Marcos Denardini⁷

A ionosfera é uma região da atmosfera terrestre que está localizada entre aproximadamente 60 e 1000 km de altitude, caracterizada por apresentar uma alta densidade de íons e elétrons. Seu principal fator de ionização é a absorção da radiação solar. Mas também são fontes de ionização as partículas energéticas carregadas de origem solar e galácticas. O estudo da ionosfera é importante por diversos fatores, entre eles citamos o fato dela apresentar instabilidades de plasma as quais evoluem em irregularidades ionosféricas que, por sua vez, afetam as propagações transionosféricas. Os pesquisadores do Observatório Espacial do Sul (OES) do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRSPE), em São Martinho da Serra - RS, desenvolvem pesquisas sobre o comportamento e sobre os processos dinâmicos, eletrodinâmicos e químicos do plasma ionosférico na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), local onde se encontra a menor intensidade do campo magnético terrestre. No estudo dos diferentes processos nesta região são utilizados diferentes equipamentos de sondagem ionosférica com diferentes propósitos. Para estudo da absorção ionosférica pela região D são utilizados receptor de ondas eletromagnéticas de média frequência (MF, do inglês: *Medium Frequency*) e de alta frequência (HF, do inglês: *High Frequency*), conhecidos como Riômetro e Riômetro Imageador. O primeiro equipamento baseia-se na comparação do sinal captado com o sinal transmitido por uma rádio AM. A técnica de riometria busca analisar a variação da radiação cósmica incidente no solo visando determinar a densidade eletrônica da baixa ionosfera. Na pesquisa de bolhas de plasma são empregadas duas estações do Sistema Monitor de Cintilação Ionosférica GEC Plessey. Este sistema consiste, entre outras coisas, de duas antenas que monitoram continuamente o sinal de frequência de 1.57542 GHz (também conhecida como L1), a mais baixa das frequências transmitidas pelos satélites GPS. A partir da cintilação do sinal recebido pode ser determinada a presença de irregularidades de plasma. Nesse trabalho são apresentados alguns equipamentos de estudo da ionosfera instalados no OES/CRSPE/INPE - MCT, com foco no estudo das irregularidades ionosféricas. Este estudo procura agregar conhecimento para esclarecer os mecanismos de geração e desenvolvimento desses fenômenos na ionosfera na AMAS, para assim explicar a forte influência dessas irregularidades nos sistemas de telecomunicações com aplicações espaciais.

1 - Trabalho desenvolvido no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE e LACESM/CT - UFSM

2 - Apresentadora: Acadêmica do Curso de Física – CCNE/UFSM

3 - Orientador: Dr. Eurico Rodrigues de Paula – DAE/CEA/INPE – MCT

4 - Co-Autor: Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica – CT/UFSM


5 - Co-Autor: Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica – CT/UFSM

6 - Co-Orientador: Dr. Nelson Jorge Schuch Coordenador das Ações 1275 e 6237 do PNAE – e Instalação e Funcionamento do CRSPE/INPE - MCT

7 - Co-Orientador: Dr. Clezio Marcos De Nardini – DAE/CEA/INPE - MCT

XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, 19, 20 e 21 de outubro de 2005.

A3.8



11th Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium including CAVSES
Sun, Space Physics and Climate
6-10 March 2006, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Search:

Home > Poster Papers

Monday and Tuesday

COMPARATIVE STUDIES OF EQUATORIAL ELECTROJET USING BACK-SCATTER RADAR AND MAGNETOMETER DATA

H. C. Aveiro^(1,2), C. M. Denardini⁽³⁾, M. A. Abdu⁽³⁾, N. J. Schuch⁽¹⁾

(1) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil

(2) Universidade Federal de Santa Maria, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil

(3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, PO 515 - S. J. Campos, SP, Brazil

Corresponding author: aveiro@lacsma.ufsm.br

Abstract

A 50 MHz coherent back-scatter radar, also known by the anachronism RESCO, has been operated since 1998 at São Luís Space Observatory (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5) near the dip equator to study the equatorial electrojet dynamics. Spectral analyses of the received echoes from equatorial electrojet irregularities allow us to identify the dominant type of plasma instabilities in the electrojet. From the frequency distribution of the irregularities echoes power spectra; we are also able to deduce the Doppler shift caused by the irregularities drift in relation to the radar beam. Such drift is closely related to the electric fields that drives the plasma instabilities. In order to make our proposed comparative study we use magnetometers data from the same observatory and from the magnetometers installed in Eusébio (3.89° S, 38.4° W, DIP: -12.5). To study the electrojet using magnetometers we have select magnetically quiet days ensuring that the diurnal variation were caused mainly by the electrojet and Sq current system. We have calculated the difference (ΔH) of the H-magnetic component variations at the two closely magnetic stations to remove Sq current system effects. Once São Luís is located on a region of electrojet influence and Eusébio is located outside the electrojet region, the resultant difference is supposed to have the electrojet influence only. In this paper, we analyzed the agreement between the ΔH and the power back-scattered by the equatorial electrojet irregularities obtained from the RESCO radar. We also present and discuss these two observational techniques focusing the equatorial electrojet during magnetically quiet days. Some disturbed days data analysis is also commented.

A3.9

ANALYSIS OF METEORS PRECIPITATION USING IONOSPHERIC BACK-SCATTER RADAR

H. C. Aveiro^(1,2), L. P. Moor^(1,2), C. M. Denardini⁽³⁾, M. A. Abdu⁽³⁾, N. J. Schuch⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil*

⁽²⁾ *Universidade Federal de Santa Maria, ZIP 97.105-900 - Sta. Maria, RS, Brazil*

⁽³⁾ *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, PO 515 - S. J. Campos, SP, Brazil*

Corresponding author: aveiro@lagesm.ufsm.br

Abstract

A 50 MHz coherent back-scatter radar, also known by the anachronism RESCO, has been operated since 1998 at São Luis Space Observatory (2.33° S, 44.2° W, DIP: -0.5) near the dip equator. The main purpose of RESCO is to study the equatorial electrojet dynamics through spectral analyses of the received echoes that allow us to identify the dominant type of plasma instabilities and its drift speed in the electrojet. Using the RESCO radar we are also able to collect data from reflection of the transmitted signal caused by meteor trail, generally observed at about 100 km of altitude. The energy received in the reflection process is higher than that expected by the back-scatter in the equatorial electrojet irregularities. So, even during the presence of plasma irregularities it is possible to observe echoes from meteor trail. To characterize the presence of meteor reflection over the equatorial electrojet plasma irregularities data, it was developed a methodology of detection of “meteor” echoes due to reflection in meteor trail. In this paper, we analyze the presence of meteors deduced from the presence of their echoes in the equatorial electrojet heights and discuss the methodology of meteors detection in the 50 MHz coherent back-scatter radar data.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN JUAN


Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Observatorio Astronómico "Félix Aguilar"

A4.1

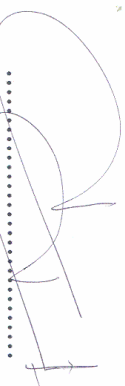
Por cuanto Enrique Carlotta Aveiro PASS: CS250156 se le otorga el presente **CERTIFICADO** por haber **ASISTIDO** al curso perfeccionamiento titulado "**TERCERA ESCUELA DE FÍSICA SOLAR EL LEONCITO**", realizado en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y en la "Estación Astronómica Carlos U. Cesco" El Leoncio-San Juan-Argentina, dependiente del Observatorio Astronómico "Félix Aguilar", entre los días 28 de Noviembre y 05 de Diciembre de 2005 con un crédito horario de **sesenta horas presenciales**, en un todo de acuerdo con las reglamentaciones vigentes.

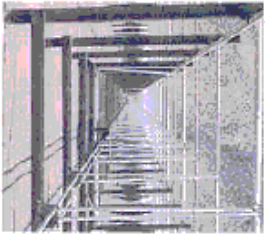
San Juan, 5 de Diciembre de 2005.


.....
Dr. José I. Castro
Docente Responsable


.....
Prof. Dr. Rainer Schwenn
Director del Curso

Resol: 70/2005
CD - FCEF - UNSJ


.....
Mag. Ing. Jorge Sisterna
Decano F.C.E.F.N.



JICAMARCA
escuela de
2^{da}
radares
- 2006 -

Radio Observatorio de
JICAMARCA
Radio Observatory

Granted to:





Henrique Carlotta Azeira

for successful completion of 80 hours of courses given
at the Second Jicamarca School of Radar, 2006.

Jicamarca, March 31st - 2006

Jürgen Rötger
Dr. Jürgen Rötger
Max Planck Institut

M.S.
Dr. Martín Safrango
Jicamarca Radio Observatory

A4.3

