



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA  
EQUATORIAL BASEADO EM DADOS DE RADARES  
COERENTES E ÍNDICES DE ATIVIDADES MAGNÉTICAS**

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

**PARTES I - II**

**PROCESSO Nº 018744/2007-9**

**Cézar Augusto Daroit** (CRS/CIE/INPE - MCT, Bolsista PIBIC/INPE –  
CNPq/MCT – Março - Julho 2007)

E-mail: [cezar@lacesm.ufsm.br](mailto:cezar@lacesm.ufsm.br)

**Henrique Carlotto Aveiro** (CRS/CIE/INPE - MCT, Bolsista  
Agosto 2006 - Fevereiro 2007)

E-mail: [aveiro@dae.inpe.br](mailto:aveiro@dae.inpe.br)

Dr. Mangalathayil Ali Abdu (Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT,)

E-mail: [maabdu@dae.inpe.br](mailto:maabdu@dae.inpe.br)

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-Orientador - CRS/CIE/INPE – MCT)

E-mail: [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Co-Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: [denardin@dae.inpe.br](mailto:denardin@dae.inpe.br)

**Santa Maria, julho de 2007**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **PARTE I**

# **ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL BASEADO EM DADOS DE RADARES COERENTES E ÍNDICES DE ATIVIDADES MAGNÉTICAS**

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

**PROCESSO Nº 018744/2007-9**

Cézar Augusto Daroit (CRS/CIE/INPE - MCT, Bolsista PIBIC/INPE –  
CNPq/MCT – Março - Julho 2007)

E-mail: [cezar@lacesm.ufsm.br](mailto:cezar@lacesm.ufsm.br)

Dr. Mangalathayil Ali Abdu (Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: [maabdu@dae.inpe.br](mailto:maabdu@dae.inpe.br)

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-Orientador - CRS/CIE/INPE – MCT)

E-mail: [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Co-Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: [denardin@dae.inpe.br](mailto:denardin@dae.inpe.br)

**Santa Maria, julho de 2007**

## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

### Bolsista:

César Augusto Daroit

Acadêmico de Engenharia Elétrica – UFSM

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

### 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.

### Colaboradores:

Dr. Clezio Marcos De Nardin - Pesquisador Adjunto - DAE/CEA/INPE - MCT

Dr. Nelson Jorge Schuch – Pesquisador Titular do Centro Regional Sul de  
Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE - MCT

Henrique Carlotto Aveiro - Mestrando do Curso de Geofísica Espacial –  
INPE/MCT

Thiago Jaskulski - Acadêmico de Engenharia Elétrica - UFSM

Lílian Piecha Moor - Acadêmica do Curso de Física - UFSM

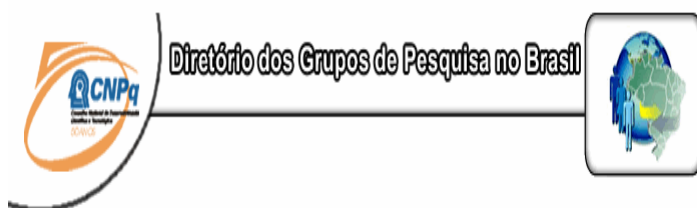
Juliano Moro - Acadêmico do Curso de Física - UFSM

### Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Sondagem Ionosférica - LSI/CRS/CIE/INPE - MCT

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

Observatório Espacial de São Luís - OESLZ/DAE/CEA/INPE - MCT



Estudante  
**Cézar Augusto Daroit**



[Link para Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#)

[Indicadores de produção C, T & A](#)

#### Dados gerais

##### Identificação do estudante

Nome: Cézar Augusto Daroit

Nível de treinamento: Não informado

Currículo Lattes: 25/04/2007 10:04

E-mail: [cezar@lancesm.com.br](mailto:cezar@lancesm.com.br)

Homepage:

##### Grupos de pesquisa que atua na instituição

[Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

##### Linhas de pesquisa que atua

[AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)

##### Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição

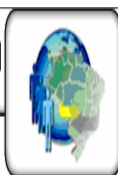
[Manqalathavil Ali Abdu](#)

#### Indicadores de produção C, T & A dos anos de 1998 a 2001

Tipo de produção	2001	2002	2003	2004
Produção bibliográfica	0	0	0	0
Produção técnica	0	0	0	0
Produção artística/cultural e demais trabalhos	0	0	0	0
Orientação concluída	0	0	0	0



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Grupo de Pesquisa

Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br



<a href="#">Identificação</a>	<a href="#">Recursos Humanos</a>	<a href="#">Linhas de Pesquisa</a>	<a href="#">Indicadores do Grupo</a>
-------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

#### Identificação

##### Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 18/06/2007 11:07

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - [nelson.schuch@pq.cnpq.br](mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br)

Ademar Michels - [michels@ct.ufsm.br](mailto:michels@ct.ufsm.br)

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

##### Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

E-mail: [njschuch@lancesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lancesm.ufsm.br)

Home page: <http://>

##### Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo de Pesquisa - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS: INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE (CEA, ETE, CPA), CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OVION, DPO/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, os mecanismos de geração de energia no Sol, o Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra. Pesquisas teóricas e observacionais utilizando-se de larga base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, bem como de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babuluu Trivedi, Marcel Barellos da Rosa, Ademar Michels

**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE–MCT**  
**Relatório Final de Atividades, 2007**

Recursos humanos	
<b>Pesquisadores</b>	<b>Total: 26</b>
<a href="#">Ademar Michels</a>	<a href="#">Jean Carlo Santos</a>
<a href="#">Alan Prestes</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a>
<a href="#">Alicia Luisa Cilia de Gonzalez</a>	<a href="#">Joao Paulo Minussi</a>
<a href="#">Alisson Dal Lago</a>	<a href="#">Mangalathayil Aji Abdu</a>
<a href="#">Barclay Robert Clemesha</a>	<a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a>
<a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a>	<a href="#">Nalin Babulal Trivedi</a>
<a href="#">Cristiano Max Wrasse</a>	<a href="#">Nataanael Rodrigues Gomes</a>
<a href="#">Delano Gobbi</a>	<a href="#">Nelson Jorge Schuch</a>
<a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a>	<a href="#">Osmar Pinto Junior</a>
<a href="#">Ezequiel Echer</a>	<a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a>
<a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a>	<a href="#">Polinaya Muralikrishna</a>
<a href="#">Fernando Luis Guarnieri</a>	<a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a>
<a href="#">Hisao Takahashi</a>	<a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>
<b>Estudantes</b>	<b>Total: 25</b>
<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Marcelo dos Santos Zastawny</a>
<a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>
<a href="#">Cézar Augusto Darot</a>	<a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a>
<a href="#">Cleomar Pereira da Silva</a>	<a href="#">Micael da Silva Bacellar</a>
<a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>
<a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>	<a href="#">Pablo Fernando Carlesso</a>
<a href="#">Fagner Chagas Rother</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>
<a href="#">Jean Carlos Darot</a>	<a href="#">Rodrigo Gerlach Silva</a>
<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Samuel Martins da Silva</a>
<a href="#">Josemar de Siqueira</a>	<a href="#">Sandro Fettermann Bertagnoli</a>
<a href="#">Juliano Moro</a>	<a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>
<a href="#">Lilian Piecha Moor</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>
<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>	
<b>Técnicos</b>	<b>Total: 4</b>
Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica	
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação	
Kotli Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas	
Roben Castagna Lunardi - Graduação - Técnico em Computação	

**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE–MCT**  
**Relatório Final de Atividades, 2007**

Estudantes		Total: 25
<a href="#">Carlos Roberto Braga</a>	<a href="#">Marcelo dos Santos Zastawny</a>	
<a href="#">Cassio Espindola Antunes</a>	<a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a>	
<a href="#">Cézar Augusto Daroit</a>	<a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a>	
<a href="#">Cleomar Pereira da Silva</a>	<a href="#">Micael da Silva Bacellar</a>	
<a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a>	<a href="#">Nikolas Kemmerich</a>	
<a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a>	<a href="#">Pablo Fernando Carlesso</a>	
<a href="#">Fagner Chagas Rother</a>	<a href="#">Rafael Lopes Costa</a>	
<a href="#">Jean Carlos Daroit</a>	<a href="#">Rodrigo Gerlach Silva</a>	
<a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Samuel Martins da Silva</a>	
<a href="#">Josemar de Siqueira</a>	<a href="#">Sandro Fettermann Bertagnoli</a>	
<a href="#">Juliano Moro</a>	<a href="#">Silvano Lucas Prochnow</a>	
<a href="#">Lilian Piecha Moor</a>	<a href="#">Tiago Jaskulski</a>	
<a href="#">Lucas Lopes Costa</a>		
Técnicos		Total: 4
Anderson Pereira Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica		
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação		
Koiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas		
Roben Castagna Lunardi - Graduação - Técnico em Computação		
Linhas de pesquisa		Total: 4
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <a href="#">AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA</a></li> <li>• <a href="#">MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO</a></li> <li>• <a href="#">MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL</a></li> <li>• <a href="#">NANOSATC-BR</a></li> </ul>		
Empresas associadas ao grupo		Total: 0
Indicadores de recursos humanos do grupo		
Integrantes do grupo		Total
Pesquisador(es)		26
Estudante(s)		25
Técnico(s)		4

	<b>Directorio dos Grupos de Pesquisa no Brasil</b>	
<p>Linha de Pesquisa <b>AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA</b></p>		
<b>Linha de pesquisa</b>		
<b>AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA</b>		
<b>Nome do grupo:</b> <u>Clima Espacial, Magnetosferas, Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br</u>		
<b>Palavras-chave:</b> Aeronomia/Aeroluminescência-Fotômetros/Imageadores; Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS; Eletrojato Equatorial; Interações Sol - Terra; Ionosfera - Digissonda - Radares; Mesosfera - Radares - Rastros Meteoróicos;		
<b>Pesquisadores:</b>		
<a href="#">Barclay Robert Clemesha</a> <a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a> <a href="#">Cristiano Max Wrasse</a> <a href="#">Delano Gobbi</a> <a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a> <a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a> <a href="#">Hisao Takahashi</a> <a href="#">Jean Pierre Raulin</a> <a href="#">Manjalathavil Ali Abdu</a> <a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a> <a href="#">Nelson Jorge Schuch</a> <a href="#">Polinava Muralikrishna</a>		
<b>Estudantes:</b>		
<a href="#">Cézar Augusto Darot</a> <a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a> <a href="#">Eduardo Ceretta Dalla Favera</a> <a href="#">Juliano Moro</a> <a href="#">Lilian Piecha Moor</a> <a href="#">Mateus Sabadi Schuh</a> <a href="#">Pablo Fernando Carlesso</a>		
<b>Árvore do conhecimento:</b>		
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Aeronomia; Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Interações Sol - Terra; Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;		
<b>Setores de aplicação:</b>		
Aeronáutica e espaço		
<b>Objetivo:</b>		
Aeronomia dos fenômenos físicos, químicos e dinâmica da Atmosfera observando com radares, imageadores, fotômetros e aeroluminescência (perfis de ventos) das ondas atmosféricas: planetárias, de gravidade e marés atmosféricas; Pesquisas com radares e digissonda da dinâmica da Troposfera, Estratosfera, Ionosfera e Alta Atmosfera, investigando o acoplamento vertical e transporte de energia do Sistema Atmosfera-Ionosfera na Região Sul Brasileira. Vice-Líder: Marcelo Barcellos da Rosa.		



*“Uma vida não questionada não merece ser vivida”*  
(Platão)

*A meus pais,  
JOSÉ CARLOS DAROIT e  
MATILDA MARTINS PINTO DAROIT.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de 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 Coordenador do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT pela oportunidade de estar em contato com o mundo científico.

Ao meu 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 durante este trabalho.

Em especial aos Pesquisadores Dr. Clezio Marcos De Nardin, Pesquisador Adjunto do DAE/CEA/INPE - MCT, em São José dos Campos, SP, pelo apoio e idéias compartilhadas, e ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria, pela leitura e pelas conversas sobre a vida.

Ao aluno Tiago Jaskulski, estudante do curso de Engenharia Elétrica, Lílian Piecha Moor e Juliano Moro, estudantes do Curso de Física da Universidade Federal de Santa Maria no âmbito da Parceria INPE-UFSM e ao Aluno Henrique Carlotto Aveiro, mestrando do Curso de Geofísica Espacial, INPE, pela amizade, discussões e sugestões para este Relatório.

Por fim, aos meus pais, José Carlos Daroit e Matilda Martins Pinto Daroit, e meu irmão, Jean Carlos Daroit, pelo apoio, ensinamentos, consolo e principalmente o amor que sempre ofereceram.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>O SOL E SUAS INFLUÊNCIAS INTERPLANETÁRIAS .....</b>	<b>16</b>
2.1 – O SOL .....	16
2.1.1 – ESTRUTURA SOLAR.....	17
2.2 – MANCHAS SOLARES.....	18
2.3 – VENTO SOLAR E MAGNETOSFERA.....	19
2.4 – ATIVIDADE SOLAR E OS EFEITOS GEOMAGNÉTICOS.....	20
2.4.1 – TEMPESTADE MAGNÉTICA.....	21
2.4.2 – ÍNDICES DE ATIVIDADE MAGNÉTICA .....	22
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>A IONOSFERA TERRESTRE .....</b>	<b>24</b>
3.1 – IONOSFERA TERRESTRE .....	24
3.2 – FORMAÇÃO DA IONOSFERA.....	25
3.2.1 – PRODUÇÃO IÔNICA .....	25
3.2.2 – PERDA DE IONIZAÇÃO.....	26
3.3 – REGIÕES IONOSFÉRICAS.....	27
3.3.1 – REGIÃO D .....	27
3.3.2 – REGIÃO E.....	28
3.3.3 – REGIÃO F.....	28
3.3.3.1 – CAMADA F <sub>1</sub> .....	28
3.3.3.2 – CAMADA F <sub>2</sub> .....	29
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>O RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE (RESCO).....</b>	<b>30</b>
4.1 – CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO RADAR RESCO .....	30
4.2 – O SISTEMA DO RADAR RESCO .....	30
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>AS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM SANTA MARIA, RS, .....</b>	<b>34</b>
<b>PARCERIA INPE - UFSM NO PROGRAMA PIBIC / INPE – CNPQ / MCT .....</b>	<b>34</b>
5.1 – REVISÃO TEÓRICA .....	34
5.2 - VISITA TÉCNICO CIENTÍFICA AO INPE / S. J. CAMPOS.....	34
5.3 – MONITORAMENTO DOS ÍNDICES MAGNÉTICOS .....	35
5.3.1 – ARQUIVAMENTO DE DADOS.....	35
5.4 – COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES MAGNÉTICOS EM PERÍODOS MAGNETICAMENTE CALMOS E PERTURBADOS.....	35
5.4.1 – PERÍODO MAGNETICAMENTE PERTURBADO PARA O ANO DE 2002.....	36
5.4.2 – PERÍODO MAGNETICAMENTE CALMO PARA O ANO DE 2002 .....	39

**CAPÍTULO 6**

<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Estrutura do interior solar e atmosfera.....18
2.2	Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma..... através do vento solar e a formação da magnetopausa.....20
2.3	Variação do número de manchas solares (sunspots) de janeiro de 94 a janeiro.. de 2008.....21
2.4	Fases de uma tempestade magnética.....22
2.5	Variação do índice Dst para o mês de março, 2007.....23
3.1	Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.....24
3.2	A localização das três camadas ionosféricas.....27
4.1	Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde se localiza o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.....31
4.2	Sinal de onda senoidal sendo modulado por uma onda quadrada pulsada.....32
4.3	Esquematização do Sistema de Recepção do radar RESCO.....33
5.1	Variação do índice Dst para o período de 23 a 24 de maio de 2002.....37
5.2	Índice Kp para o período de 23 a 24 de maio de 2002.....38
5.3	Índices AU (parte superior) e AL (parte central) para os dias 23 e 24 do mês .. de maio de 2002, onde pode ser notada a presença de um evento que ocorre.... entorno das 11 horas e se estende até as 19 horas.....39
5.4	Variação do índice Dst para o período de 16 a 17 de março de 2002.....40
5.5	Índice Kp para o período de 16 a 17 de março de 2002.....41
5.6	Índices AU (parte superior) e AL (parte central) para os dias 16 e 17 do mês.... de março de 2002.....41

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Neste Relatório apresentamos as atividades relativas ao Projeto Estudo da Eletrodinâmica da Ionosfera Equatorial Baseado em Dados de Radares Coerentes, desenvolvidas no período de março de 2007 a julho de 2007, pelo aluno César Augusto Daroit, bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCT.

Neste 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, CRS/CIE/INPE – MCT, desenvolveu atividades de estudo teórico das relações Sol-Terra, Ionosfera e sobre o Radar de Espalhamento Coerente (RESCO). Assim como, arquivou dados dos Índices Magnéticos Dst, Kp e AE, para o estudo dos períodos magneticamente perturbados e períodos magneticamente calmos para o ano de 2002.

Apresentaremos no Capítulo 2 uma descrição teórica sobre a interação Sol-Terra, bem como característica do Sol. O Capítulo 3 especifica e descreve as características da Ionosfera Terrestre. O Capítulo 4 descreve o Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz de São Luís do Maranhão (RESCO). O Capítulo 5 é dedicado à apresentação das atividades de pesquisa desenvolvidas pelo bolsista. Por fim, no Capítulo 6, apresentamos as conclusões relativas às atividades relacionadas no período de vigência da bolsa.

## CAPÍTULO 2

### O SOL E SUAS INFLUÊNCIAS INTERPLANETÁRIAS

Na região interplanetária que é compreendida entre o Sol e o Meio Interestelar ocorrem inúmeros fenômenos físicos, os quais têm como principal causador o Sol e sua atividade cíclica de 11 anos. Os processos que ocorrem no interior do Sol, envolvem instabilidades de plasma e campos magnéticos, resultando em manchas solares e muitas outras precipitações, onde esses acontecimentos estão intimamente relacionados a fenômenos geomagnéticos.

#### 2.1 – O Sol

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. Basicamente, é uma enorme esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termo-nucleares. A tabela 2.1 mostra algumas características químicas do Sol.

Tabela 2.1 – Características Químicas camadas Externas\* do Sol.

\*( Fotosfera e pouco abaixo)

0,2% de elementos pesados
7,8% de hélio
92% de hidrogênio

Fonte: Universidade de São Paulo (USP), 2007.

A maior parte da energia radiante do Sol está concentrada nas partes do espectro conhecidas como visível e próximo do visível. A radiação no comprimento do visível corresponde a 43% do total de energia emitido, 49% estão na faixa do infravermelho e 7% na banda do ultravioleta. Menos de 1% da radiação solar é emitida como Raios-x e Raios gama.



### **2.1.1 – Estrutura Solar**

O Sol é formado por uma parte interna e pela sua atmosfera. Seu interior possui um núcleo radioativo que se acredita estender até 0,25 raios solares onde a energia é gerada através da reação de fusão nuclear. Possui uma zona radioativa que se estende no intervalo de 0,25 a 0,75 raios solares, onde a energia gerada pelo núcleo é dissipada através do processo de difusão radiativa, está a uma temperatura da ordem de  $8 \times 10^6$  K. Por fim, possui uma zona de convecção, estendendo-se no intervalo de 0,75 a 1 raio Solar, com temperatura no intervalo de  $5 \times 10^5$  a 6600 K, onde a energia é dissipada sob a forma de convecção.

Sua atmosfera, em função de seus processos físicos é dividida em 3 regiões. A mais interna é a Fotosfera, uma camada visível a olho nu, tem a aparência de uma superfície em ebulição, cheia de bolhas, ou grânulos. Este fenômeno é chamado de granulação fotosférica. Tem espessura em torno de  $0,5 \times 10^6$  m, e temperatura de 6600 K. A parte intermediária é a Cromosfera, a qual pode ser observada quando ocorrem eclipses totais que encobrem a luz fotosférica, com espessura em torno de  $2,5 \times 10^6$  m e temperatura no intervalo de 4300 a  $10^6$  K. As protuberâncias solares que se elevam da cromosfera para a coroa são visíveis sem instrumentos durante os eclipses solares totais podendo ser eruptivas, de rápida duração, ou podem durar várias rotações solares. A Coroa é a parte mais externa da atmosfera solar e a região mais importante com relação aos fenômenos físicos do Meio Interplanetário, pois através da “evaporação” de seu material, constitui o Vento Solar, que arrasta o Campo Magnético Solar através do Meio Interplanetário.

A figura 2.1 mostra a estrutura solar e a posição de cada um de seus componentes, internos e atmosféricos.

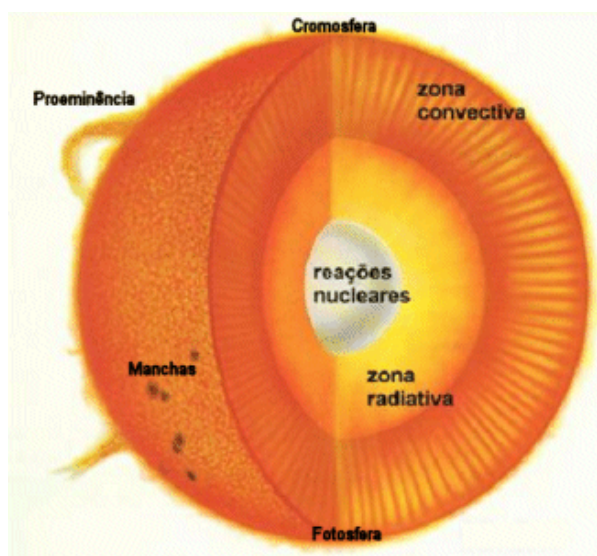


Fig. 2.1 – Estrutura do interior solar e atmosfera.

Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2007.

## 2.2 – Manchas Solares

Manchas solares são regiões mais frias e mais escuras localizadas na fotosfera solar, estas emitem menos energia do que a fotosfera, pois possuem um campo magnético muito intenso que bloqueia parcialmente o movimento de convecção realizado pelo Sol. Contudo, devido ao campo magnético ser vertical e, normalmente, aberto é pelas manchas solares que ocorre o escape de grande quantidade de material fotosférico.

A estrutura das manchas solares pode ser dividida em: Umbra, é a região central e mais escura da mancha, com temperatura de cerca de 4100 K, e Penumbra, é a região mais acinzentada que envolve a umbra, possui filamentos radiais claros e escuros, mas apenas cerca de 50% das manchas solares desenvolvem uma penumbra. O campo magnético é quase vertical na umbra, e mais horizontal nas penumbras. A polaridade magnética de uma mancha pode ser norte ou sul. Manchas complexas podem apresentar uma mistura das duas polaridades, o que pode ser entendido como a fusão de manchas menores. O número de manchas solares, também conhecido como número de manchas solares de Zurich, é definido como:

$$Rz = k(10g + f) \quad (2.1)$$

onde  $Rz$  é o número de manchas solares,  $k$  é uma constante de normalização para um observador particular,  $g$  é o número de grupos de manchas solares e  $f$  é o número de manchas solares individuais visíveis sobre o disco solar. Esta formulação foi primeiro utilizada por Johann Rudolph Wolf. O fator de correção  $k$  é usado para compensar diferenças em observações, causadas por variações nos tamanhos dos telescópios, condições atmosféricas e erros experimentais. Ou seja,  $k$  é um fator de peso para que o valor obtido de cada uma das medidas feitas ao longo do mundo seja ponderado, levando em consideração, entre outras variáveis, o tipo de instrumento utilizado.

### **2.3 – Vento Solar e Magnetosfera**

O vento solar é a emissão contínua de partículas como prótons, elétrons e uma pequena fração de hélio e alguns outros íons pesados proveniente da Coroa Solar. Medidas próximas da Terra revelam que a velocidade das partículas pode chegar a velocidades supersônicas, girando em torno de 400 a 500 km/s. Estas emissões de plasma ocorrem continuamente, distorcendo o campo magnético terrestre em uma cavidade denominada magnetosfera, que responde prontamente as emissões solares, ver figura 2.2.

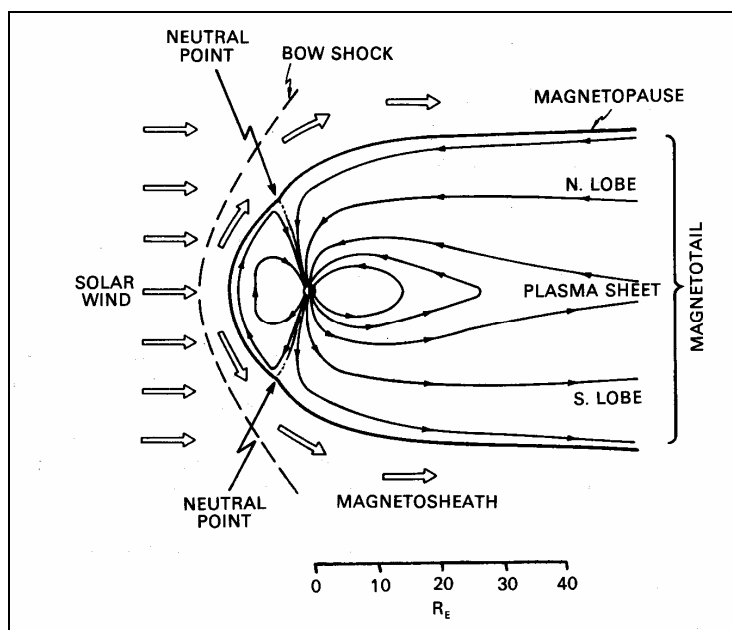


Fig. 2.2 – Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma através do vento solar e a formação da magnetopausa.  
Fonte: Hargreaves, 1995.

#### 2.4 – Atividade Solar e os Efeitos Geomagnéticos

A atividade solar varia, principalmente, com um período de 11 anos, e como consequência, as estruturas do Meio Interplanetário e o Campo Magnético Interplanetário também tendem a seguir este padrão. O ciclo solar de 11 anos pode ser medido pelo número de manchas solares e é dividido em quatro fases: fase de mínimo solar, fase ascendente, fase de máximo solar, e fase descendente. A figura 2.3 mostra um gráfico referente ao ciclo solar obtido pela sua relação com o número de manchas solares. Neste gráfico os pontos pretos, juntamente com as linhas pretas, representam o número de manchas calculado, a linha azul representa a interpolação das linhas que ligam os pontos pretos e o pontilhado vermelho representa as perspectivas para a variação das manchas solares para os próximos anos.

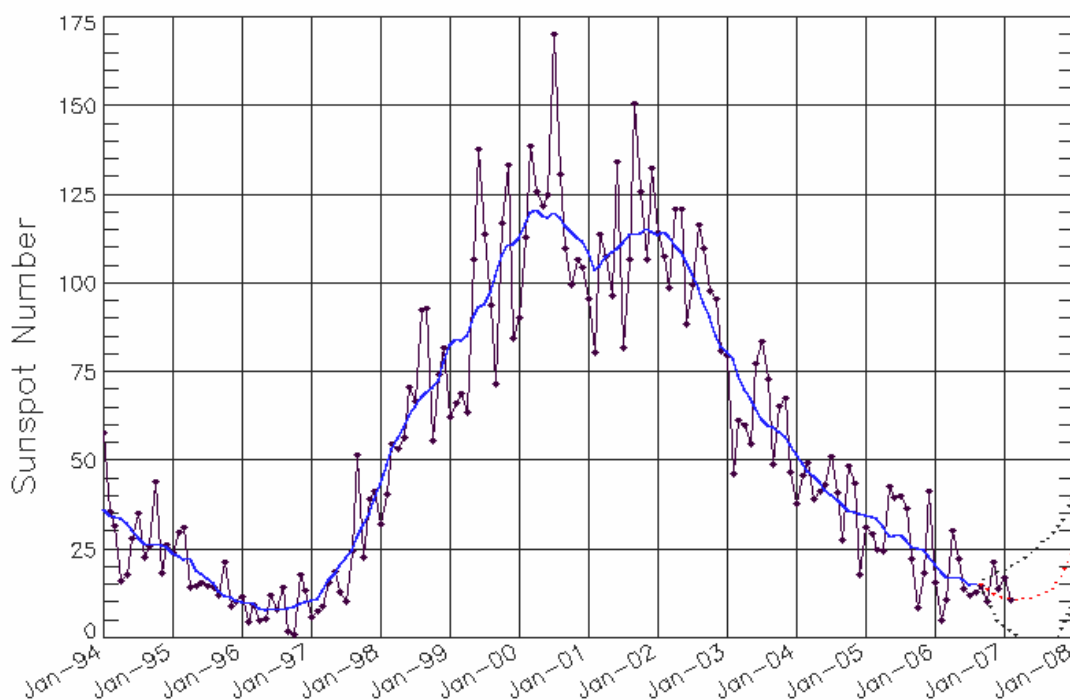


Fig. 2.3 – Variação do número de manchas solares (*sunspots*) de janeiro de 94 a janeiro de 2008.

Fonte: NASA, 2007.

#### 2.4.1 – Tempestade Magnética

As Tempestades Magnéticas são causadas por fenômenos solares que emitem grande quantidade de partículas e/ou radiação no espaço. Na Terra, as tempestades provocam uma compressão do campo magnético, seguida por uma redução na intensidade no campo frontal.

Uma tempestade magnética caracteriza-se por três fases: (i) Fase inicial (que pode ter ou não um início súbito) – *sudden commencement* – está associada a um aumento da pressão dinâmica, incidência de partículas do vento solar, que comprime a magnetosfera indicando um aumento brusco no campo magnético. (ii) Fase principal – *main phase* – e caracterizada por uma redução na intensidade do campo magnético na Superfície

Terrestre, essa redução está associada a Corrente de Anel e (iii) Uma fase de recuperação – *recovery phase* – caracterizada pela diminuição e eliminação gradual da pressão passando a predominar os processos de perda da Corrente Anelar. A Figura 2.4 mostra as fases da tempestade magnética.

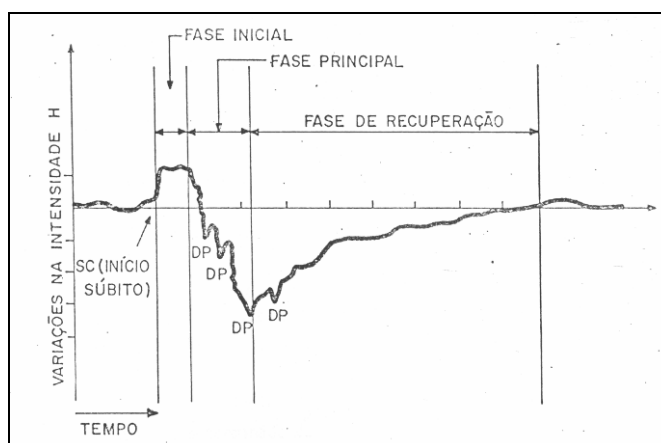


Fig. 2.4 – Fases de uma tempestade magnética.  
Fonte: Kirchhoff (1991).

#### 2.4.2 – Índices de Atividade Magnética

Os índices magnéticos utilizados com mais frequência para determinar a intensidade e a duração das tempestades magnéticas são os índices “*Disturbance Storm-Time*” (Dst), “*planetarische Kennziffer*” ou índice planetário (Kp) e “*Auroral Electrojet*” (AE).

O índice Dst, desenvolvido como a medida da componente simétrica da corrente de anel, é obtido em unidades de nanoTeslas (nT) e resolução temporal de uma hora. Para sua determinação utiliza-se a medida da componente horizontal (H) do campo magnético terrestre de superfície fornecida por estações localizadas em baixas latitudes e distribuídas longitudinalmente. É adquirido após a subtração da componente de períodos calmos, o valor médio das componentes H das estações contribuintes é calculado e multiplicado pela secante da latitude média das estações contribuintes (Rostoker et al., 1997). A Figura 2.5 mostra a variação temporal do índice Dst nos dias do mês de março de 2007.

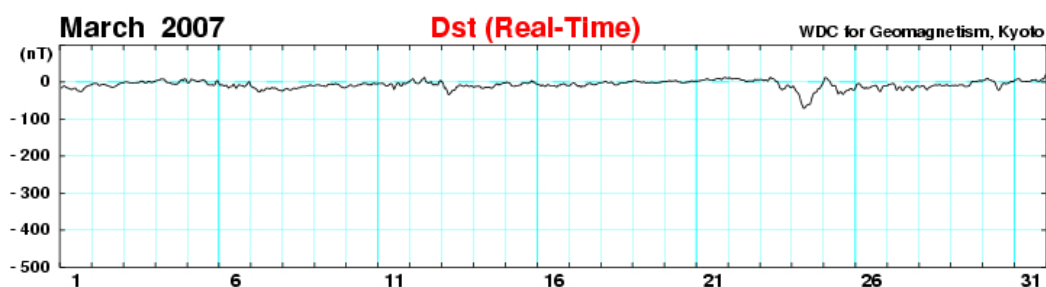


Fig. 2.5 – Variação do índice Dst para o mês de março de 2007.

Fonte: Kyoto, 2007.

O índice Kp possui a capacidade de descrever o estado geral da atividade geomagnética planetária, pois contém as contribuições devido à corrente de anel e devido aos eletrojetos equatorial e auroral. Ele representa a média do índice K, obtido em 13 observatórios distribuídos pelo globo entre as latitudes geomagnéticas de 48°N e 63°N e 43°S e 48°S (GFZ, 2003). Os níveis locais dos distúrbios geomagnéticos K são determinados, para um período de observação de 3 horas, através da diferença entre o maior e o menor valor observado na componente horizontal do campo geomagnético, a mais afetada pelos distúrbios. A escala do índice Kp é definida da seguinte forma: muito calmo (Kp= 0 a 1), calmo (Kp= 1 a 2<sup>-</sup>), normal (Kp= 2<sup>-</sup> a 3<sup>+</sup>), perturbado (Kp= 3<sup>+</sup> a 4<sup>+</sup>) e muito perturbado (Kp= 4<sup>+</sup> a 9).

O índice AE é utilizado para o estudo da atividade geomagnética na região auroral. Este índice é obtido a partir de medidas das várias variações da componente horizontal H do campo geomagnético, coletados de observatórios selecionados e distribuídos uniformemente ao longo da região auroral no hemisfério norte (Kamei et al. 2000). Os dados são normalizados em relação a um valor base mensal para cada estação, que é subtraído dos dados obtidos para cada minuto do mês considerado.

## CAPÍTULO 3

### A IONOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre pode ser dividida em uma mistura de dois componentes: o componente minoritário, a Atmosfera ionizada (Ionosfera) e o componente majoritário, a Atmosfera neutra. Considerada estática em relação à superfície da Terra, a atmosfera neutra é dividida e estudada de acordo com suas propriedades: pressão, densidade, temperatura e composição. A figura 3.1 define a atmosfera de acordo com suas propriedades.

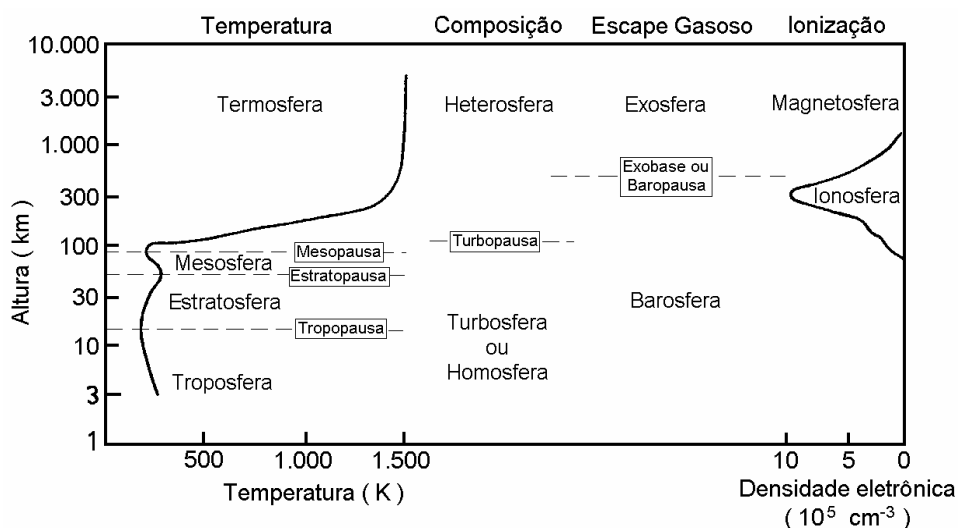


Fig. 3.1 – Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.  
Fonte: Hargreaves (1992, p. 99).

#### 3.1 – Ionosfera Terrestre

A ionosfera é a parte superior da atmosfera, compreendida entre aproximadamente 60 e 2000 km de altura, na qual existem partículas ionizadas positivamente e elétrons livres, gerando uma camada condutora de plasma. A taxa de troca de densidade eletrônica é expressa pela equação da continuidade (Hargreaves, 1992):



$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (N\mathbf{v}), \quad (3.1)$$

onde  $q$  é a taxa de produção,  $L$  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.

## 3.2 – Formação da Ionosfera

A ionosfera forma-se pela ação de fontes ionizantes solares e cósmicas. As principais fontes de ionização (ionização primária) são a radiação solar energética na faixa do Extremo Ultravioleta (EUV) e os Raios-x. As fontes cósmicas, principalmente partículas energéticas como prótons, têm um papel secundário na manutenção da ionosfera diurna, mas tornam-se muito importantes na manutenção da ionosfera noturna.

### 3.2.1 – Produção Iônica

A ionização se dá basicamente através de duas fontes: os fótons e a precipitação de partículas de alta energia. 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.

A Foto-ionização é um processo onde 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 destas, a radiação conhecida com Lyman- $\alpha$  também contribui significativamente para a produção iônica da Atmosfera Terrestre.

Outro processo de produção iônica é a Ionização por Impacto, 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. Este 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. E também porque em altas latitudes o campo magnético favorece a entrada de partículas, como no caso da região auroral.

### **3.2.2 – Perda de Ionização**

A perda de ionização ocorre através dos processos que diminuem a densidade eletrônica da Ionosfera. Ela é representada basicamente pela recombinação química de íons e elétrons que engloba todos os processos de neutralização e/ou troca de carga da atmosfera ionizada, onde pode ser dividida entre as diversas reações de perda, dentre as quais citamos como exemplo a recombinação radioativa e recombinação dissociativa.

O processo de recombinação radioativa acontece quando um íon positivo recombina-se com um elétron, liberando energia na forma de fótons, representado pela equação:



O processo de recombinação dissociativa acontece quando uma molécula de carga positiva ( $XY^+$ ) entra em reação com um elétron, dissociando os dois elementos, representado pela equação:



O movimento de plasma também contribui para a perda de ionização da atmosfera neutra. Este movimento pode acontecer tanto horizontalmente, como verticalmente, porém este último costuma ser mais eficiente nos processos de perda da região F da Ionosfera.

### 3.3 – Regiões Ionosféricas

A ionosfera pode ser dividida em regiões ou camadas que diferem entre si basicamente pelos processos físicos e químicos, mencionados acima, que controlam o comportamento de cada camada. Estas regiões são: Região D, E e F, que por sua vez é subdividida em camada F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>. A Figura 3.2 ilustra as três camadas com suas alturas e densidades eletrônicas.

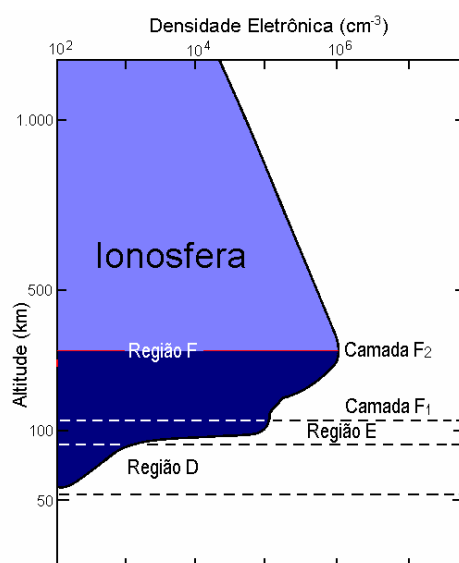


Fig. 3.2 – A localização das três camadas ionosféricas.

Fonte: Denardini (1999, p. 26).

#### 3.3.1 – Região D

A Região D é a parte inferior da Ionosfera terrestre. Inicia em torno dos 60 km e se estende até aproximadamente 85 km. Ela é muito importante do ponto de vista da radiopropagação (Kelley, 1989), pois pode atenuar, refletir e/ou absorver o sinal de rádio. Mas, durante a noite, essa camada tem sua densidade muito reduzida.

Dentre as camadas ionosféricas, a Região D é considerada a mais complexa do ponto de vista químico. As reações mais importantes incluem os componentes O, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>,

CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Em pequenas proporções têm-se também metais alcalinos, tais como Na, K e Li. A grande variedade de fontes de ionização também contribui para a produção iônica. Dentre as fontes de ionização, as principais são:

- a radiação na linha Lyman- $\alpha$  (1216 Å);
- a radiação na faixa do Ultravioleta Extremo (com  $\lambda$  entre 1027 e 1118 Å);
- a radiação na faixa dos Raios-x (com  $\lambda < 10\text{Å}$ );
- os raios cósmicos galácticos;
- as partículas de origem solar ou auroral.

### **3.3.2 – Região E**

A região E inicia por volta dos 85 km e se estende até aproximadamente 140 km de altura. Durante a noite sua densidade eletrônica diminui significativamente, pois sua principal fonte produtora, o Sol, está ionizando o outro hemisfério. Ela possui dois íons majoritários: NO<sup>+</sup> e O<sub>2</sub><sup>+</sup>, mas também é caracterizada pela presença de íons metálicos como Mg<sup>+</sup> e Fe<sup>+</sup>. A presença destes íons metálicos é creditada à desintegração meteórica pelo atrito com a atmosfera terrestre. Essa região é a de maior condutividade elétrica na ionosfera sendo importante devido à presença de correntes elétricas ionosféricas.

### **3.3.3 – Região F**

Esta região está localizada acima da região E da altura de 140 km até o topo da Ionosfera. O componente predominante é o íon O<sup>+</sup>. Durante o dia, é comum a região F subdividir-se em duas camadas distintas, F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>.

#### **3.3.3.1 – Camada F<sub>1</sub>**

Esta tem início por volta dos 140 km e estende-se até aproximadamente 180 km de altura. A espécie neutra molecular predominante nessa região é o N<sub>2</sub>. A espécie atômica

predominante nessa região é o oxigênio (Kivelson e Russell, 1995). Os íons majoritários são o  $O^+$  e o  $O_2^+$ . À noite a densidade eletrônica dessa região se reduz. Ele pode ser um pico ou só uma inflexão no perfil ionosférico dependendo do processo de perda predominante (Kirchhoff, 1991).

### **3.3.3.2 – Camada $F_2$**

A Camada  $F_2$  localiza-se na parte mais alta da Ionosfera, sua maior densidade fica em torno dos 300 km de altitude. O íon majoritário é o  $O^+$ . Durante a noite a sua densidade eletrônica normalmente decai. 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.

## **CAPÍTULO 4**

### **O RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE (RESCO)**

O Radar de Espalhamento Coerente (RESCO) foi construído com o objetivo de estudar as irregularidades existentes nas camadas E e F da ionosfera, pela Divisão de Aeronomia da Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas, CEA-INPE/MCT. Instalado no Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/INPE - MCT, no Maranhão, com coordenadas geográficas 2,33° S; 44,20° O e 0,5° S de ângulo dip.

#### **4.1 – Características Operacionais do Radar RESCO**

As características operacionais do Radar RESCO foram determinadas pelos objetivos de estudos a que ele se propunha. A frequência de operação escolhida para o radar foi de 50 MHz, pois frequências abaixo de 30 MHz e acima de 54 MHz são utilizadas para a radiodifusão e TV. O sistema pulsado foi escolhido para o Radar RESCO porque a Frequência de Repetição de Pulsos (*Pulse Repetition Frequency* - PRF) deve ser maior do que duas vezes o máximo deslocamento pretendido, mas as alturas e velocidades nas regiões estudadas são diferentes, por isso foi determinado um PRF que varia de 100 a 1000 Hz. Já a largura de pulso e a potência do transmissor foram escolhidas a partir das solicitações de cada uma dessas regiões. A Região E da Ionosfera estende-se de 90 a 120 km, enquanto que a Região F localiza-se entre 120 a 400 km. Desta forma, a largura do pulso varia de 5 a 100  $\mu$ s e a potência totaliza 120 kW, dividida entre oito transmissores.

#### **4.2 – O Sistema do Radar RESCO**

O Sistema do Radar RESCO possui um arranjo de antenas que é composto por 768 dipolos de cabo coaxial, dispostos no arranjo de 32 x 24, ver Figura 4.1. As 32 antenas estão agrupadas, quatro a quatro, para sua alimentação pelos 8 transmissores. Cada

antena consiste de 24 dipolos ligados em série, dois a dois, alinhados no sentido norte-sul, resultando num ganho de 32.5 dB.



Fig. 4.1 – Fotografia do Observatório Espacial de São Luís do Maranhão do INPE/MCT, onde se localiza o conjunto de antenas do Radar de Espalhamento Coerente - RESCO.

Fonte: Cortesia de Dr. Clezio Marcos De Nardin.

O Sistema Transmissor do Radar RESCO é composto por dois osciladores, um oscilador de 30 MHz e um oscilador de 80 MHz, dois aparelhos que modulam o pulso, um misturador, um amplificador de 80 MHz, um divisor de potência, oito deslocadores de fase, oito transmissores e oito módulos pré-amplificadores duplexadores.

Os dois osciladores são conectados aos moduladores de pulso que recebem os sinais e os modulam. Este tipo de misturador recebe os sinais pulsados em 80 MHz e 30 MHz e disponibiliza na sua saída a diferença e a soma de frequência entre eles. O sinal de soma é descartado e a diferença, um sinal de 50 MHz, é mandado ao modulador de onda quadrada. Com isso, o sinal resultante, o qual é um sinal de onda senoidal modulado por uma onda quadrada pulsada (veja figura 4.2), é passado para o pré-amplificador de baixa potência. No amplificador o sinal é amplificado e sua saída é conectada ao divisor de potência, onde o sinal é dividido igualmente em oito partes. Este sinal chega aos oito

transmissores, onde são conectados individualmente a um módulo pré-amplificador duplexador, que habilita o uso da antena para transmissão e recepção.

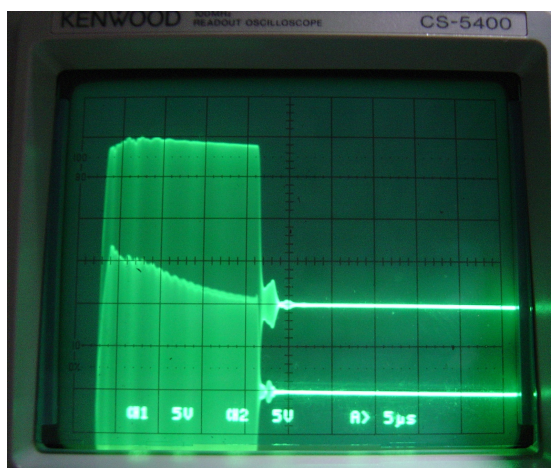


Fig. 4.2 – Sinal de onda senoidal sendo modulado por uma onda quadrada pulsada.  
Fonte: Cortesia de Dr. Clezio Marcos De Nardin.

O Sistema de Recepção do Radar RESCO é composto de oito pré-amplificadores, oito deslocadores de fase, um circuito combinador e um circuito para sua devida recepção. O sinal, após sua chegada as antenas, é encaminhado através do pré-amplificador duplexador aos deslocadores de fase, que funcionam identicamente aos utilizados no sistema transmissor. Após, o circuito combinador soma os oito sinais e os envia ao circuito receptor. Este circuito amplifica o sinal, converte-o para 30 MHz e o divide em duas partes idênticas. Uma destas partes passa por um detector de fase junto à saída do oscilador de 30 MHz. A outra parte do sinal passa por um segundo detector junto com a saída do oscilador de 30 MHz defasado eletricamente de  $90^\circ$ . Suas saídas chegam a um filtro onde é removida a frequência de 30 MHz, restando somente o efeito da interferência que o sinal sofreu ao interagir com o seu alvo na ionosfera. Estas saídas do receptor são chamadas de sinal em fase e sinal em quadratura. A figura 4.3, apresenta uma ilustração simplificada da matemática envolvida no processo.



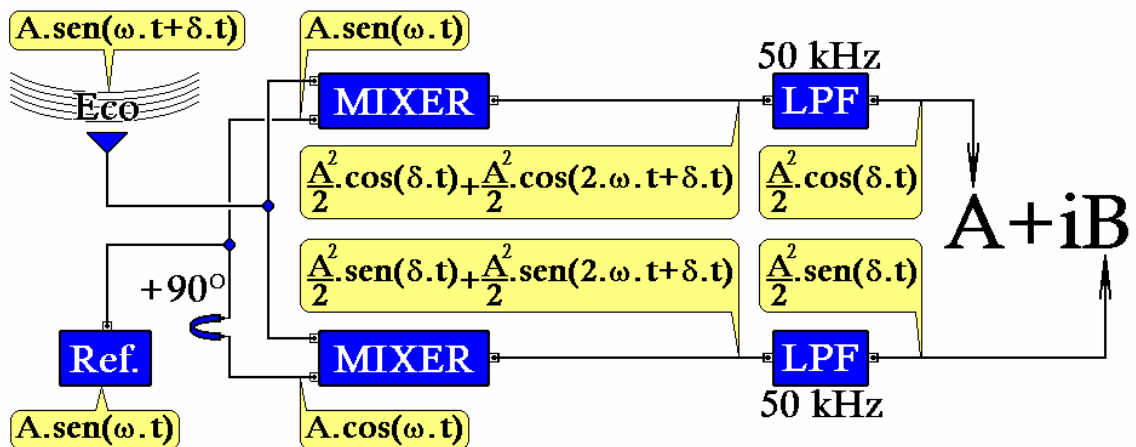


Fig. 4.3 – Esquemática do Sistema de Recepção do radar RESCO.

Fonte: Cortesia de Dr. Clezio Marcos De Nardin.

O Sistema de Controle do Radar RESCO é responsável por toda parte de geração de pulsos de controle, para os sinais transmitidos, sinais recebidos, sistema de armazenamento dos dados e alteração da posição do feixe da antena, bem como, toda a parte de configuração do Radar e ainda é responsável pela atenuação dos dados recebidos. A unidade de armazenamento do radar possui um circuito de interface e um computador para o devido armazenamento dos dados. Os sinais analógicos do sinal em fase e do sinal em quadratura são convertidos em dados digitais de 16 bits e após são salvos.

## **CAPÍTULO 5**

### **AS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM SANTA MARIA, RS, PARCERIA INPE - UFSM NO PROGRAMA PIBIC / INPE – CNPq / MCT**

O estudo realizado no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE - MCT envolveu basicamente duas partes: a revisão teórica básica e a revisão sobre o radar RESCO do Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/DAE/CEA/INPE–MCT, localizado no Maranhão, desenvolvidas em Santa Maria, RS. O acadêmico também desenvolveu atividades periódicas de monitoramentos dos índices de atividade magnética Kp, Dst e AE (AL e AU), bem como, familiarizou-se com a linguagem de programação IDL. Ele também participou de uma viagem técnica de formação complementar, na qual ele visitou as instalações do INPE em São José dos Campos e interagiu diretamente com os pesquisadores da Divisão de Aeronomia. A seguir, apresentamos algumas atividades desenvolvidas no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT.

#### **5.1 – Revisão Teórica**

No período de março de 2007 a julho de 2007 o bolsista desenvolveu atividades usuais para todo o aluno iniciante nas atividades de pesquisa. Ele precedeu a uma extensa revisão bibliográfica para cobrir, de forma elementar, a maioria dos temas interacionados com o seu trabalho de pesquisa. Ele estudou e desenvolveu trabalhos escritos sobre: Interações Sol-Terra, Ionosfera Terrestre e Radar RESCO. Um resumo dos estudos destes três temas é apresentado nos Capítulos 2, 3 e 4 e, portanto, não será reproduzido neste capítulo.

#### **5.2 - Visita Técnico Científica ao INPE / S. J. Campos.**

Dentro do período de vigência da bolsa, o acadêmico realizou uma visita técnico-científica às instalações do INPE em São José dos Campos e interagiu diretamente com

os pesquisadores da Divisão de Aeronomia. Esta visita teve o propósito de colocar o bolsista em contato com diversas pesquisas desenvolvidas na sede do INPE em São José dos Campos e de definir novas perspectivas para o seu projeto de Iniciação Científica. Nesta oportunidade ele interagiu com os pesquisadores da Divisão de Aeronomia, seus orientadores e co-orientadores mais efetivamente e discutiu tópicos relevantes para sua pesquisa.

### **5.3 – Monitoramento dos Índices Magnéticos**

Além da visão teórica, a qual forneceu subsídios para os trabalhos subseqüentes, o bolsista deveria buscar formas de acessar aos índices de atividade magnética, os quais são de grande valia para os estudos nas ciências espaciais, e arquivá-los de forma sistemática e ordenada. Esta fase foi desenvolvida no CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

#### **5.3.1 – Arquivamento de Dados**

O arquivamento dos Índices Magnéticos foi efetuado conforme programado, dentro do curto período de trabalho disponível. Nesta fase inicial, o bolsista concluiu o arquivamento dos índices Kp, Dst e AE (AL e AU) correspondentes ao ano de 2002.

### **5.4 – Comportamento dos Índices Magnéticos em períodos Magneticamente Calmos e Perturbados**

Dentro do espaço de tempo disponível para execução do projeto o bolsista ainda foi capaz de realizar um estudo comparativo do comportamento dos índices magnéticos em períodos magneticamente calmos e perturbados. Este estudo foi proposto com o intuito de desenvolver no bolsista habilidade práticas para a identificação de tempestades magnéticas. Nas seções a seguir apresentamos algumas das discussões levantadas pelo bolsista neste trabalho.

#### 5.4.1 – Período magneticamente perturbado para o ano de 2002

A partir do monitoramento dos índices Kp, Dst, AE, AL e AU, que podem ser facilmente encontrados nos sítios dos centros de dados geomagnéticos, como é o caso do *World Data Center for Geomagnetism* Universidade de Kyoto, Japão, e do sítio *National Geophysical data Center do National Oceanic and Atmospheric Administration* (NGDC/NOAA), foi feito um estudo sobre o período magneticamente perturbado para os dias 23 e 24 de maio de 2002.

O índice Dst, tomado como base para nossos estudos sobre tempestades magnéticas, pode classificar uma tempestade magnética de acordo com a sua intensidade, conforme mostrado na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - Classificação das Tempestades Magnéticas.

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

O gráfico do índice Dst para o período citado acima é mostrado na Fig. 5.1, onde a amplitude é calculada em nanoTesla (nT).

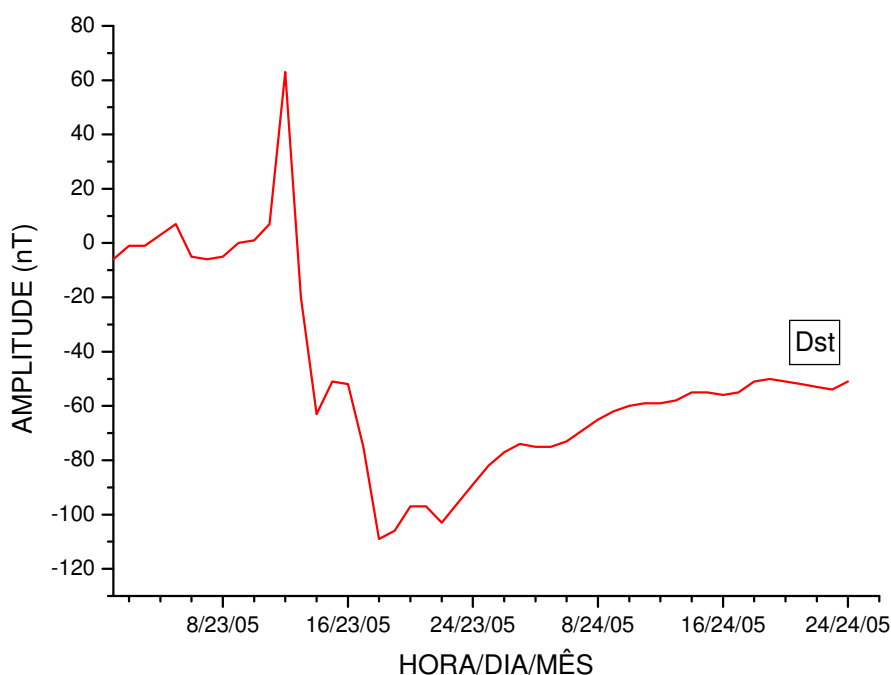


Fig. 5.1 – Variação do índice Dst para o período de 23 a 24 de maio de 2002.

Podemos observar que, no período das 9 horas até as 12 horas, o índice Dst apresentou um pico de intensidade de 63 nT, conhecido por fase inicial ou início súbito (*sudden commencement*). Após este pico, no período das 12 horas até as 18 horas, desenvolve-se a fase principal (*main phase*) da tempestade que é caracterizada pela brusca queda no valor da intensidade do índice, que neste caso atingiu -109 nT. Após a queda, o índice começou a aumentar seu valor. Esta parte da tempestade magnética denomina-se fase de recuperação (*recovery phase*), quando a tempestade reduz significativamente sua influência direta na magnetosfera da Terra e o valor do índice retorna ao seu valor normal (não mostrado na figura).

Como parâmetro de comparação, estudamos a influência da tempestade magnética para este mesmo período nos índices Kp e AE (AU e AL). Como citado no Capítulo 2, a escala do índice Kp é definida da seguinte forma: muito calmo (Kp= 0 a 1), calmo (Kp= 1 a 2<sup>-</sup>), normal (Kp= 2<sup>-</sup> a 3<sup>+</sup>), perturbado (Kp= 3<sup>+</sup> a 4<sup>+</sup>) e muito perturbado (Kp= 4<sup>+</sup> a 9). A Fig. 5.2 mostra a variação do índice Kp para os dias 23 e 24 de maio de 2002.

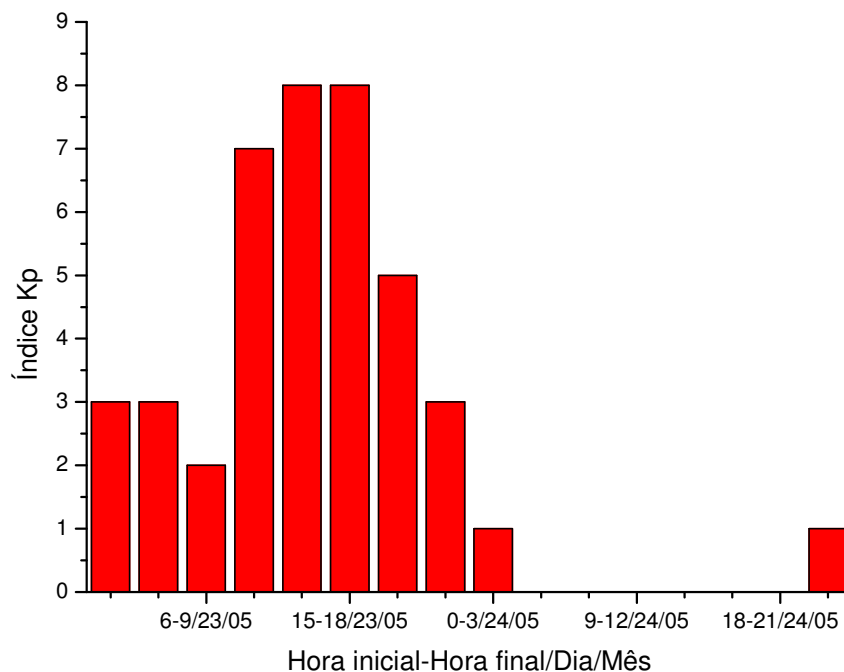


Fig. 5.2 – Índice Kp para o período de 23 a 24 de maio de 2002.

Observa-se a partir do histograma que nas primeiras 9 horas do dia 23 o índice Kp se revelava normal. Por volta das 9 horas o índice se revelou muito perturbado, chegando a um  $Kp=8$ , com a duração de aproximadamente 12 horas. Após este período o índice normalizou e se revelou muito calmo.

Em comparação com o índice Dst, o índice Kp mostrou um comportamento semelhante para a mesma tempestade, com exceção ao início súbito que não pode ser identificado a partir de seu gráfico. Já o índice AE é o cálculo da diferença entre os índices AL e AU. Um gráfico dos índices AU (parte superior) e AL (parte inferior) para 23 e 24 do mês de maio de 2002 são apresentados na Fig. 5.3.

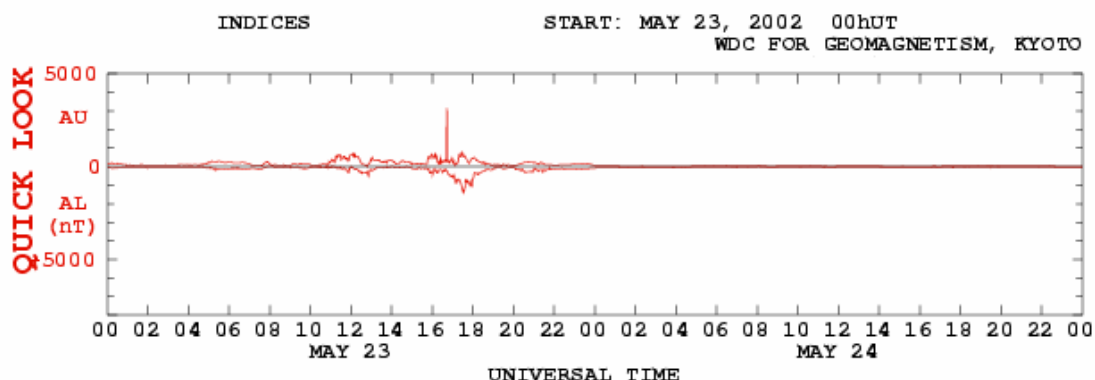


Fig. 5.3 - Índices AU (parte superior) e AL (parte central) para os dias 23 e 24 do mês de maio de 2002, onde pode ser notada a presença de um evento que ocorre entorpe das 11 horas e se estende até as 19 horas.  
Fonte: Adaptado de NGDC, 2002.

Observamos que entre o período de 11 horas e 19 horas do dia 23 de maio os índices AU e AL são perturbados, fazendo com que o AE calculado alcance uma amplitude de 1248 nT por volta das 18 horas. Assim como o Kp, o índice AE apresentou um comportamento semelhante que os mesmos resultados dos demais índices estudados para a mesma tempestade, com exceção do início súbito que só pode ser visualizado no índice Dst.

#### 5.4.2 – Período magneticamente calmo para o ano de 2002

Partindo do mesmo princípio, escolhemos um período magneticamente calmo para o ano de 2002, onde foi feito um estudo para o dia 16 e 17 de março. O gráfico do índice Dst para o período citado é mostrado na Fig. 5.4, onde a amplitude é calculada em nanoTesla (nT).

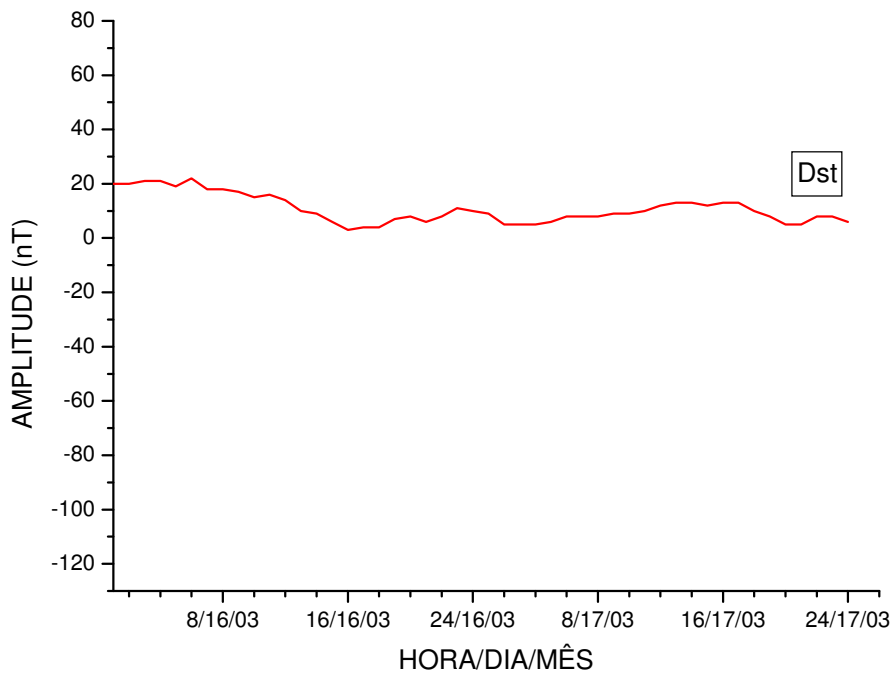


Fig. 5.4 – Variação do índice Dst para o período de 16 a 17 de março de 2002.

A linha em vermelho mostra que a amplitude do índice Dst se manteve na parte positiva e praticamente constante. Isto quer dizer que o período em questão está magneticamente calmo. Em comparação com o índice Dst, mostraremos o gráfico dos índices Kp e AE (AL e AU), ver Fig. 5.5 e Fig. 5.6, e discutiremos suas semelhanças e diferenças, se houverem.



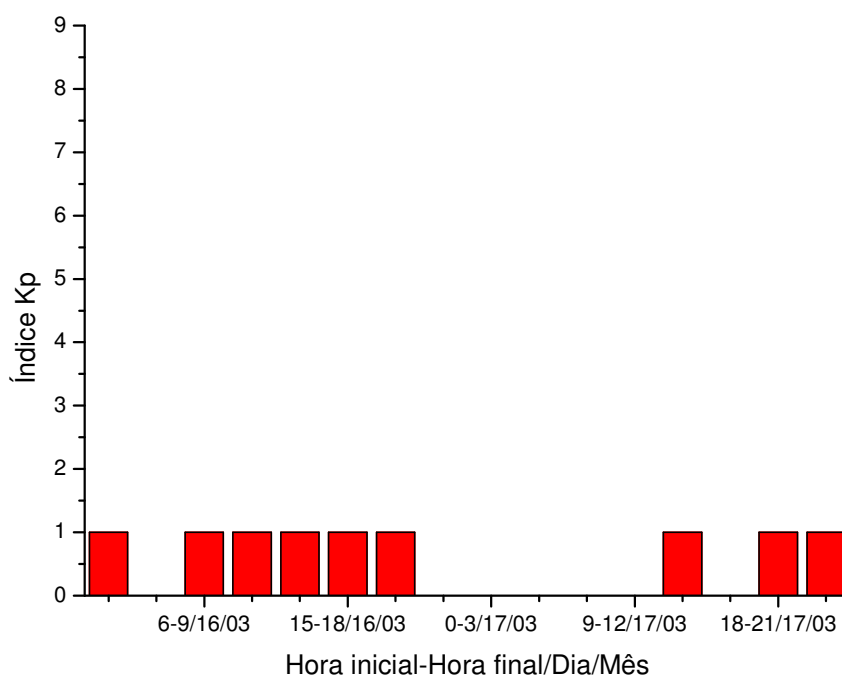


Fig. 5.5 - Índice Kp para o período de 16 a 17 de março de 2002.

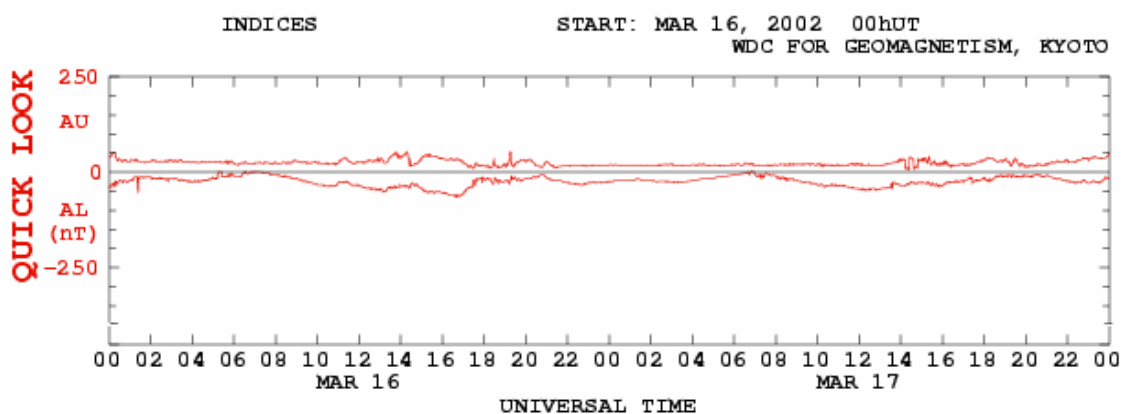


Fig. 5.6 - Índices AU (parte superior) e AL (parte central) para os dias 16 e 17 do mês de março de 2002.

Fonte: Adaptado de NGDC, 2002.

Observamos que para o índice Kp o período, de acordo com sua definição, revelou-se muito calmo, assim como no índice Dst. Já no índice AE, notamos que as medidas dos índices AU e AL foram muito baixas em comparação a um dia magneticamente

perturbado. Mas ele apresenta algumas oscilações de pequena amplitude. O que não é possível de se observar nos demais índices. Mesmo assim, o gráfico demonstra que o índice AE está semelhante ao índice Dst e conseqüentemente ao Kp.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

O desenvolvimento desse projeto de Iniciação Científica foi de relevante importância, pois possibilitou inúmeros estudos teóricos sobre o Sol, Tempestades Magnéticas e a Ionosfera. O estudo sobre o Radar RESCO, instalado no Observatório Espacial de São Luís, OESLZ/INPE – MCT, no Maranhão, também foi de grande valia para o bolsista. O bolsista também se familiarizou com o programa IDL, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, no âmbito da Parceria INPE-UFSM, através de leituras e contato com o software. O estudo das tempestades magnéticas via índices magnéticos nos ajuda a entender os vários fenômenos ocorridos em nosso planeta. A consulta na forma gráfica dos índices magnéticos AE, AU, AL, Kp e Dst ocasiona uma melhor seleção dos dados, visto que de forma mais dinâmica pode ser feita à consulta destes parâmetros. Finalmente, cabe mencionar que houve um aprendizado em adquirir um comportamento científico. Portanto, apesar do curto período de projeto de Iniciação Científica, as atividades foram realizadas com êxito tendo este projeto cumprido o seu propósito de desenvolver habilidades científicas e formar profissionais qualificados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC). Universidade de São Paulo (USP).

***O Sistema Solar***. [online] <<http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/aprendendo-basico/sistema-solar/sol.html>> Mar. 2007.

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. ***O Radar de Retro-Espalhamento Coerente de 50 MHz do INPE / OESLZ. Clezio's Home Page***. [online] <<http://www.dae.inpe.br/~clezio.denardin/>> Maio 2007.

Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS. ***As Atividades do Sol***. [online] <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>> Mar. 2007.

Graduate School of Science, Kyoto University (KYOTO). ***Geomagnetic Data Service***. [online] <<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/prov.html>> Abr. 2007.

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).

Kamei, T.; Sugiura, M.; Araki, T. ***On AE index (description in the data book No25)***. [online] <<http://swdcdbd.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae2/onAEindex.html>> Abr. 2007.

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

Kirchhoff, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1991.

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

National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Heliophysics*. [online]  
<<http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>> Abr. 2007.

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

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **PARTE II**

# **ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL BASEADO EM DADOS DE RADARES COERENTES**

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

Henrique Carlotto Aveiro (CRS/CIE/INPE - MCT, Bolsista PIBIC/INPE –  
CNPq/MCT, Agosto 2006 - Fevereiro 2007)

E-mail: [aveiro@dae.inpe.br](mailto:aveiro@dae.inpe.br)

Dr. Mangalathayil Ali Abdu (Orientador - DAE/CEA/INPE - MCT)

E-mail: [maabdu@dae.inpe.br](mailto:maabdu@dae.inpe.br)

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-Orientador - CRS/CIE/INPE – MCT)

E-mail: [njschuch@lacs.m.ufsm.br](mailto:njschuch@lacs.m.ufsm.br)

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Co-Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: [denardin@dae.inpe.br](mailto:denardin@dae.inpe.br)

São José dos Campos, Maio de 2007.

*“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**

Aproveito 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 no período 2003-2007. Este trabalho foi desenvolvido no seu Projeto de Pesquisa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, em Santa Maria, tendo Dr. Mangalathayil Ali Abdu como Orientador e os Pesquisadores Dr. Nelson Jorge Schuch e Clezio Denardini, como Co-orientadores.

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.

Ao Co-orientador científico Dr. Clezio Denardini, Pesquisador Titular do DAE/CEA/INPE - MCT, em São José dos Campos, SP, pelas tantas horas somadas nestes últimos quatro anos, as quais deixou de lado sua pesquisa e família para dedicar seu tempo a compartilhar suas idéias e a ensinar a importância da Ciência ao Acadêmico.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular do CRS/CIE/INPE – MCT, em Santa Maria, pelas (muito) longas conversas sobre a Vida e pelas vezes que me pegou pela orelha quando me desviava do meu caminho. Por sua bondade, sempre me recolocou na trilha certa, fazendo com que eu aprendesse e me desenvolvesse com meus erros. À minha gratidão por toda a atenção dedicada ao meu desenvolvimento necessitaria de um relatório à parte.

Aos antigos colegas de Laboratório, Lilian Moor e Tiago Jaskulski, pelas conversas nas horas de folga e também de trabalho. Sentirei falta do cafezinho no meio da tarde. Suas amizades não serão esquecidas.

Aos colegas de pesquisa, Diego dos Santos e Thiago Brum Pretto, obrigado pelas

discussões e sugestões em meus trabalhos. Suas amizades foram e são muito importantes no meu desenvolvimento.

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. Embora distantes fisicamente de mais de 300 km, sempre estiveram dentro do meu coração. Sem o amor de vocês, jamais teria vindo ao mundo. Obrigado.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 2 – A IONOSFERA TERRESTRE .....</b>	<b>13</b>
2.1 – IONOSFERA TERRESTRE .....	14
2.2 – PRODUÇÃO IÔNICA.....	14
2.2.1 – <i>Foto-ionização</i> .....	15
2.2.2 – <i>Ionização por Impacto</i> .....	15
2.3 – PERDA DE IONIZAÇÃO .....	15
2.3.1 – <i>Recombinação Química</i> .....	16
2.3.2 – <i>Transporte Vertical</i> .....	16
2.4 – REGIÕES IONOSFÉRICAS .....	16
2.4.1 – <i>Região D</i> .....	17
2.4.2 – <i>Região E</i> .....	18
2.4.3 – <i>Região F<sub>1</sub></i> .....	18
2.4.4 – <i>Região F<sub>2</sub></i> .....	19
2.5 – CONDUTIVIDADE IONOSFÉRICA.....	19
2.6 – TEORIA DO DÍNAMO ATMOSFÉRICO DA REGIÃO E.....	22
2.7 – ELETROJATO EQUATORIAL .....	22
2.7.1 – <i>Irregularidades do Eletrojato Equatorial</i> .....	23
<b>CAPÍTULO 3 – RADARES ATMOSFÉRICOS .....</b>	<b>27</b>
3.1 – MONOSTÁTICOS E BISTÁTICOS.....	27
3.2 – PARÂMETROS DO RADAR .....	29
3.2.1 – <i>Frequência de Operação</i> .....	29
3.2.2 – <i>Largura do Pulso</i> .....	29
3.2.3 – <i>Frequência de Repetição de Pulso</i> .....	30
3.3 – DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE RADAR.....	31
3.3.1 – <i>Sistema de Antenas</i> .....	31
3.3.1.1 – <i>Ganho e Efetividade</i> .....	31
3.3.1.2 – <i>Polarização da Onda</i> .....	32
3.3.2 – <i>Sistema Transmissor</i> .....	33

3.3.3 – <i>Sistema Receptor</i> .....	34
3.3.4 – <i>Sistema de Controle e Armazenamento dos Dados</i> .....	35
<b>CAPÍTULO 4 – INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>	<b>36</b>
4.1 – RADAR DE ESPALHAMENTO COERENTE EM 50 MHz.....	36
4.2 – PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DO RADAR RESCO .....	38
4.3 - AJUSTE DE CURVAS DE ESPECTROS DE POTÊNCIA .....	41
4.4 – PROCESSAMENTO DE SINAIS .....	42
4.4.1 – <i>Integração Incoerente</i> .....	42
<b>CAPÍTULO 5 – ESTUDO ESTATÍSTICO DA APLICAÇÃO DE INTEGRAÇÃO INCOERENTE A ESPECTROS DE RADAR.....</b>	<b>45</b>
5.1 – INTRODUÇÃO .....	45
5.1.1 – <i>Simulação e Pré-Processamento de Espectros de Potência</i> .....	46
5.1.2 – <i>Resultados e Discussões</i> .....	47
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS

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

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre. ....	13
2.2 À esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. À direita, a dimensão aproximada da Ionosfera (em azul similar à esquerda) em relação à Terra. ....	17
2.3 Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal $\sigma_0$ , Pedersen $\sigma_1$ e Hall $\sigma_2$ com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = $10^{11}$ S/m (SI). ....	21
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 $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ . ....	23
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. ....	24
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. ....	28
3.2 Representação esquemática da irradiação e uma antena e seu ganho. ....	32
3.3 Diagrama em blocos mostrando esquema de transmissão para radar usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência do Sistema Radar RESCO. ....	34

3.4	Diagrama em blocos mostrando esquema de recepção para o radar ionosférico, utilizando o sistema de chaves T/R para comutação entre os sistemas de transmissão e recepção do Sistema Radar RESCO. ....	35
4.1	Diagrama esquemático do conjunto de 32x24 antenas do RESCO com seus respectivos transmissores (TX). ....	37
4.2	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. ....	39
4.3	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.....	40
4.4	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. ....	40
4.5	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. ....	42
4.6	Ilustração de integração incoerente aplicado aos 100 espectros consecutivos da esquerda e o seu resultado ao lado direito. ....	43
5.1	Espectro de potência 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 ( $P$ ). ....	47

5.2	Variância média de $f_d$ associado ao método de ajuste ( $VAR_{FD}$ ) em função do número espectros utilizados nas integrações incoerentes ( $NICH$ ) para $SNR=8dB$ . As integrações incoerentes analisadas estão em azul e a curva logarítmica ajustada está em vermelho. ....	49
5.3	Parâmetro $\psi$ associado à variância média de $f_d$ associado em função de relação sinal-ruído ( $SNR$ ). Os valores do parâmetro analisados estão em azul e a curva logarítmica ajustada está em vermelho. ....	51



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Neste Relatório apresentamos as atividades relativas ao Projeto **ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL BASEADO EM DADOS DE RADARES COERENTES** (Processo nº 107616/2003-3) desenvolvidas, no período de agosto de 2006 a fevereiro de 2007, por Henrique Carlotto Aveiro, na época, bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCT.

No referido período, o então Acadêmico de Engenharia Elétrica, desenvolveu estudos teóricos e aplicou seus conhecimentos em atividades relacionadas ao processamento de sinais de radar, no Centro Regional de Sul de Pesquisas Espaciais, CRS/INPE – MCT. A intenção dos trabalhos foi 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 acadêmico efetuou o estudo estatístico da aplicação da técnica de integração incoerente a espectros simulados de potência de irregularidades do eletrojato equatorial.

Apresenta-se, no Capítulo 2 deste Relatório, uma breve descrição da teoria necessária à 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 o Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz de São Luís do Maranhão (RESCO), o pré-processamento dos dados do radar RESCO, bem como algumas técnicas aplicadas para seu aprimoramento. O Capítulo 5 é dedicado à apresentação das atividades de pesquisa desenvolvidas pelo Acadêmico. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões relativas às atividades desenvolvidas no Projeto de Iniciação Científica.

## CAPÍTULO 2

### A IONOSFERA TERRESTRE

A atmosfera da Terra pode ser discutida em termos da constituição de seus componentes: 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 da temperatura com a altura, da composição e do estado de mistura dos gases, embora a primeira citada seja a mais usada. A Fig. 2.1 ilustra os termos usados para estas 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.

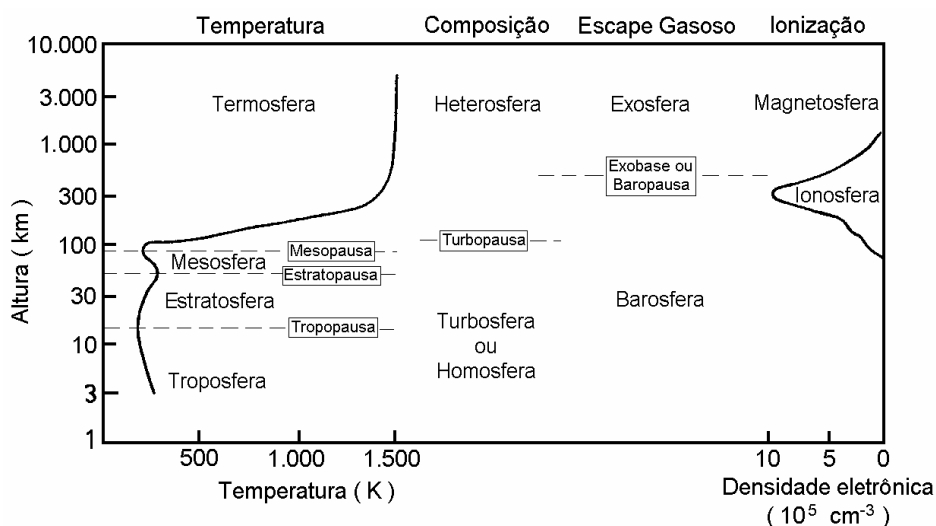


Fig. 2.1 – Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.  
 FONTE: Hargreaves (1992, p. 99).

## 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 condutoras 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 deslocamento das população sendo considerada.

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<sub>1</sub>). 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 (Hargreaves, 1992).

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- $\alpha$  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 em comparação com a fotoionização, visto 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 (Hargreaves, 1992). Há uma vasta gama de reações químicas que contribuem para esta recombinação, porém destacamos duas classes: recombinação radioativa 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 (Kivelson e Russell, 1995).

### 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 às 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 Fig. 2.2 ilustra as três camadas com suas respectivas alturas e densidades eletrônicas.

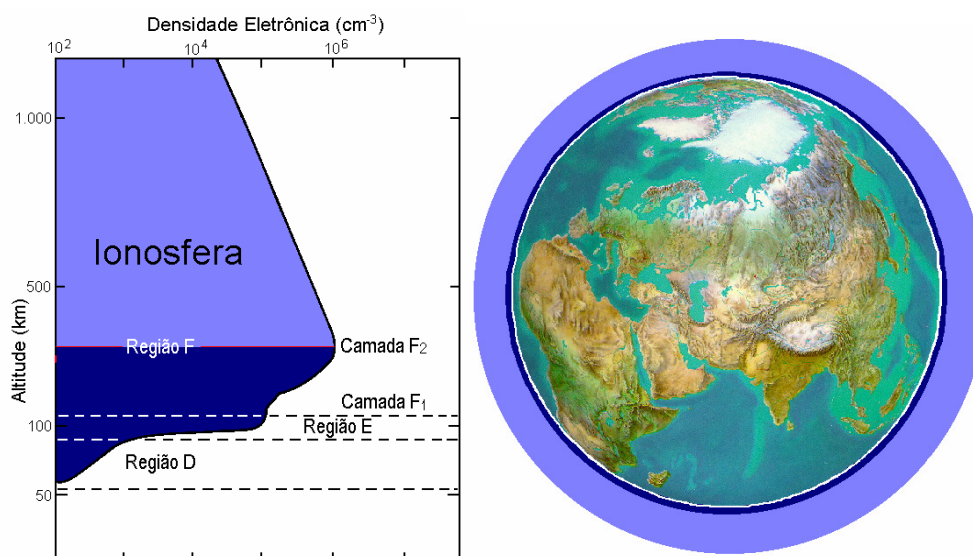


Fig. 2.2 – À esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da Ionosfera (em azul similar à esquerda) em relação a Terra.  
FONTE: Denardini (1999, p. 26).

#### 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, dependendo da faixa de frequência do sinal. 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- $\alpha$  (1216 Å);
- a radiação na faixa do Ultravioleta Extremo (com  $\lambda$  entre 1027 e 1118 Å);
- a radiação na faixa dos Raios-X (com  $\lambda$  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  $5 \times 10^9$  elétrons/m<sup>3</sup>, enquanto que durante o dia ela pode ser da ordem de  $10^{11}$  elétrons/m<sup>3</sup>. Ela possui dois íons majoritários: NO<sup>+</sup> e O<sub>2</sub><sup>+</sup>, mas também é caracterizada pela presença de íons metálicos como Mg<sup>+</sup> e Fe<sup>+</sup>. 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 melhor 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 F<sub>1</sub>**

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

#### **2.4.4 – Região F<sub>2</sub>**

A Região F<sub>2</sub> localiza-se na parte mais alta da ionosfera e seu máximo de concentração eletrônica pode atingir aproximadamente  $10^{12}$  elétrons/m<sup>3</sup>, localizando-se em torno dos 300 km de altitude. Durante a noite a sua densidade eletrônica normalmente decai para cerca de  $5 \times 10^{10}$  elétrons/m<sup>3</sup>. 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/m<sup>2</sup>, 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. Na presença destes campos, o plasma tem um comportamento não isotrópico. 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:



$$\sigma = \frac{n e^2}{m v} \quad (2.4)$$

onde  $v$  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 freqüência de onda do fóton emitido nos processos de recombinação química ( $h\nu$ ).

Considerando 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 ( $\sigma_0$ ). Ela é calculada considerando a direção paralela ao campo geomagnético ( $\mathbf{B}$ ), uma vez que o meio ionosférico é anisotrópico.

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

A condutividade Pedersen ou transversal ( $\sigma_1$ ) refere-se à condutividade na direção da componente de um campo elétrico  $\mathbf{E}$  perpendicular a direção de  $\mathbf{B}$ .

$$\sigma_1 = n \cdot e^2 \cdot \left( \frac{v_e}{m_e (v_{e2} + \Omega_{e2})} + \frac{v_i}{m_e (v_{i2} + \Omega_{i2})} \right) \quad (2.6)$$

A condutividade Hall ( $\sigma_2$ ) refere-se à condutividade na direção perpendicular, simultaneamente, as direções de  $\mathbf{B}$  e da componente de  $\mathbf{E}$  perpendicular a direção de  $\mathbf{B}$ .

$$\sigma_2 = n \cdot e^2 \cdot \left( \frac{\Omega_e}{m_e (v_{e2} + \Omega_{e2})} - \frac{\Omega_i}{m_e (v_{i2} + \Omega_{i2})} \right) \quad (2.7)$$

Nas equações 2.5, 2.6 e 2.7,  $\Omega_e$  e  $\Omega_i$  são as freqüências ciclotrônicas,  $v_e$  e  $v_i$  são as freqüências 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 (Kelley, 1989).

Uma distribuição em altura da condutividade na ionosfera calculada para médias latitudes ao meio-dia é mostrada na Fig. 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 condutividade Hall (Denardini, 1999).

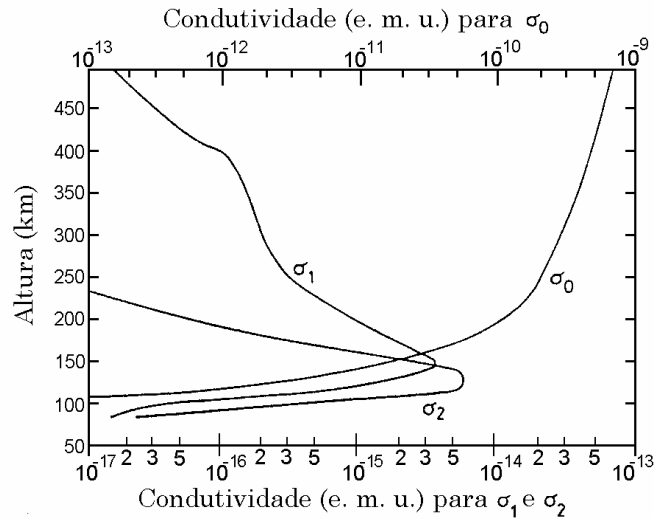


Fig. 2.3 – Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal  $\sigma_0$ , Pedersen  $\sigma_1$  e Hall  $\sigma_2$  com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) =  $10^{11}$  S/m (SI).  
FONTE: Akasofu e Chapman (1972, p. 244).

Utilizando estas três variáveis,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , 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:

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

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 em 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  $\sigma_3$  é a condutividade Cowling, a condutividade na direção do eletrojato equatorial (Forbes, 1981).

## 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 – Eletrojato 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 (Denardini, 2003), Fig. 2.4. 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 eletrojato equatorial.

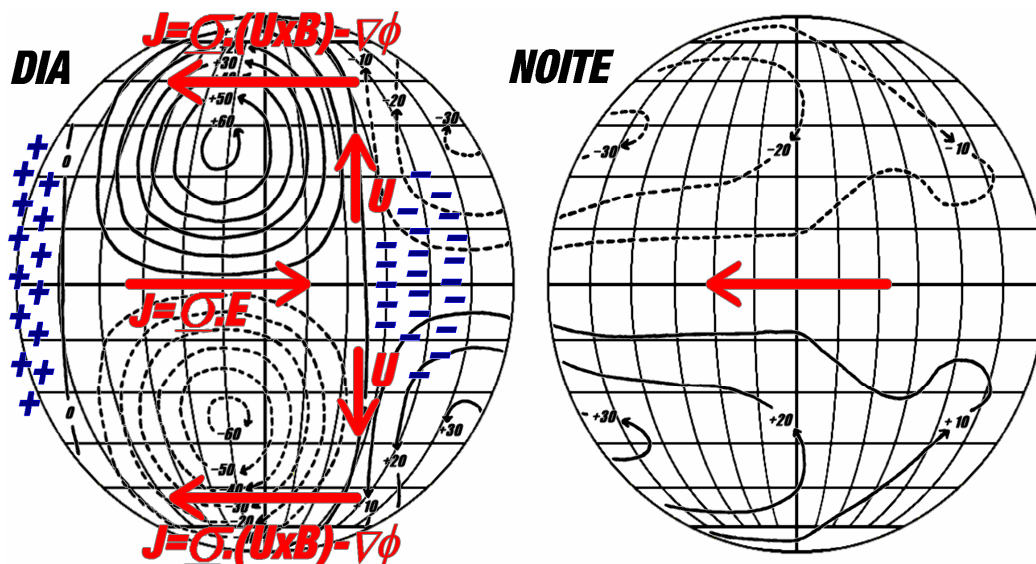


Fig. 2.4 – Formação do Sistema Sq de correntes, baseado na Teoria do Dínamo Atmosférico. No esquema são mostrados os ventos neutros  $U$  no sentido dos pólos no lado iluminado pelo Sol, as correntes de altas latitudes  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \nabla\Phi$  que polarizam os terminadores e o eletrojato equatorial  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$ .  
 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 (Fig. 2.5).

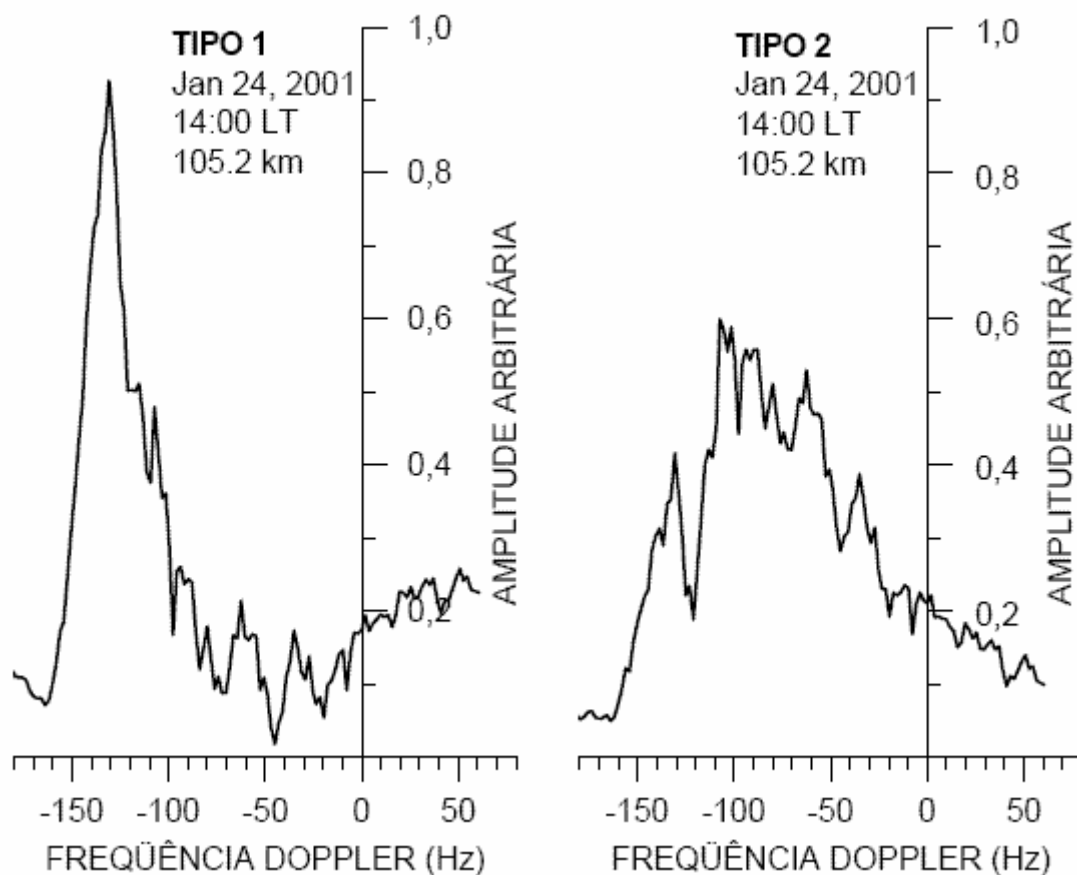


Fig. 2.5 – Espectros de irregularidades Tipo 1, à esquerda, e irregularidades Tipo 2, à direita, dos dados do Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz, no dia 24 de janeiro de 2001, às 14 horas, para a altura de 105,2 km, medidas no Observatório Espacial de São Luís do Maranhão/INPE - MCT.  
FONTE: Denardini (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  $\theta$ , 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  $\alpha$  é o ângulo entre a onda e o campo magnético,  $v$  e  $\Omega$  são a colisão e girofrequência dos elétrons e íons. O valor que a velocidade íon-acústica deve ser excedida depende de  $\psi$ , que, por sua vez, depende de  $\alpha$ . Para propagação normal ao campo,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\psi$  é aproximadamente 0,3 na Região E, mas aumenta rapidamente quando  $\alpha$  afasta-se de  $90^\circ$ , já que  $\Omega_e$  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 3 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 (Skolnik, 1962).

No radar monostático, a energia do eco que retorna do 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).



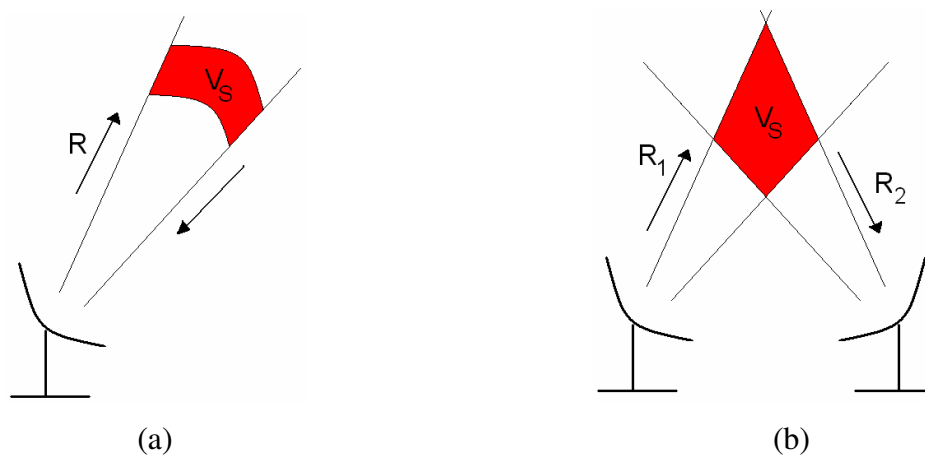


Fig. 3.1 – Diagrama esquemático representando o volume de estudo para um radar monostático (a) e bistático (b). O volume de estudo \$V\_s\$ para o primeiro é determinado somente pela largura do pulso e velocidade de propagação da onda. Para o bistático \$V\_s\$ é o volume de intersecção entre os feixes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

Considerando que a área do espalhamento (\$\Sigma\$) é o produto do volume de espalhamento (\$V\_s\$) pelo número de alvos (moles) por metro (\$\sigma\$) e que não ocorrem espalhamentos da energia 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 3.2 será dada uma descrição 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, de acordo com suas escolhas, 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 a 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  $\lambda_i$  é a escala de comprimento da irregularidade, em metros, e  $f_o$  é frequência de operação do radar (Fejer e Kelley, 1980). 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 dos dados do radar é dada pelo produto  $c \cdot \tau / 2$ , onde  $c$  é a velocidade da luz (m/s) e  $\tau$  é a largura do pulso (s). Aumentando a largura do pulso, pioramos a resolução em altura. Por exemplo, um radar que utilize  $\tau = 1 \mu\text{s}$  obterá um dado (eco) a cada 300m (resolução), e com  $\tau = 2 \mu\text{s}$ , um dado a cada 600m. Ou seja, quanto menor for  $\tau$ , mais pontos em altura nosso radar adquirirá.

Caso o radar esteja utilizando um feixe oblíquo, devemos multiplicar este valor de resolução por  $\cos(\theta)$ , onde  $\theta$  é o ângulo de elevação do feixe em relação ao zênite (Janardhanan, 1983). 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 (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.

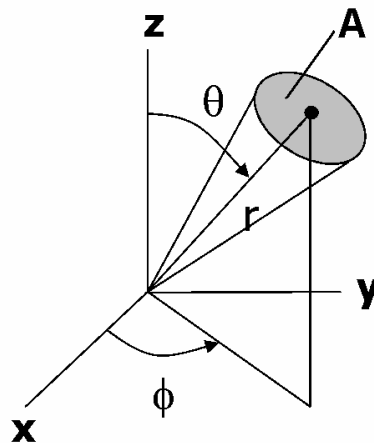


Fig. 3.2 – Representação esquemática da irradiação e uma antena e seu ganho.

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 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  $\eta$  é o fator de eficiência da antena (Balanis, 1982).

### 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 (Fig. 3.3). 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 (Janardhanan, 1983).

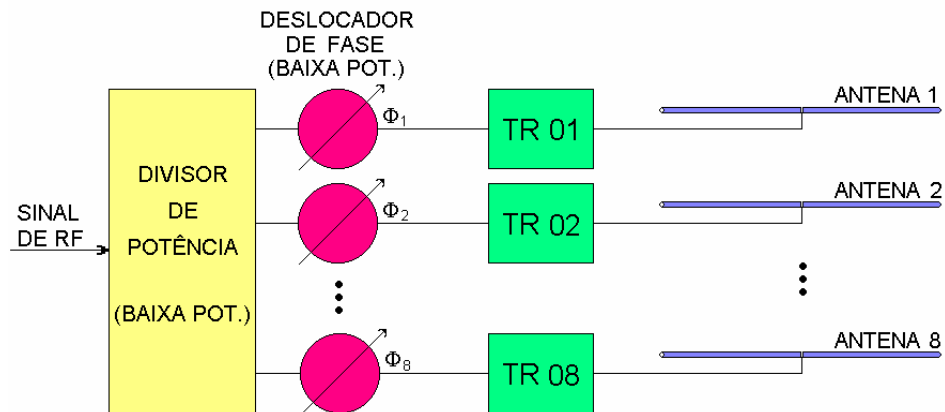


Fig. 3.3 – Diagrama em blocos mostrando esquema de transmissão para radar usando 8 transmissores com divisores de potência e deslocadores de fase de baixa potência do Sistema Radar RESCO.

FONTE: Adaptado de Denardini (1999, p. 61).

### 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 (Fig. 3.4). 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 (Denardini, 1999).

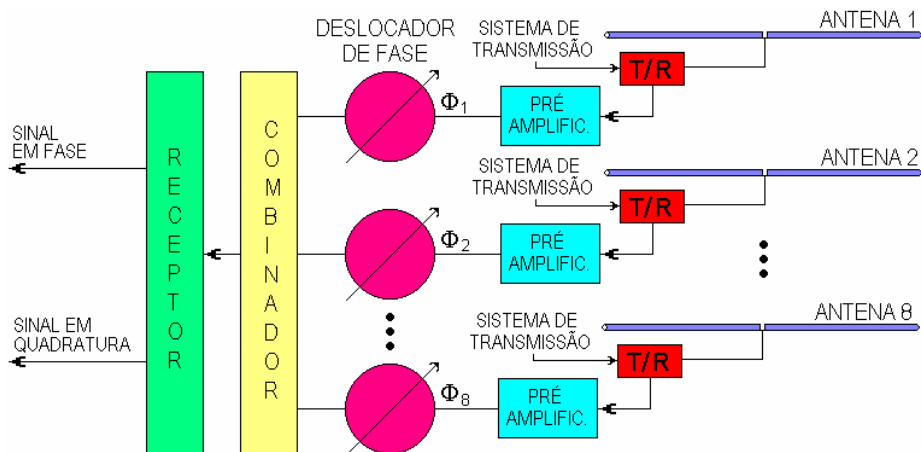


Fig.3.4 – Diagrama em blocos mostrando esquema de recepção para o radar ionosférico, utilizando o sistema de chaves T/R para comutação entre os sistemas de transmissão e recepção do Sistema Radar RESCO.  
FONTE: Denardini (1999, p. 63).

### 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

### INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS UTILIZADOS

Para os objetivos a que se propõe este Projeto de Iniciação Científica, o Radar de Espalhamento Coerente em 50 MHz que se encontra em operação no Observatório Espacial Equatorial em São Luis (MA) é utilizado como equipamento principal para estudo da eletrodinâmica do eletrojato equatorial na região brasileira. 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 (irregularidades na ionosfera) 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 por rotinas desenvolvidas no software IDL<sup>®</sup> (*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 4, 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.

#### **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, DAE/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  $2,33^{\circ}$  S,  $44,20^{\circ}$  O e latitude geomagnética  $0,5^{\circ}$  S, operando durante duas semanas a cada mês, de acordo com o calendário geofísico internacional (Abdu, 2003).

O sistema de antenas do radar RESCO é composto por 768 dipolos do tipo COCO (*colinear co-array*), dispostos no arranjo de  $32 \times 24$ , ver Fig. 4.1. As 32 antenas são dispostas em grupos de 4 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  $30^{\circ}$  em relação ao zênite tanto para leste, quanto para oeste. Para a largura do feixe no sentido norte-sul foi escolhido o valor de  $7^{\circ}$ , no sentido leste-oeste foi escolhido uma largura de feixe de  $3^{\circ}$ . 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 (Denardini, 2003).

#### **4.2 – Pré-Processamento dos Dados do Radar RESCO**

A rotina de pré-processamento do Radar RESCO é composta pelos seguintes procedimentos:

1. Separar os dados dos dois canais por altura;
2. Agrupar e salvar em arquivo adicional;
3. Após, agrupar as componentes em fase (A) e quadratura (B) resultando num número complexo ( $A + iB$ ).
4. Empregar um algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), para análise da densidade espectral de energia recebida.

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 Fig. 4.2.

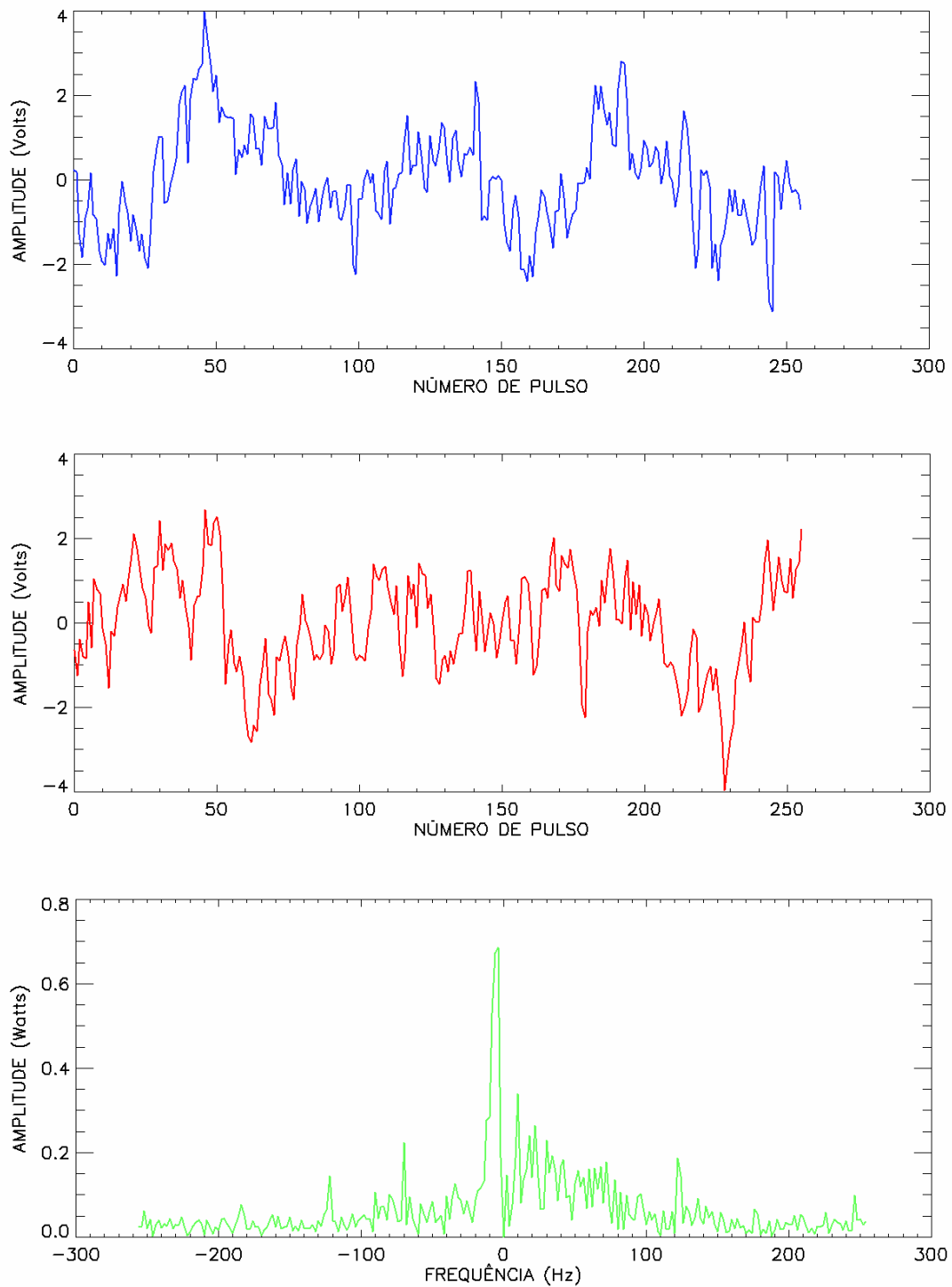


Fig. 4.2 – Exemplo da variação das componentes em fase (na cor azul) e em quadratura (em vermelho) e o espectro de potência obtido através da análise de Fourier destes dois sinais (em verde). Dados obtidos pelo RESCO correspondente a altura de 107,8 km, às 10h51 do dia 17 de outubro de 2003.

Agrupando vários espectros consecutivos obtemos um espectrograma (Fig 4.3), 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.

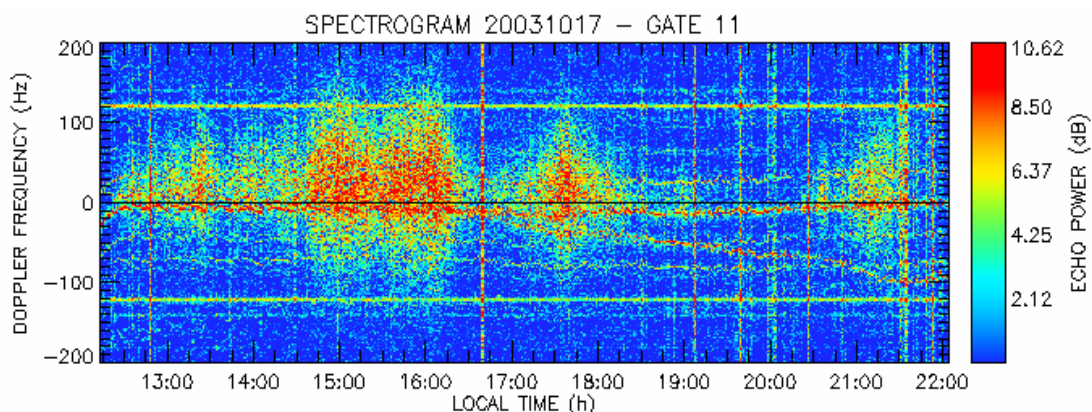


Fig. 4.3 – Exemplo de espectrograma originado pelo agrupamento de vários espectros consecutivos referentes à altura de 107,8 km. Dados obtidos pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do INPE - MCT para o dia 17 de outubro de 2003.

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 (Fig 4.4), para o dia de aquisição.

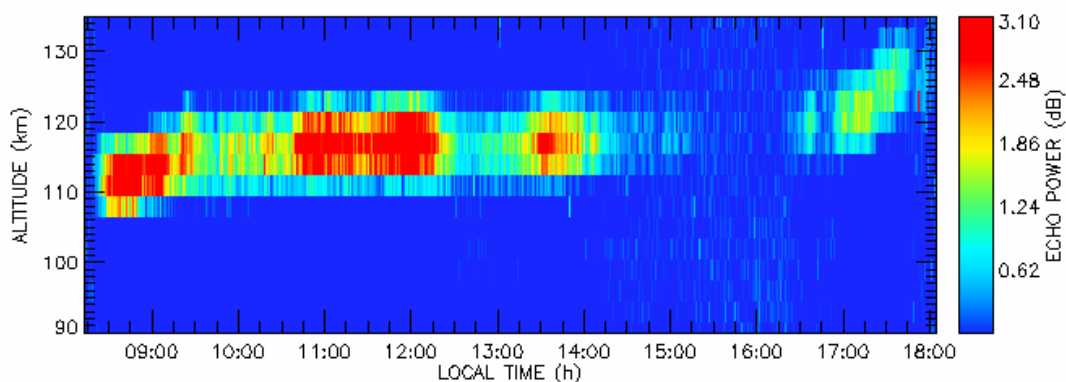


Fig. 4.4 – Exemplo de mapa de variação temporal de intensidade de potência em função da altura obtido pelo RESCO no Observatório Espacial de São Luís do INPE - MCT para o dia 17 de outubro de 2003.

### 4.3 - Ajuste de Curvas de Espectros de Potência

Ao invés de cada espectro ser representado por um conjunto de pontos, ele pode ser representado por parâmetros que reduzam 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:

$$S(f) = \frac{P_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d1})^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{P_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_{d2})^2}{2\sigma_2^2}\right] + P_N, \quad (4.1)$$

onde  $P_1$  e  $P_2$  são, respectivamente, as áreas das Gaussianas representando os espectros Tipo 1 e Tipo 2,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  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  $\mathbf{y} = \{y_1 \dots y_n\}$  (Bard, 1974; Press et al., 1992). É também uma forma de encontrar os parâmetros  $\mathbf{a}$  que minimizam a soma dos quadrados dos erros residuais entre o conjunto de dados  $\mathbf{y}$  e as gaussianas  $S(f)$ , considerando a incerteza  $\sigma_i$  relacionada a cada ponto  $y_i$ . Assim, nossa função objetivo a ser minimizada é dada por:

$$\chi^2 \equiv \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - S(f_i; P_1, f_{d1}, \sigma_1, P_2, f_{d2}, \sigma_2, P_N)]^2}{\sigma_i}, \quad (4.2)$$

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 foram introduzidos anteriormente.

Um exemplo de espectro simulado com duas Gaussianas e ajustado pela função  $S(f)$  é apresentado na Fig. 4.5. Podemos notar que a estimação dos parâmetros retorna uma curva bem ajustada, sendo assim, os dados são reduzidos com sucesso.

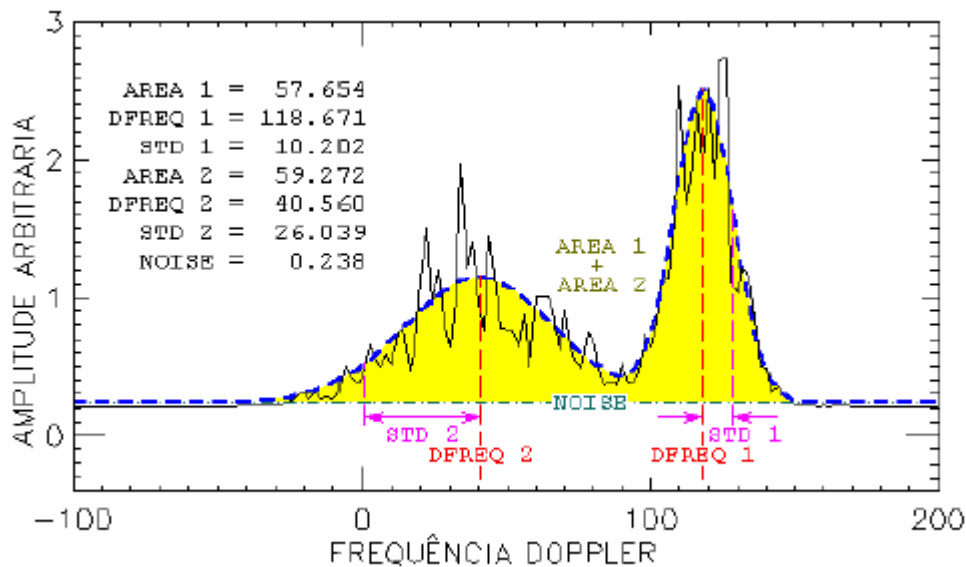


Fig. 4.5 – Espectro de frequência simulado (em preto) e seu ajuste por Gaussiana (em azul). A linha tracejada vermelha indica o centro da distribuição, a linha verde indica o nível de ruído e a diferença entre as linhas vermelha e violeta indica os respectivos desvios padrões.

Fonte: Denardini (2003, p.13)

#### 4.4 – 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 erro e obtermos uma melhor estimação de parâmetros são utilizadas diversas técnicas de processamento de sinais. Dentre várias, nesse relatório descreveremos uma delas: a integração incoerente.

##### 4.4.1 – 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 4.6. À esquerda da figura apresentamos o conjunto de espectro com alta variância enquanto o espectro suavizado está à direita.

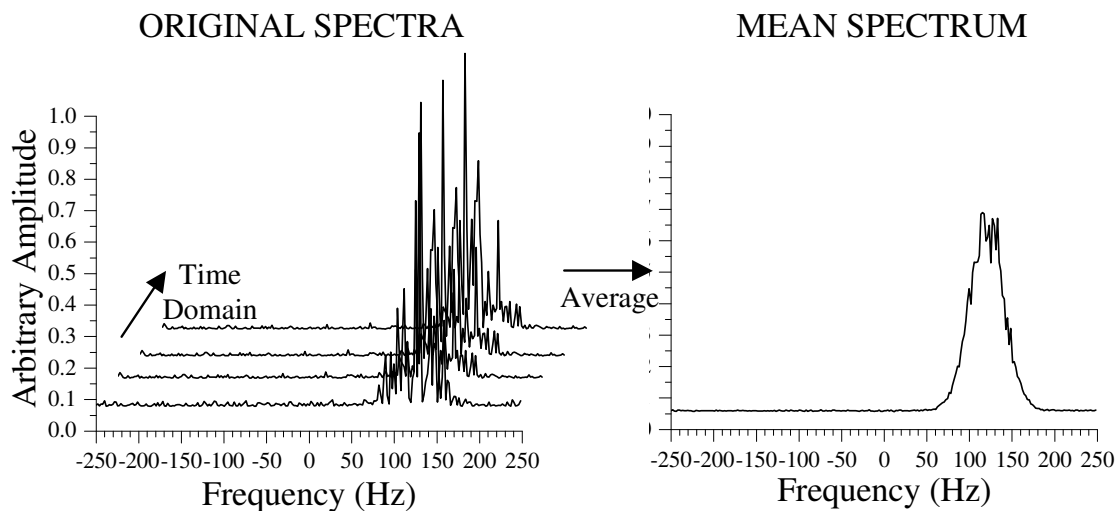


Fig. 4.6 – Ilustração de integração incoerente aplicado aos 100 espectros consecutivos da esquerda e o seu resultado ao lado direito.

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 potência e  $\sigma_N$  é o desvio padrão do ruído. A densidade de potência do ruído tem uma distribuição qui-quadrada ( $\chi^2$ ) com 2 graus de liberdade, visto que a densidade de potência do ruído ( $P_N$ ) 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  $\chi^2$ , 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 Fig. 5.5 torna-se mais visível.

## **CAPÍTULO 5**

### **ESTUDO ESTATÍSTICO DA APLICAÇÃO DE INTEGRAÇÃO INCOERENTE A ESPECTROS DE POTÊNCIA DE RADAR**

O estudo da aplicação da integração incoerente 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. Na Seção 5.1 apresentamos o estudo desenvolvido que efetuamos para este Relatório, objetivando uma melhor compressão do eletrojato equatorial.

#### **5.1 – Introdução**

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 Relatório 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 Relatório, aplicamos distintos valores de integração incoerente de forma a reduzir a variância nos espectros e avaliar a resposta do ajuste a esta integração. Foi determinada uma equação que quantifica a variância da estimação da frequência Doppler através do método dos

Mínimos Erros Quadráticos Não-Linear. O resultado da aplicação desta técnica, bem como sua descrição, é apresentado a seguir.

### 5.1.1 – Simulação e Pré-Processamento dos Espectros de Potência

Este Relatório é focado 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, o que corresponde a um deslocamento Doppler de aproximadamente 360 m/s (velocidade íon-acústica) para radares operando na frequência de 50 MHz. Assim, o modelo de covariância gaussiana de Zrnic (1979) foi utilizado para simular grupos de mil espectros com características gaussianas. Cada espectro foi constituído de 256 pontos com características típicas de irregularidades do tipo 1 ( $f_d = 120$  Hz e  $\sigma = 20$  Hz). Um ruído branco foi adicionado no domínio do tempo de forma a garantir uma variância mais realística nos espectros de potência. Como forma de tornar a análise independente da relação sinal-ruído (*SNR*), onze diferentes valores de *SNR* foram utilizados: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 dB. Estes grupos de espectros foram gerados e estes espectros foram integrados incoerentemente, de forma a gerar sub-grupos. Cada subgrupo possuía dez mil espectros e representava um distinto número de espectros integrados incoerentemente (*NICH*): 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 integrações incoerentes. Assim sendo, foram gerados 121 subgrupos de espectros, cada um com 10.000 gaussianas, contendo características de irregularidades do tipo 1, tendo como variável dos subgrupos apenas *SNR* e *NICH*. Uma vez que se assumiu espectros de potência contendo somente um tipo de irregularidade, a equação do modelo de ajuste de duas Gaussianas (Eq 5.3) pode 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:

$$S(f) = \frac{P}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\sigma^2}\right] + P_N, \quad (5.1)$$

onde *P*,  $f_d$ ,  $\sigma$  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. 5.1, onde a linha tracejada verde representa  $P_N$ , a linha vertical vermelha mostra  $f_d$ , a diferença entre as linhas vertical laranja e vermelha determina  $\sigma$  e a área entre as linhas tracejada azul e verde define  $P$ .

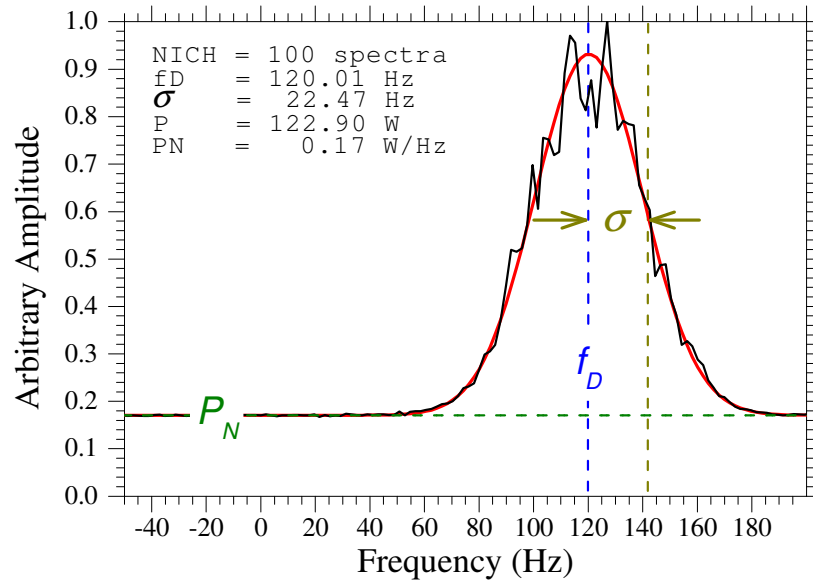


Fig. 5.1 – Espectro de potência simulado (linha preta) sobreposto por uma curva Gaussiana (linha azul) ajustada ao espectro utilizando o Método de Mínimos Erros Quadráticos. A linha tracejada verde representa a densidade de potência de ruído ( $P_N$ ), a linha vertical azul mostra o centro da distribuição de frequências ( $f_d$ ), a diferença entre as linhas vertical azul e marrom determina o desvio padrão da curva Gaussiana ajustada ao espectro e a área entre a linha vermelha e a linha tracejada verde define a potência do sinal ( $P$ ).

Os subgrupos de espectros de potência simulados conforme descrito anteriormente aqui foram processados como espectros ordinários obtidos no processamento dos dados do radar RESCO. Utilizamos MLE a fim de minimizar a soma dos quadrados do erro residual de forma a ajustar uma gaussiana (Eq. 5.1). O mesmo algoritmo ajustou cada espectro dos 121 subgrupos a uma única gaussiana. A análise consistiu do estudo da resposta do ajuste a partir da variância média dos parâmetros estimados em função do número de integrações incoerentes e da relação sinal-ruído dos espectros.

### 5.1.2 – Resultados e Discussões

A análise da variância dos momentos estimados nos dá uma indicação da acuidade de

cada parâmetro para um dado SNR e NICH. A variância média do momento espectral  $f_d$  (nosso parâmetro de interesse) determinado pelo Método de MLE para diferente número de integrações e relação sinal-ruído é apresentado na Tabela 1. A Tabela mostra que quanto maior for *NICH*, menores serão as variâncias. Um exemplo claro são as altas variâncias quando a integração incoerente não é aplicada (*NICH* =1). Isto indica que o ajuste de curvas dificilmente tem, sempre, boas estimações neste caso. Nossos resultados mostram que aumentando *NICH* de 1 para 100 espectros resulta numa redução superior a 100 vezes na variância de  $f_d$ , o qual aumentou a confiança da velocidade Doppler da irregularidade de plasma.

Tabela 1 – Variância média do momento espectral  $f_d$  estimado em função de NICH e SNR

NICH/SNR	1 dB	2 dB	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	20 dB	40 dB	60 dB	80 dB	100 dB
1	6.9583	6.0953	5.0198	4.4752	4.1749	3.9029	3.3258	2.8815	2.7962	2.7346	2.6996
2	5.0553	3.3786	2.4028	2.0283	1.8043	1.6743	1.3536	1.1484	1.0657	1.017	0.9926
4	2.4757	1.6096	1.1369	0.959	0.8608	0.7933	0.6396	0.5412	0.4988	0.4752	0.4605
6	1.6293	1.0576	0.7474	0.631	0.5628	0.5213	0.4208	0.3548	0.3272	0.312	0.3019
8	1.213	0.7888	0.5583	0.4689	0.4202	0.3886	0.3135	0.2645	0.2439	0.2322	0.2248
10	0.9658	0.6294	0.4443	0.3743	0.335	0.3095	0.2498	0.2107	0.1942	0.1849	0.1787
20	0.4798	0.3123	0.2206	0.1858	0.1666	0.1537	0.1241	0.1046	0.0964	0.0918	0.0887
40	0.2391	0.1555	0.11	0.0926	0.0829	0.0766	0.0619	0.0522	0.0481	0.0458	0.0442
60	0.1592	0.1036	0.0732	0.0617	0.0553	0.0511	0.0412	0.0348	0.032	0.0305	0.0294
80	0.1194	0.0777	0.0549	0.0463	0.0414	0.0383	0.0309	0.026	0.024	0.0228	0.0221
100	0.0954	0.0621	0.0439	0.037	0.0331	0.0306	0.0247	0.0208	0.0192	0.0183	0.0177

Outro ponto relevante neste trabalho é a dependência da variância de  $f_d$  ( $VAR_{FD}$ ) em função do número de espectros integrados (*NICH*) para um fixo valor de *SNR*. Como exemplo, apresentamos a Fig. 5.2, a qual mostra a relação matemática entre a variância média (pontos azuis) e o número de integrações incoerentes para *SNR* = 8 dB. O gráfico claramente mostra uma dependência linear entre o logaritmo natural da variância de  $f_d$  e o logaritmo natural das integrações incoerentes. De forma a quantificar esta

dependência, foi realizado um ajuste linear a estes dados no domínio ln-ln, representado pela curva vermelha sobreposta ao gráfico da Fig. 5.2. A equação a seguir foi utilizada para ajustar os dados:

$$VAR_{fd} = NICH^\varepsilon \cdot e^\psi, \quad 1 \leq NICH \leq 100, \quad (5.2)$$

onde  $VAR_{fd}$  é a variância ajustada de  $f_d$  estimado,  $\varepsilon$  é a coeficiente de potência negativa que nos diz quanto  $VAR_{fd}$  reduz com o aumento de  $NICH$ , e o exponencial de  $\psi$  é o  $VAR_{fd}$  observado quando a integração incoerente não é aplicada. Para  $SNR = 8$  dB, caso apresentado,  $\varepsilon$  resultou em  $-1.03423 (\pm 0.00973)$ . O fator  $\psi$  resultou  $1.32224 (\pm 0.02858)$ . E o coeficiente de correlação resultou  $-0.9996$ . A Tabela 2 abaixo apresenta os valores de  $\varepsilon$ ,  $\psi$  e  $R$ , para os diferentes valores de  $SNR$ .

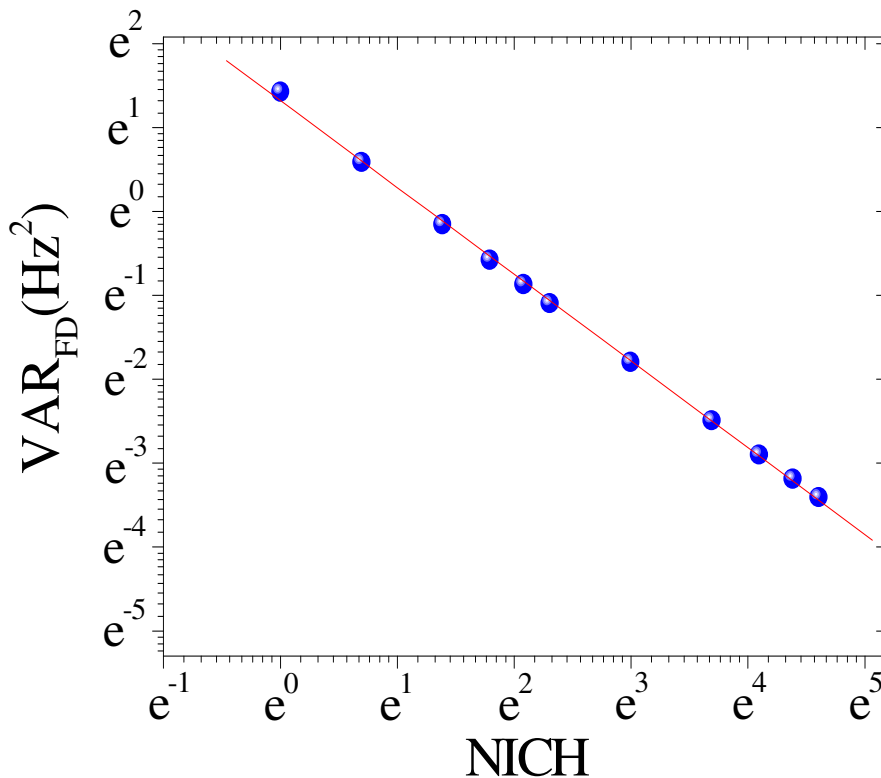


Fig. 5.2 – Variância média de  $f_d$  associado ao método de ajuste ( $VAR_{FD}$ ) em função do número espectros utilizados nas integrações incoerentes ( $NICH$ ) para  $SNR=8$ dB. As integrações incoerentes analisadas estão em azul e a curva logarítmica ajustada está em vermelho.

Tabela 2 – Tabela dos parâmetros  $\varepsilon$ ,  $\psi$  e  $R$ , em função de  $SNR$ .

<i>SNR</i> (dB)	$\varepsilon$	$\psi$	<i>R</i>
1	-0.97318	2.17306	-0.99808
2	-1.00728	1.85938	-0.99987
4	-1.02404	1.56969	-0.99989
6	-1.03042	1.41975	-0.99975
8	-1.03423	1.32224	-0.99960
10	-1.03582	1.24859	-0.99956
20	-1.04168	1.05430	-0.99928
40	-1.04538	0.89636	-0.99914
60	-1.05142	0.83575	-0.99882
80	-1.05481	0.79782	-0.99864
100	-1.05815	0.77545	-0.99851

Uma simples visualização na Tabela 2 demonstra que o parâmetro  $\varepsilon$  não é função nem de *SNR*, nem de *NICH*. Este termo,  $\varepsilon$ , apresenta-se numa forma quase unitária, demonstrando que a variância do parâmetro  $f_d$  estimado é inversamente proporcional ao número de integrações incoerentes aplicadas. A redução de  $\psi$  com o aumento de *SNR* foi analisada objetivando sua quantificação. A relação matemática linear entre os logaritmos naturais destes dois parâmetros (pontos azuis) é apresentada na Fig. 5.3. De forma a quantificar esta relação, foi realizada o ajuste do gráfico por uma reta (traço vermelho), através da seguinte relação:

$$\psi = SNR^\alpha \cdot e^\beta, \quad 1 \leq SNR \leq 100, \quad (5.3)$$

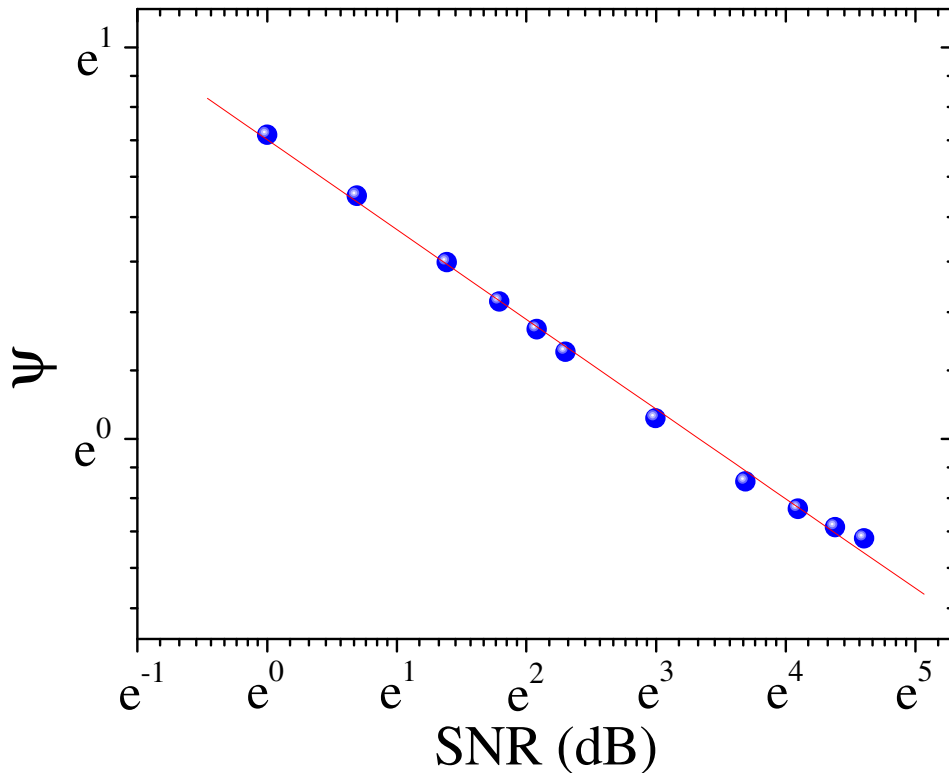


Fig. 5.3 – Parâmetro  $\psi$  associado à variância média de  $f_d$  associado em função de relação sinal-ruído ( $SNR$ ). Os valores do parâmetro analisadas estão em azul e a curva logarítmica ajustada está em vermelho.

O coeficiente de potência  $\alpha$  resultou em  $-0.2293 (\pm 0.00416)$ . O fator  $\beta$  resultou em  $0.76434 (\pm 0.01221)$ . E o coeficiente de correlação  $R$  resultou em  $-0.99853$ . Utilizando uma álgebra simples de logaritmos, podemos chegar à equação final, a qual mostra a dependência da variância do  $f_d$  ajustado com a relação sinal-ruído ( $SNR$ ) e o número de integração incoerentes ( $NICH$ ), dado por:

$$VAR_{fd} = NICH^\epsilon \cdot e^{e^\beta \cdot SNR^\alpha} \quad (5.4)$$

A Eq. 5.4 nos mostra o comportamento da variância de  $f_d$  para alguns casos esperados:

- quando não há integrações incoerentes ( $NICH=1$ ), a variância irá depender apenas da relação sinal-ruído;
- o aumento da variância é inversamente proporcional a  $NICH$ ; e
- que  $SNR \cong 0$  faz com que a variância de  $f_d$  dependa somente de  $NICH$ .



Embora todos os benefícios que a integração incoerente resulta, devemos ter cuidado com a resolução temporal de nossos dados. Por exemplo, integrando incoerentemente dez vezes, significa um aumento de dez vezes na resolução temporal. Assim, no caso de um espectro obtido a cada 6 s, após a integração, teríamos um a cada 60 s. Isso faz com que a escolha do número de integrações incoerentes seja um compromisso entre a variância da frequência Doppler e a resolução temporal. Altos valores de NICH irão sempre fornecer melhores valores para esta variância, contudo podem comprometer a escala temporal dos dados.

## CAPÍTULO 6

### 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 DEPFD – 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.

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 estimação 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 estimação do centro de distribuição de frequência consideravelmente, porém, como foi mostrado no presente estudo, poderia conduzir a uma resolução temporal indesejável. Para quantificar esta relação, foi derivada uma equação matemática, que relaciona a variância da frequência Doppler estimada, o

número de integrações incoerentes e a relação sinal-ruído da série temporal. 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. Este trabalho aqui apresentado foi submetido e aceito para revista *Brazilian Journal of Geophysics* sob o título *Statistical Study of Incoherent Integration Applied to Simulated Power Spectra of Radar Signals Backscattered from Equatorial Electrojet Irregularities*, devendo ser publicado em 2007.

Por fim, o bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT na época, 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 o cronograma estabelecido no Projeto, no que lhe coube.

Atualmente, o ex-bolsista, Henrique Carlotto Aveiro, está graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, e faz parte do Corpo Docente do Curso de Pós-graduação em Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - MCT. E, mesmo antes de ingressar no programa de mestrado já tem um trabalho submetido, revisado por revisores internacionais, aceito e aguardando publicação em uma conceituada revista em sua área de atuação.

## 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.
- Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Harper & Row, 1982.
- Bard, Y. *Nonlinear Parameter Estimation*. Academic Press University Press, 1974.
- 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.
- Fejer, B. G; Kelley, M. C. *Ionospheric Irregularities*. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 18, p. 401- 454, 1980.

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

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.

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

Zrnica, D. S., Estimation of spectral moments of weather echoes. **IEEE Transactions of Geoscience on Electronics**, v.17, p.113-128, 1979.