



**ESTUDOS DO PLASMA IONOSFÉRICO NA REGIÃO DA
ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL**

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

PROCESSO: 105427/2006-3

Juliano Moro (UFSM, Bolsista INPE – CNPq/MCT,
Fevereiro – Julho 2007)

E-mail: juliano@lacesm.ufsm.br

Tiago Jaskulski (UFSM, Bolsista Agosto 2006 – Janeiro 2007)

E-mail: tiagojk@lacesm.ufsm.br

Dr. Polinaya Muralikrishna (Orientador - DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: murali@dae.inpe.br

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

E-mail: denardin@dae.inpe.br

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

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Julho de 2007



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título:

ESTUDOS DO PLASMA IONOSFÉRICO NA REGIÃO DA ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

Processo CNPq N°: 105427/2006-3

Bolsista no período de Fevereiro/07 a Julho/07:

Juliano Moro

Curso de Física (Licenciatura)

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

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

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Bolsista no período de Agosto/06 a Janeiro/07:

Tiago Jaskulski

Curso de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

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

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Polinaya Muralikrishna

Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE - MCT

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

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT



Co-Orientadores:

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

Dr. Clezio Marcos Denardini - Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

Colaboradores:

Henrique Carlloto Aveiro – UFSM

Lílian Piecha Moor - UFSM

César Augusto Daroit – UFSM

Eduardo Ceretta Dalla Favera - UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre –

LSIANT/CRS/CIE/INPE-MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório
de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM



Estudante: Juliano Moro - Windows Internet Explorer

http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalheest.jsp?est=5368363669266429

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

Estudante
Juliano Moro

[Link para Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#) [Indicadores de produção C, T & A](#)

Dados gerais

Identificação do estudante

Nome: Juliano Moro
Nível de treinamento: Graduação
Currículo Lattes: 25/04/2007 12:04
E-mail: juliano@lattes.ufsm.br
Homepage:

Grupos de pesquisa que atua na instituição

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

Linhas de pesquisa que atua

[AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)

Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição

[Polinava Muralikrishna](#)

Indicadores de produção C, T & A dos anos de 2001 a 2004

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

Fechar



Recursos humanos	
Pesquisadores	Total: 26
Ademar Michels	Jean Carlo Santos
Alan Prestes	Jean Pierre Raulin
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez	Joao Paulo Minussi
Alisson Dal Lago	Mangalathayil Ali Abdu
Barclay Robert Clemesha	Marcelo Barcelos da Rosa
Clezio Marcos De Nardin	Nain Babulal Trivedi
Cristiano Max Wrasse	Natanael Rodrigues Gomes
Delano Gobbi	Nelson Jorge Schuch
Eurico Rodrigues de Paula	Osmar Pinto Junior
Ezequiel Echer	Otavio Santos Cupertino Durão
Fábio Augusto Vargas dos Santos	Polinaya Muralikrishna
Fernando Luis Guarnieri	Severino Luiz Guimaraes Dutra
Hisao Takahashi	Walter Demetrio Gonzalez Alarcon
Estudantes	Total: 25
Carlos Roberto Braga	Marcelo dos Santos Zastawny
Cassio Espindola Antunes	Marcos Vinicius Dias Silveira
Cézar Augusto Daroit	Mateus Sabadi Schuh
Cleomar Pereira da Silva	Micael da Silva Bacellar
Cristiano Sarzi Machado	Nikolas Kemmerich
Eduardo Ceretta Dalla Favera	Pablo Fernando Carlesso
Fagner Chagas Rother	Rafael Lopes Costa
Jean Carlos Daroit	Rodrigo Gerlach Silva
Jose Fernando Thuorst	Samuel Martins da Silva
Josemar de Siqueira	Sandro Fettermann Bertagnoli
Juliano Moro	Silvano Lucas Prochnow
Lilian Piecha Moor	Tiago Jaskulski
Lucas Lopes Costa	
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	



AGRADECIMENTOS

O Bolsista aproveita para agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, assim como ao Coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPQ/MCT, pela oportunidade para desenvolver seu potencial acadêmico através deste projeto de Iniciação Científica. Agradece também ao Orientador do Projeto, Dr. Polinaya Muralikrishna, Pesquisador AIII do DAE/CEA/INPE-MCT, pela atenção e ajuda prestada com suas sugestões e correções aos trabalhos desenvolvidos pelo Bolsista. Da mesma forma ao Dr. Clezio Marcos De Nardin, Pesquisador Adjunto do DAE/CEA/INPE-MCT e Co-Orientador do projeto, que com seu rigor científico sempre motivou o Bolsista a procurar evoluir seus trabalhos, tanto no conteúdo quanto na forma. De forma especial, fica o agradecimento ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador AIII do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE-MCT e Co-Orientador do Projeto, que através do seu exemplo e com sua orientação pessoal mostrou aquilo que é o mais importante na vida, de forma que o Bolsista sempre procura estar em busca desse objetivo. Aos colegas de Laboratório, Henrique Carlotto Aveiro, Lílian Piecha Moor, Juliano Moro, César Augusto Daroit e Eduardo Ceretta, pela ajuda com sugestões, explicações e descontração durante o trabalho. Ao Prof. Kazuo Makita, que mesmo com as dificuldades idiomáticas entre ambos, contribuiu muito com o Bolsista através de explicações sobre o equipamento e a redução dos dados. Por fim, o Bolsista agradece a sua Família, que mesmo distante e com poucas visitas, é a base da sua vida.



SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	12
CAPÍTULO 1	13
ATIVIDADES TÉCNICAS CIENTÍFICAS DESENVOLVIDAS NO PROJETO PELO BOLSISTA SUBSTITUÍDO – TIAGO JASKULSKI	13
INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 2	16
IONOSFERA TERRESTRE	16
2.1 Introdução	16
2.2 Camadas Ionsféricas	19
2.2.1 Camada D	19
2.2.2 Camada E.....	19
2.2.3 Camada F.....	20
CAPÍTULO 3	21
CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE E ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL	21
3.1 Campo Magnético Terrestre	21
3.2 Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (AMAS)	24
3.3 Cinturões de Radiação de Van Allen	25
3.4 Tempestades e Sub-Tempestades Geomagnéticas	26
CAPÍTULO 4	28
ESTUDO DO PLASMA IONOSFÉRICO COM RIÔMETROS	28
4.1 Riômetros	28
CAPÍTULO 5	33
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE A VIGÊNCIA DA BOLSA	33
CAPÍTULO 6	40
ATIVIDADES TÉCNICAS CIENTÍFICAS DESENVOLVIDAS NO PROJETO PELO BOLSISTA SUBSTITUTO – JULIANO MORO	40
INTRODUÇÃO	41
6.1 A Ionosfera Terrestre	41
6.1.1 – Ionosfera Terrestre	42
6.1.2 – Produção Iônica	42



6.1.3 – Foto-ionização	43
6.1.4 – Ionização por Impacto	43
6.1.5 – Perda de Ionização	43
6.1.6 – Recombinação Química	44
6.1.7 – Transporte Vertical	44
6.2 – Regiões Ionosféricas	44
6.2.1 – Região D	45
6.2.2 – Região E	46
6.2.3 – Região F ₁	46
6.2.4 – Região F ₂	47
6.3 – Condutividade Ionosférica	47
6.4 – Teoria do Dínamo Atmosférico da Região E	48
<i>CAPÍTULO 7</i>	50
7.1 – Riômetro	50
7.1.2 – Técnica dos Riômetros	50
Revisão Bibliográfica	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Camadas da atmosfera de acordo com a altitude.....	17
Figura 2.2: Camadas da ionosfera e suas respectivas densidades eletrônicas.....	18
Figura 3.1: Representação do Campo Geomagnético.....	22
Figura 3.2: Intensidade Total do Campo Geomagnético.....	23
Figura 3.3: Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul em vermelho.....	25
Figura 3.4: Cinturões de Radiação de Van Allen.....	26
Figura 4.1: Diagrama de blocos simplificado de um Riômetro.....	28
Figura 4.2: Exemplo de uma curva do dia quieto (vermelho) e a comparação com um sinal atenuado pela ionosfera (preto).....	30
Figura 4.3: Projeção das antenas do riômetro imageador a 100 km de altitude.....	31
Figura 4.4: Fotografia das antenas do riômetro imageador no Observatório Espacial do Sul, São Martinho da Serra, RS.....	31
Figura 4.5: Localização dos riômetros no Cone-Sul.....	32
Figura 6.1: Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.....	42
Figura 6.2: À esquerda, localização das três camadas ionosféricas. E à direita, a dimensão aproximada da Ionosfera.....	45
Figura 7.1: Exemplo de uma curva do dia quieto.....	51
Figura 7.2: Sistema Riômetro Convencional.....	52
Figura 7.3: Antenas dipolos.....	53



CAPITULO 1

1ª PARTE

ATIVIDADES TÉCNICAS CIENTÍFICAS DESENVOLVIDAS NO PROJETO PELO BOLSISTA SUBSTITUÍDO – TIAGO JASKULSKI



INTRODUÇÃO

Apresentamos neste relatório final de atividades realizadas no Projeto Estudos do Plasma Ionosférico na Região da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (Processo nº 105427/2006-3) com vigência de Agosto de 2006 a Julho de 2007. No período de Agosto de 2006 a Fevereiro de 2007 as atividades foram realizadas por Tiago Jaskulski, aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Bolsista de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCT. Em Fevereiro de 2007 houve a troca de bolsistas, sendo que Juliano Moro, Aluno do Curso de Física da UFSM assumiu a titularidade da Bolsa no período de Fevereiro de 2007 a Julho de 2007. A primeira parte deste relatório é de autoria de Tiago Jaskulski referente ao período em que foi bolsista, e a segunda parte é de autoria de Juliano Moro.

O objetivo deste projeto é observar a variação da absorção ionosférica de ondas de rádio de origem cósmica a partir do equipamento “Riômetro” instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS, com o estudo e o desenvolvimento da pesquisa, redução, análise e interpretação de dados, no Laboratório de Sondagem Ionosférica e Atmosfera Neutra Terrestre, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE - MCT, em Santa Maria, RS. Obtendo assim dados experimentais a fim de estabelecer a relação entre a absorção ionoférica do ruído cósmico e o fluxo de partículas energéticas observadas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. E a partir dos resultados obtidos, divulgar estudos científicos.

No Capítulo 2 iniciamos com uma revisão bibliográfica e a discussão da teoria básica para o entendimento da Ionosfera Terrestre e dos eventos físicos e químicos que podem ocorrer nesta parte da atmosfera. No Capítulo 3 apresentamos um breve estudo sobre o Campo Magnético Terrestre e a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), tratando a respeito da sua origem, manutenção e influência sobre a Ionosfera. No quarto



Capítulo é descrita a metodologia de pesquisa através do Riômetro Imageador instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS. No quinto Capítulo são apresentadas as atividades desenvolvidas pelo bolsista durante o período de Agosto de 2006 a Fevereiro de 2007. E finalmente no Capítulo 6 apresentamos as conclusões obtidas a partir das atividades realizadas.

CAPÍTULO 2

IONOSFERA TERRESTRE

2.1 Introdução

A Atmosfera Terrestre pode ser dividida em atmosfera neutra e atmosfera ionizada, de acordo com as características dos seus elementos constituintes (Figura 2.1). A atmosfera neutra, como o próprio nome diz, é formada por moléculas de gases em estado neutro. Já a atmosfera ionizada, melhor conhecida como Ionosfera, é constituída por íons moleculares e elétrons livres.

A Ionosfera é uma região eletrizada da atmosfera da Terra formada de íons e de elétrons livres produzidos pelas influências ionizantes da radiação solar e de partículas cósmicas e solares energéticas incidentes. A definição mais usual dada à ionosfera é como a região da atmosfera onde existem elétrons livres em uma quantidade suficiente para interferir na propagação de ondas de rádio. Não existe um limite bem definido entre a atmosfera neutra e ionosfera, sendo que há uma grande variação desse limite durante o dia e a noite. Durante o dia a base da ionosfera situa-se em torno de 60 a 70 km de altitude, e a noite ela situa-se em torno de 90 km.

A origem da ionosfera é a partir da ionização dos elementos neutros constituintes da atmosfera, e por isso mesmo que em larga escala a ionosfera é considerada eletricamente neutra, pois o número de elétrons livres é diretamente proporcional ao número de íons positivos. Esta ionização ocorre principalmente através da absorção de radiação solar na faixa espectral do extremo ultra-violeta (EUV), e dos raios X. A radiação Lyman- α também tem uma importante influência na ionização na base da ionosfera, assim como a precipitação de partículas energéticas.

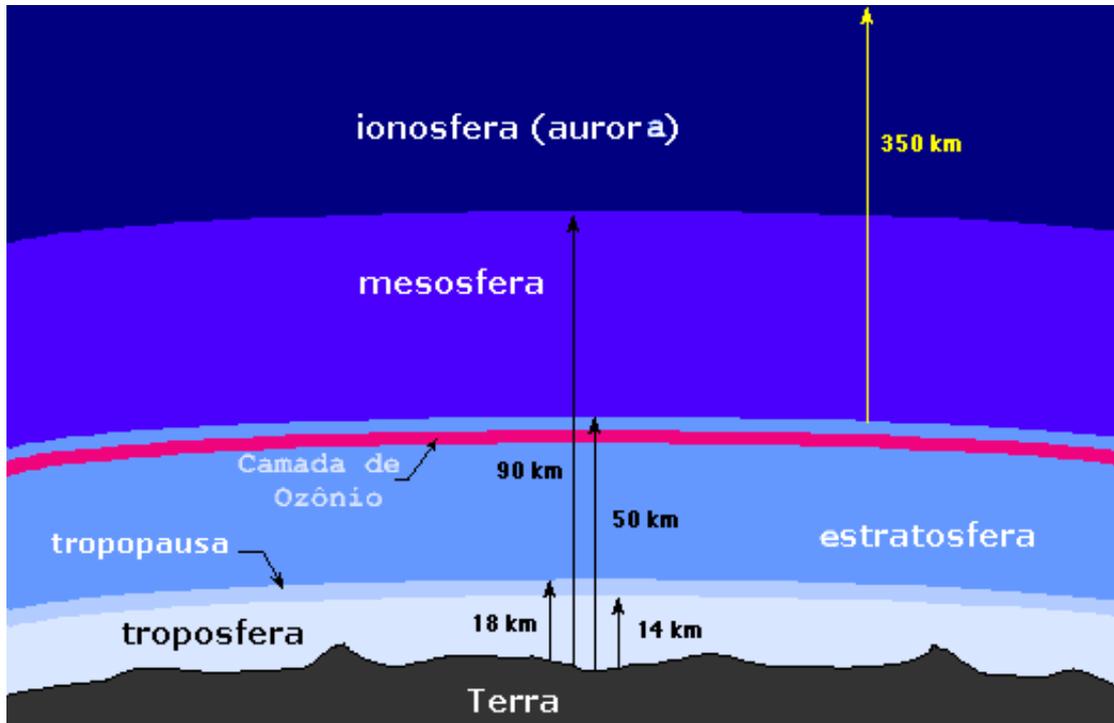


Figura 2.1: Camadas da atmosfera de acordo com a altitude.

A taxa de variação temporal da densidade eletrônica pode ser expressa através da equação da continuidade:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \text{div}(Nv)$$

onde q é a taxa de produção de elétrons, L é a taxa de perda da ionização por recombinação eletrônica, $\text{div}(Nv)$ é a perda de elétrons por transporte e v é a velocidade das partículas ionizadas. A produção q de elétrons é dada por:

$$q = \eta \sigma n I$$

sendo I a intensidade da radiação ionizante no topo da atmosfera, η é a eficiência de ionização, σ é a seção transversal de absorção do gás e n a concentração de átomos

ou moléculas capazes de serem ionizadas por este espectro de radiação (Hargreaves, 1992).

A ionosfera é dividida em três camadas: D, E, F (Figura 2.2). A camada F é subdividida em F1 e F2. Estas divisões levam em consideração os pontos em que ocorrem picos na densidade eletrônica, pois, enquanto que uma determinada radiação penetra na atmosfera, sua produção eletrônica aumenta na medida em que aumenta a densidade atmosférica, até um ponto onde esta radiação produz o máximo de densidade eletrônica.

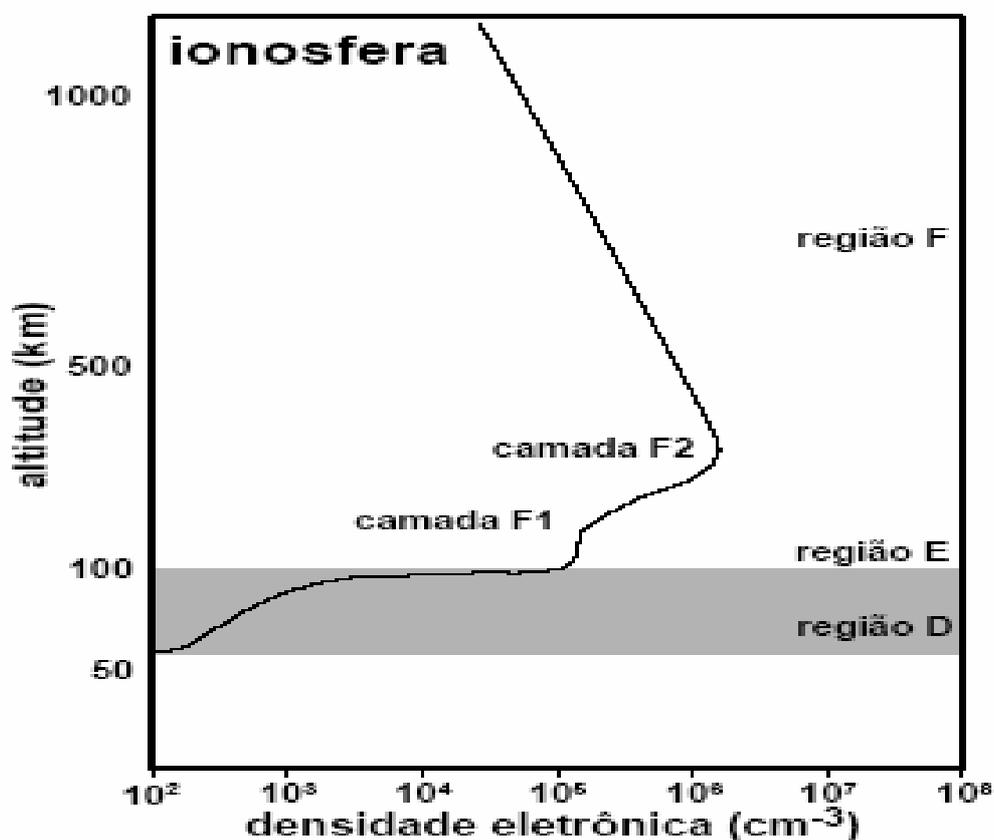


Figura 2.2: Camadas da ionosfera e suas respectivas densidades eletrônicas.

Fonte: modificada de Rishbeth (1969).

2.2 Camadas Ionsféricas

2.2.1 Camada D

A camada ou região D da ionosfera está situada entre algo em torno de 60 e 90 km de altitude. Esta é região limite entre a atmosfera neutra e a ionosfera, e devido a processo turbulentos há uma grande mistura entre os gases neutros e ionizados, ocorrendo uma elevada taxa de perdas. Os elétrons livres presentes nesta camada podem se combinar com as moléculas neutras, e desta maneira formar íons negativos. Este processo é conhecido como attachment e ocorre principalmente a noite, consequentemente acarreta no desaparecimento desta região. As suas principais fontes de ionização são a radiação Lyman- α , a radiação na faixa do extremo ultra-violeta (EUV), a radiação na faixa dos Raios X, os raios cósmicos galácticos e as partículas energéticas de origem solar.

2.2.2 Camada E

Parte da ionosfera situada entre os 90 e 140 km, aproximadamente. Nesta região ocorre a formação do fenômeno Eletrojato Equatorial, que é uma corrente eletrônica restrita à região ao longo do equador magnético. Sua principal fonte de ionização são radiação na faixa do extremo ultra-violeta (EUV) e os raios X moles. Esta região depende fortemente da radiação solar e de características como posição solar em relação ao zênite. A partir dos 100 km existe um camada ionizada densa, com espessura em torno de 20 km e com vários quilômetros de extensão chamado de camada E esporádico.



2.2.3 Camada F

Esta camada se subdivide em F1 e F2. A camada F1 está entre 140 e 200 km de altitude e é formada principalmente a partir da ionização solar com radiação na faixa do extremo ultra-violeta (EUV). Esta região ocorre somente de dia pois depende do ângulo zenital solar.

A camada F2 situa-se entre 200 e 1000 km de altitude e possui densidade eletrônica máxima entre 250 e 400 km. Esta é a região que possui a maior densidade eletrônica entre todas as camadas da ionosfera, mesmo durante a noite.

CAPÍTULO 3

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE E ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

3.1 Campo Magnético Terrestre

A Terra possui um campo magnético que a envolve e se estende pelo espaço interplanetário (Figura 3.1). Esta região do espaço é chamada de Magnetosfera. Podemos considerar o nosso Planeta como um gigantesco imã, com seus dois pólos, o norte e o sul, localizados próximos aos pólos geográficos. Uma das conseqüências do Campo Magnético da Terra pode ser sentida ao manusear uma bússola, pois esta se alinhará com os pólos magnéticos. Outro efeito conhecido do Campo Geomagnético é a sua grande influência sobre o movimento de íons e elétrons livres que estão presentes na ionosfera e na região espacial em que o Planeta encontra-se. As partículas energéticas vindas com o Vento Solar têm sua trajetória alterada e modulada em virtude da presença do campo magnética, impedindo a incidência direta de tais partículas. Outra característica importante é a forma que o Campo Magnético pode afetar a propagação de ondas eletromagnéticas na ionosfera, transformando este meio em anisotrópico (condutividade ionosférica tensorial).

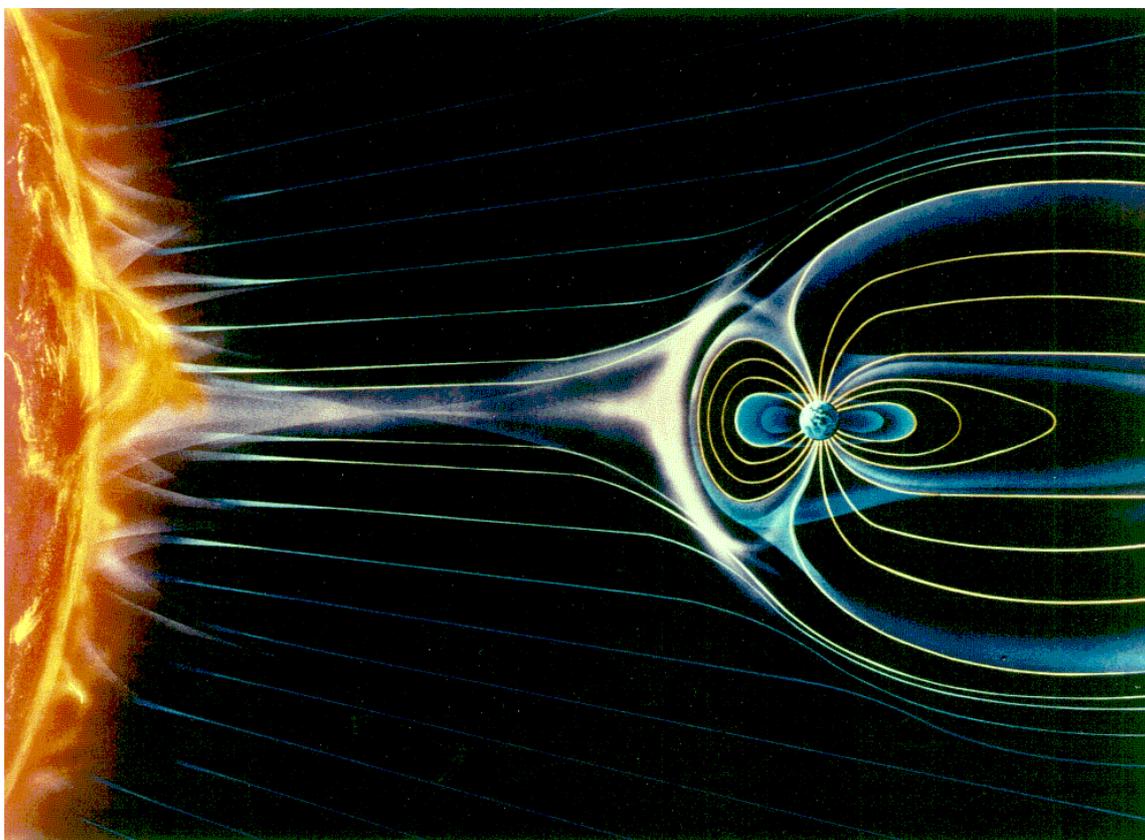


Figura 3.1: Representação do Campo Geomagnético

Fonte: http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Figuras/Vento_Solar.gif

A principal origem do Campo Magnético Terrestre, cerca de 99%, é a partir do núcleo do Planeta. Como o magma existente no interior do Planeta possui altíssimas temperaturas, ele pode ser considerado um plasma, sendo que possui dois movimentos característicos. Um dos movimentos possui a tendência vertical e é provocado pela diferença de temperatura existente entre as camadas do núcleo, e isto faz com que o magma líquido estabelecido na camada externa do núcleo suba ao topo do manto e então se resfrie, e desta forma ficando mais denso e tornando a descer, estabelecendo um ciclo. O outro movimento característico possui tendência horizontal e é causada pela rotação do planeta, que resulta da força de Coriolis. Este processo de movimentação do magma gera uma indução eletromagnética, pois um plasma em movimento origina uma corrente

elétrica, e esta por sua vez, devida a sua grande intensidade, gera o Campo Geomagnético. Este fenômeno é conhecido como Dínamo Hidromagnético. Em menor escala, a ionosfera também contribui para a manutenção do campo geomagnético a partir da geração de correntes elétricas ionosféricas.

Os movimentos do magma e conseqüentemente das correntes elétricas que fluem no interior do Planeta podem ser descrito como um sistema caótico, pois é extremamente instável, o que gera muitas anomalias ao longo da superfície Terrestre. Na Linha do Equador o campo magnético possui em média cerca de 30000 nT, e nos pólos da Terra pode ser dado com sendo em média 60000 nT (Figura 3.2). Mas as anomalias podem apresentar grandes variações na escala nanoteslas e alcançar milhares de quilômetros de extensão. Outro fator que pode gerar anomalias em escalas bem menores é a distribuição não uniforme de materiais magnéticos próximos a Crosta Terrestre.

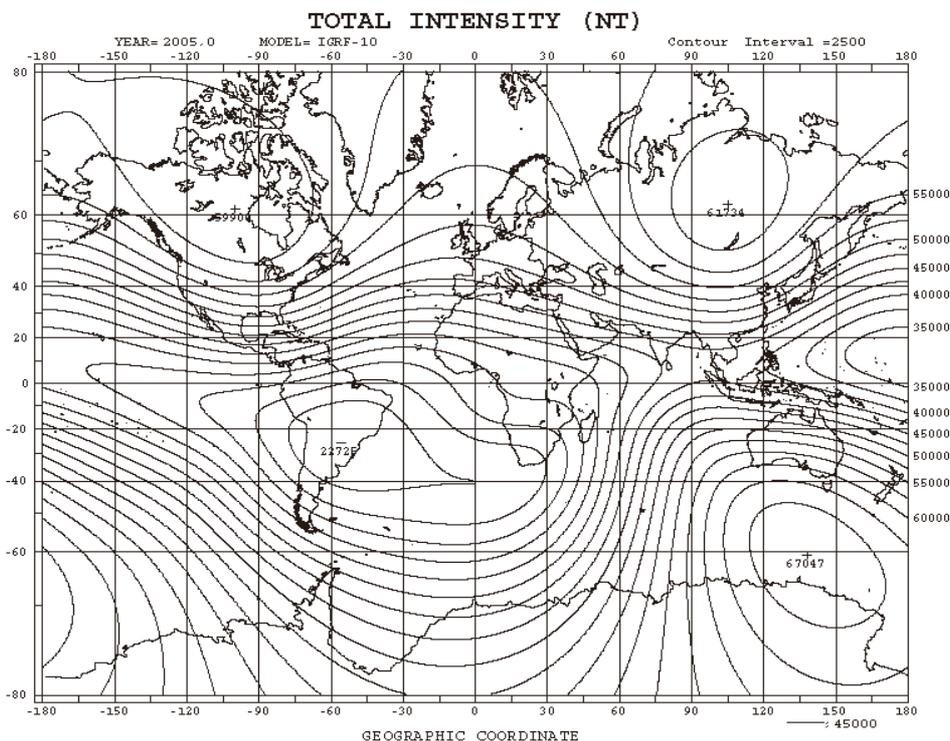


Figura 3.2 - Intensidade Total do Campo Geomagnético

Fonte: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/t-m.gif>

3.2 Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (AMAS)

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) é uma pequena porção do planeta que apresenta o campo magnético terrestre com uma intensidade muito baixa. Esta anomalia está situada na região do Atlântico Sul e sobre o sul da América do Sul (Figura 3.3) e foi descoberta somente na década de 1950. Na parte central da anomalia a intensidade está em torno de 23000 nT, o que pode ser considerado o mínimo global. A AMAS não é estática e atualmente está em lento movimento para o oeste. Sua origem está ligada a distribuições assimétricas de correntes elétricas no magma fluído do interior da Terra, de forma que, localmente é gerado um campo magnético oposto ao campo principal da Terra, e conseqüentemente o campo geomagnético é enfraquecido nesta região.

Em virtude do campo magnético nesta região ser mais fraco, há um contínuo fluxo de partículas energéticas precipitando-se, contribuindo para a ionização da Ionosfera terrestre e produzindo efeitos semelhantes aos que ocorrem nas regiões polares aurorais. A menor intensidade do campo geomagnético, e conseqüentemente a menor rigidez magnética desta região facilita a entrada de partículas energéticas provenientes do sol e aprisionadas nos Cinturões de Radiação de Van Allen. O ponto de reflexão das partículas aprisionadas, que estão espiralando nas linhas do campo geomagnético, sobre a AMAS é aproximadamente 100 km de altitude, enquanto que no local que é o conjugado magnético no hemisfério norte, esta altitude é em torno de 600 km. Esta é a região onde o Cinturão Interno de Radiação está mais próximo da superfície terrestre, e então as partículas energéticas (prótons e elétrons) precipitam e ionizam os constituintes atmosféricos. A precipitação é bastante intensificada em períodos de tempestades magnéticas. Principalmente em períodos de máximo solar do ciclo solar como resposta direta ao aumento das ejeções de massa coronal e do vento solar, que ocasionam as chamadas Tempestades e Sub-Tempestades Magnéticas em maior quantidade e intensidade durante tais períodos.

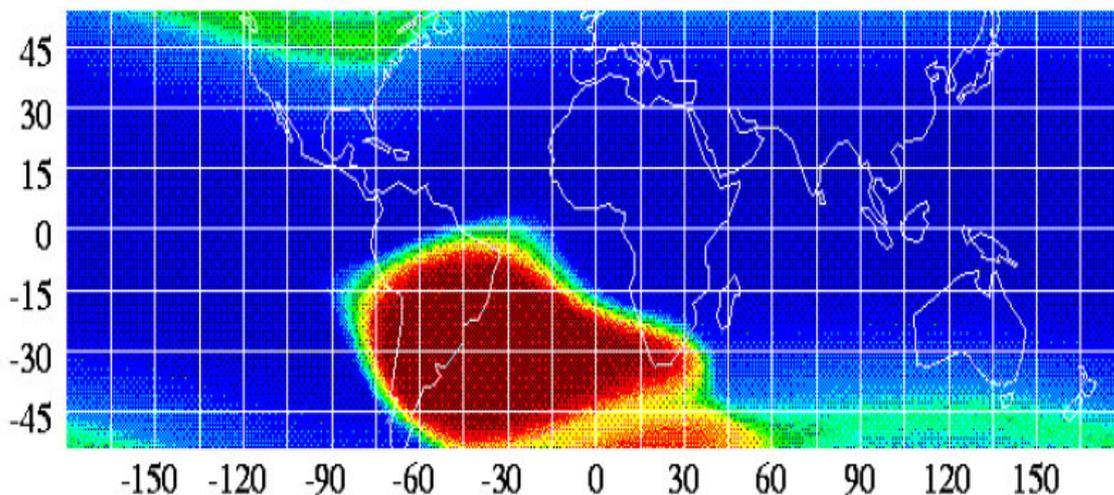


Figura 3.3: Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul em vermelho.

Fonte: Guimarães, R. C.; Silva, C. E.

3.3 Cinturões de Radiação de Van Allen

O Cinturões de Van Allen é a região do espaço próximo ao planeta, onde ocorre o aprisionamento e a concentração de partículas nas linhas do campo geomagnético. Recebe este nome por ter sido descoberto, em 1958, por James Van Allen. Esta região é formada por dois cinturões, sendo um o cinturão interno, situado entre 1000 e 5000 km de altitude, e o segundo cinturão situado entre 15000 e 30000 km de altitude (Figura 3.4).

No cinturão interno estão presentes principalmente prótons e elétrons com altos níveis de energia. Quando raios cósmicos se chocam contra os constituintes atmosféricos, ocorre a desintegração de átomos, e uma parte dos nêutrons é ejetada para fora da atmosfera, onde decaem em prótons e elétrons na região do cinturão, sendo aprisionadas pelo campo magnético. Estas partículas acabam espiralando ao longo das linhas de campo geomagnético. No cinturão externo estão presentes partículas eletricamente

carregadas de origem atmosférica e solar, principalmente íons de hélio trazidos no Vento Solar.

Durante períodos de atividade solar mais intensa, há um aumento no fluxo de partículas eletricamente carregadas trazidas pelo Vento Solar, e estas, quando conseguem romper a barreira formada pelos Cinturões de Radiação de Van Allen, originam fenômenos como as auroras polares e as tempestades magnéticas.

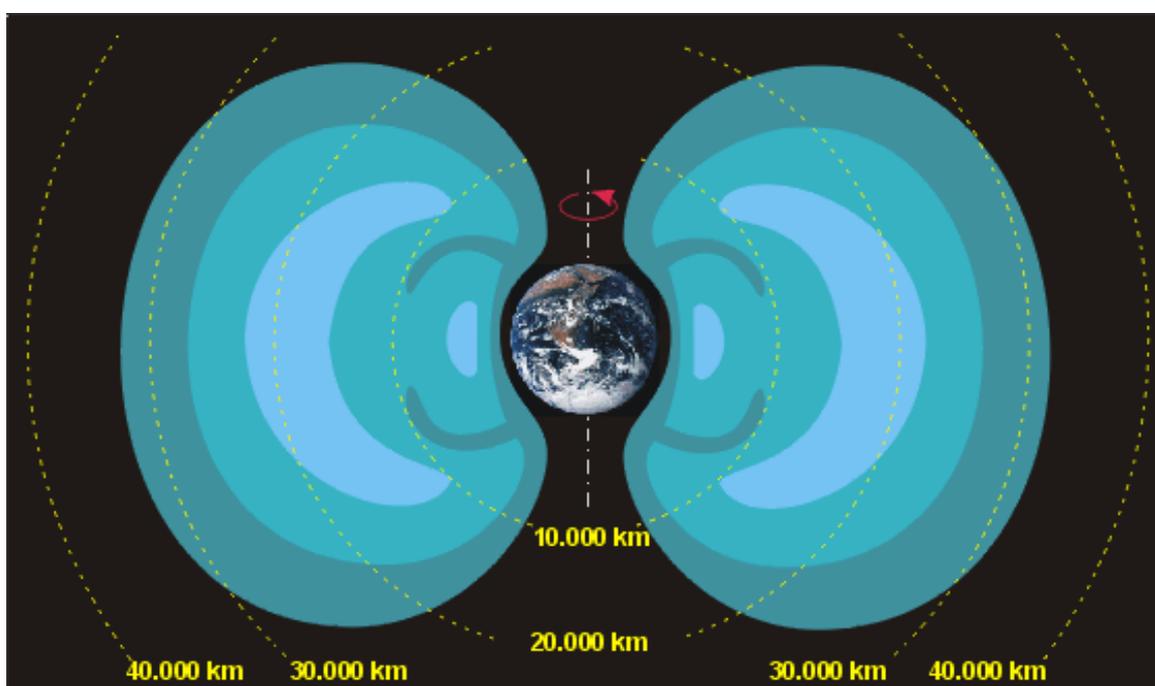


Figura 3.4: Cinturões de Radiação de Van Allen.

Fonte: <http://www.aeb.gov.br/multimedia/satelites/vanallenguertel.gif>

3.4 Tempestades e Sub-Tempestades Geomagnéticas

O Sol está continuamente emitindo radiação e partículas carregadas. A emissão dessas partículas, que podem ser elétrons, prótons e subpartículas, recebe o nome de vento

solar. Próximo ao nosso planeta a velocidade das partículas é varia de 400 a 800 km/s, com uma densidade próxima de 10 partículas por centímetro cúbico. O Sol é instável e frequentemente ocorrem explosões solares, que são erupções de plasma solar para o meio interplanetário. Quando as erupções do Sol são violentas, podem resultar em tempestades e sub-tempestades geomagnéticas na Terra, que influem diretamente no clima espacial do planeta. As explosões são bastante intensificadas durante o período de máximo solar do ciclo de 11 anos.

Tempestades Geomagnéticas são alterações que ocorrem na magnetosfera quando uma seqüência de eventos ocorrem após um explosão solar. Numa explosão solar há grande emissão de raios-X, radiação ultravioleta e partículas de alta energia. Com isso, a densidade de partículas presente no vento solar aumenta. Se o campo magnético interplanetário estiver numa configuração adequada, e se esse evento for suficientemente longo, o vento solar pode comprimir o campo geomagnético e transferir parte de sua energia para a magnetosfera, dando principio a uma tempestade geomagnética. As partículas carregadas então penetram na magnetosfera e são armazenadas na ionosfera equatorial, nos Cinturões de Radiação de Van Allen, onde originam a corrente de anel, “ring current”. A partir disso uma série de distúrbios ocorrem na ionosfera como a precipitação de partículas e as auroras polares. Estas tempestades podem alcançar variações de centenas nT e afetar os sistemas de distribuição de energia elétrica, sistemas de telecomunicação e danificar satélites.

As Sub-Tempestades Geomagnéticas são menos intensas que as tempestades, embora ocorram com maior frequência. Sua origem está ligada as correntes de campo que fluem na região auroral. Quando o balanço dinâmico da energia destas correntes se torna instável, ocorrendo o transporte de energia da interação entre o vento solar e a magnetosfera para as auroras e a ionosfera, surgem as sub-tempestades que alcançam variações da ordem dos 40 nT.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DO PLASMA IONOSFÉRICO COM RIÔMETROS

4.1 Riômetros

Um riômetro (do inglês *Riometer: Radio Ionosphere Opacity METER*) trata-se de uma importante ferramenta para sondagens ionosféricas que é usado desde a década de 50. Os riômetros instalados no mundo normalmente captam os sinais em frequências que variam de 20 MHz a 50 MHz e investigam principalmente a absorção na baixa ionosfera (camadas D e E) situada na faixa dos 80 km a 130 km. Sucintamente trata-se de um rádio receptor muito sensível que mede o nível de ruído cósmico incidente sobre a superfície terrestre.

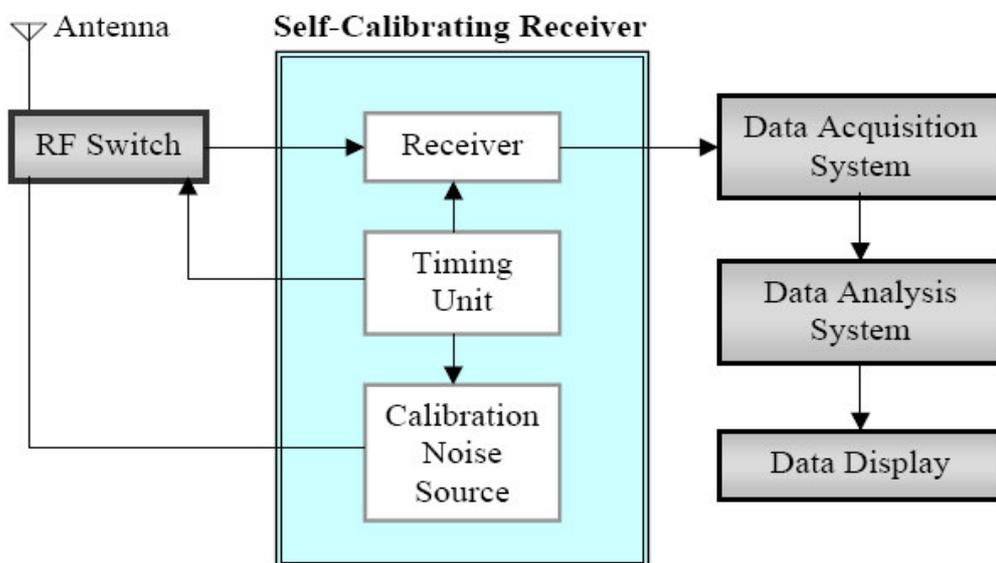


Figura 4.1: Diagrama de blocos simplificado de um Riômetro.

Por ruído cósmico entende-se a radiação eletromagnética proveniente das mais diversas fontes no espaço. Para um dado ponto do espaço, fora da interferência da atmosfera terrestre, podemos considerar o sinal do ruído cósmico possui uma intensidade constante, mas quando o ruído cósmico atravessa a atmosfera parte da energia da onda é dissipada na ionosfera sob a forma de energia cinética transferida aos elétrons livres. Portanto, quanto maior for densidade eletrônica na ionosfera maior será a absorção do sinal de ruído cósmico.

Como o ruído cósmico incidente sobre superfície terrestre depende apenas da direção que ela aponta no espaço, ou seja, depende apenas que superfície terrestre cubra a mesma faixa do céu a cada dia, a variação do ruído cósmico repete-se a cada dia sideral. Mas não é possível ter o nível do ruído cósmico sobre a superfície terrestre sem a absorção ionosférica, pois ela está sempre presente. Então se determina através de métodos estatísticos uma curva com o nível de intensidade do ruído cósmico mais alto captado no riômetro ao longo de vários dias de dados, que se refere a um período magneticamente calmo, com pouca absorção. Esta curva é tomada como padrão para comparação com os dados daqueles dias magneticamente perturbados, em que há maior atenuação do ruído cósmico que chega ao riômetro. Tal curva é chamada Curva do Dia Quietou ou QDC (Quiet Day Curve) (Figura 4.2).

O nível de absorção é dado pela razão entre o sinal recebido sem absorção (QDC) e o atual sinal recebido. Normalmente a intensidade do ruído cósmico é dada em decibéis e é calculado através da seguinte equação:

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} (A_{\text{QDC}}/A_{\text{DIA}})$$

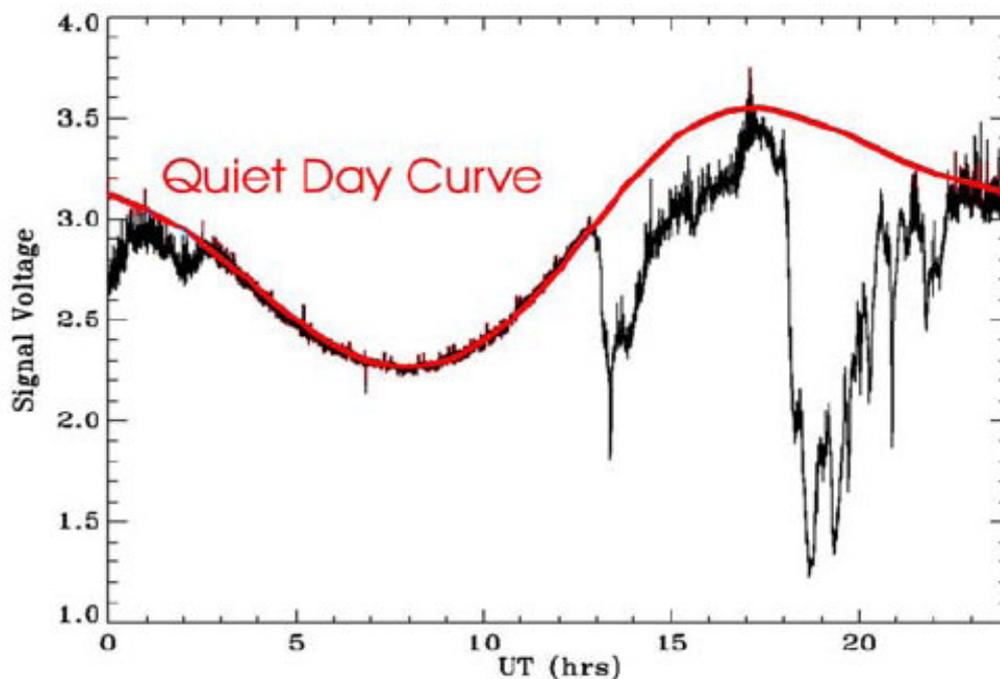


Figura 4.2: Exemplo de uma curva do dia quieto (vermelho) e a comparação com um sinal atenuado pela ionosfera (preto).

Assim, a variação da absorção ionosférica de ondas de rádio de origem cósmica vem sendo observada a partir do equipamento Riômetro instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8°W), em São Martinho da Serra, RS.

O riômetro instalado Observatório Espacial do Sul é do tipo imageador, que possui o diferencial de produzir imagens em duas dimensões da absorção e que também é capaz de captar o movimento espacial das irregularidades inosféricas através do seu conjunto de antenas que varre o campo de visão do céu obtendo informações simultâneas de diferentes pontos da ionosfera.

O conjunto de antenas deste riômetro é formado por uma matriz 4x4 (16 antenas dipolo), espaçadas um da outra por uma distância de 1/2 comprimento de onda (~3.93m) e com uma altura a partir do solo de 1/4 de comprimento de onda (~1.96m), e capta sinais em

38,2 MHz. Isto produz 16 feixes que varrem a ionosfera local com um campo de visão de aproximadamente 330x330 km em uma altitude de 100 km (Figura 4.3), tanto na direção norte-sul quanto na direção leste-oeste.

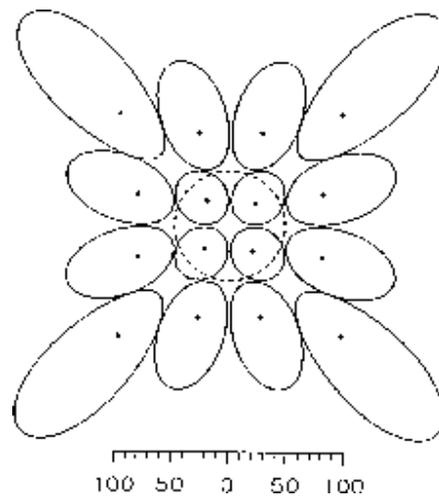


Figura 4.3: Projeção das antenas do riômetro imageador a 100 km de altitude.



Figura 4.4: Fotografia das antenas do riômetro imageador no Observatório Espacial do Sul, São Martinho da Serra, RS.

Para complementar as pesquisas sobre fluxo de partículas energéticas observadas na região de Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul, recentemente foram instaladas mais dois riômetros imageadores nesta região: um foi instalado em Concepcion (Chile) (37.5°S , 72.7°W) que fica situada a oeste de Santa Maria e outro foi instalado em Punta Arenas (Chile) (53.1°S , 71.0°W), ao sul de Santa Maria (Figura 4.5). Isto permitirá determinar a escala espacial da variação de absorção e o movimento do plasma ionosférico ao longo da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul.

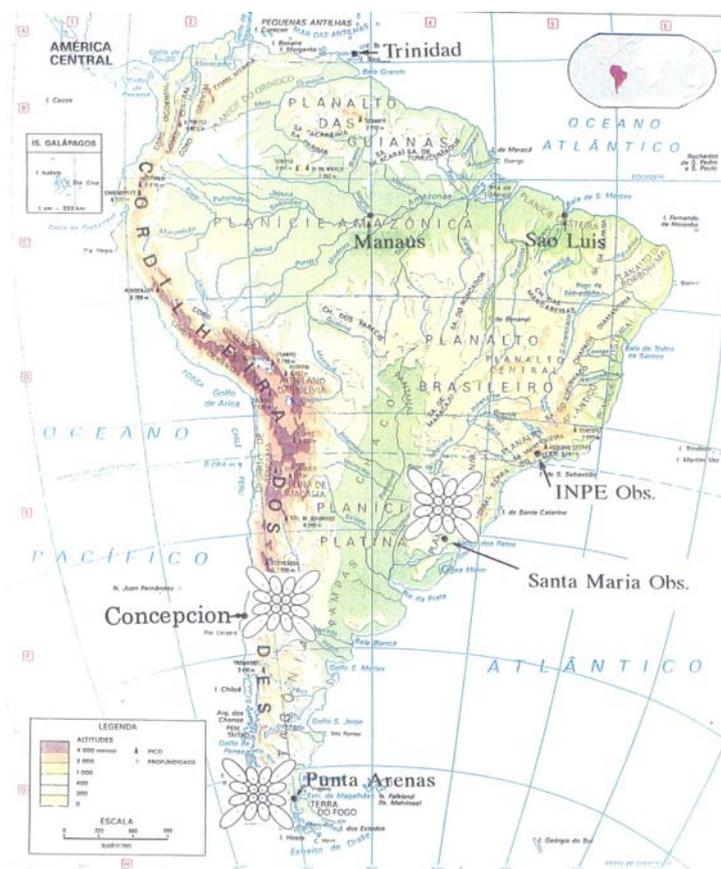


Figura 4.5: Localização dos riômetros no Cone-Sul.

CAPÍTULO 5

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE A VIGÊNCIA DA BOLSA

A vigência da bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq – INPE iniciou em Agosto/06. O trabalho do bolsista começou com a revisão bibliográfica sobre a Ionosfera, campo magnético terrestre, Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e assuntos relacionados. Estes foram estudados através de livros como: Introdução à Geofísica Espacial, The Earth's Ionosphere e The Physics of the Lower Ionosphere. E principalmente através de artigos em revistas técnicas especializadas e em artigos pesquisados na Internet.

Uma das dificuldades do bolsista é com relação ao idioma Inglês que ainda não é totalmente dominado e que é o idioma em que está escrito a maior parte da bibliografia.

Em Agosto/06 o Bolsista conheceu pessoalmente, em Santa Maria, o Pesquisador Dr. Kazuo Makita que é um dos Principais Investigadores, juntamente com o Prof. Masanori Nishino, aposentado, das pesquisas com Riômetros Imageadores, VLF e VHF na AMAS, junto ao Observatório Espacial do Sul – OES e no Cone Sul da América do Sul, no Chile, em Concepcion e Punta Arenas. O Bolsista aprendeu muito sobre os equipamentos e sobre o trabalho dos referidos Professores Japoneses.

Em Outubro/06 o Bolsista participou do XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE) onde fez a apresentação oral do trabalho: **“Estudo do Plasma Ionosférico da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) utilizando Riômetros”**. O Bolsista participou do 1º Simpósio Brasileiro de Geofísica e Aeronomia (SBGEA) onde apresentou o pôster: **“Estudos do Plasma Ionosférico na Região da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (amas) utilizando Riômetros”**.

Atualmente o Bolsista é um dos responsáveis pela pesquisa, análise, redução e coleta de dados do Riômetro Imageador em operação no Observatório Espacial do Sul (OES), em São Martinho da Serra, e pela disponibilização dos dados na Internet. O Bolsista está fazendo um estudo aprofundado destes dados, entretanto estão surgindo várias dificuldades com os programas de processamento que foram compilados para serem utilizados em computadores japoneses, o que dificulta a compreensão necessitando de adaptações e/ou inclusive a elaboração de novos programas.

Em Dezembro/06 o Bolsista participou do curso “Programação em IDL” ministrado pelo Pesquisador Dr. Clezio De Nardin da Divisão de Aeronomia do CEA/INPE. Com este Curso o Bolsista pretende construir um programa para análise dos dados de Riômetros, em plataforma IDL.

A partir da redução dos dados, o bolsista está desenvolvendo estudos iniciais da evolução temporal da absorção ionosférica na região da AMAS, entretanto surgiram várias dificuldades com os programas de processamento que foram compilados para serem utilizados em computadores japoneses, o que dificulta a compreensão necessitando de adaptações e/ou inclusive a elaboração de novos programas. Estes estudos foram apresentados pelo bolsista em dois congressos científicos. Durante o período de regência da bolsa o **acadêmico participou de sete trabalhos** científicos publicados, sendo eles:

- **Tiago Jaskulski**; Henrique C. Aveiro; Lílian Piecha Moor; Clezio Marcos Denardini; Polinaya Muralikrishna; Nelson Jorge Schuch, ESTUDO DO PLASMA IONOSFÉRICO DA ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS) UTILIZANDO RIÔMETROS, In: XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e X Feira de Protótipos, 04 a 06 de outubro/2006, Ijuí/RS



- **Tiago Jaskulski**; Henrique Carlotto Aveiro; Lilian Piecha Moor; Clezio Marcos Denardini; Polinaya Muralikrishna; Nelson Jorge Schuch, ESTUDOS DO PLASMA IONOSFÉRICO NA REGIÃO DA ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (AMAS) UTILIZANDO RIÔMETROS, In: 1º Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, São José dos Campos – Brasil, 23 - 26 October 2006.
- Lilian Piecha Moor; Henrique Carlotto Aveiro; **Tiago Jakulski**; Eurico Rodrigues de Paula; Nelson Jorge Schuch, EFEITOS DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS SOBRE SINAIS DE SATÉLITES GPS NO SUL DO BRASIL, In: XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e X Feira de Protótipos, 04 a 06 de outubro/2006, Ijuí/RS.
- Henrique C. Aveiro; **Tiago Jaskulski**; Lilian P. Moor; Laysa Resende; Pedro Almeida; Clezio Marcos Denardini; Mangalathayil A. Abdu; Nelson J. Schuch, METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE RASTROS METEÓRICOS UTILIZANDO RADARES COERENTES, In: XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e X Feira de Protótipos, 04 a 06 de outubro/2006, Ijuí/RS.
- Henrique Carlotto Aveiro; Lilian Piecha Moor; **Tiago Jaskulski**; Clezio Marcos Denardini; Mangalathayil Ali Abdu; Nelson Jorge Schuch, ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE ECOS TIPOS 1 E 2 DE IRREGULARIDADES DO ELETROJATO EQUATORIAL PRÓXIMO AO AMANHECER, In: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, São José dos Campos – Brasil, 23 - 26 October 2006.



- Lilian Piecha Moor; Henrique Carlotto Aveiro; **Tiago Jaskulski**; Clezio Marcos Denardini; Eurico Rodrigues de Paula; Nelson Jorge Schuch, EFEITOS DA TEMPESTADE MAGNÉTICA OCORRIDA EM MAIO DE 2003 SOBRE SINAIS DE SATÉLITES GPS DETECTADOS EM DIFERENTES LATITUDES DO TERRITÓRIO BRASILEIRO, In: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, São José dos Campos – Brasil, 23 - 26 October 2006.
- Lilian Piecha Moor; Henrique Carlotto Aveiro; **Tiago Jaskulski**; Eurico Rodrigues de Paula; Clezio Marcos Denardini; Nelson Jorge Schuch, ANÁLISE DOS EFEITOS DAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS SOBRE A IONOSFERA EM DIFERENTES LATITUDES DO TERRITÓRIO BRASILEIRO UTILIZANDO A REDE DE SATÉLITES GPS, In: XXI Jornada Acadêmica Integrada da Universidade Federal de Santa Maria, 28 a 30 de novembro/2006, Santa Maria/RS.

ANEXO 1

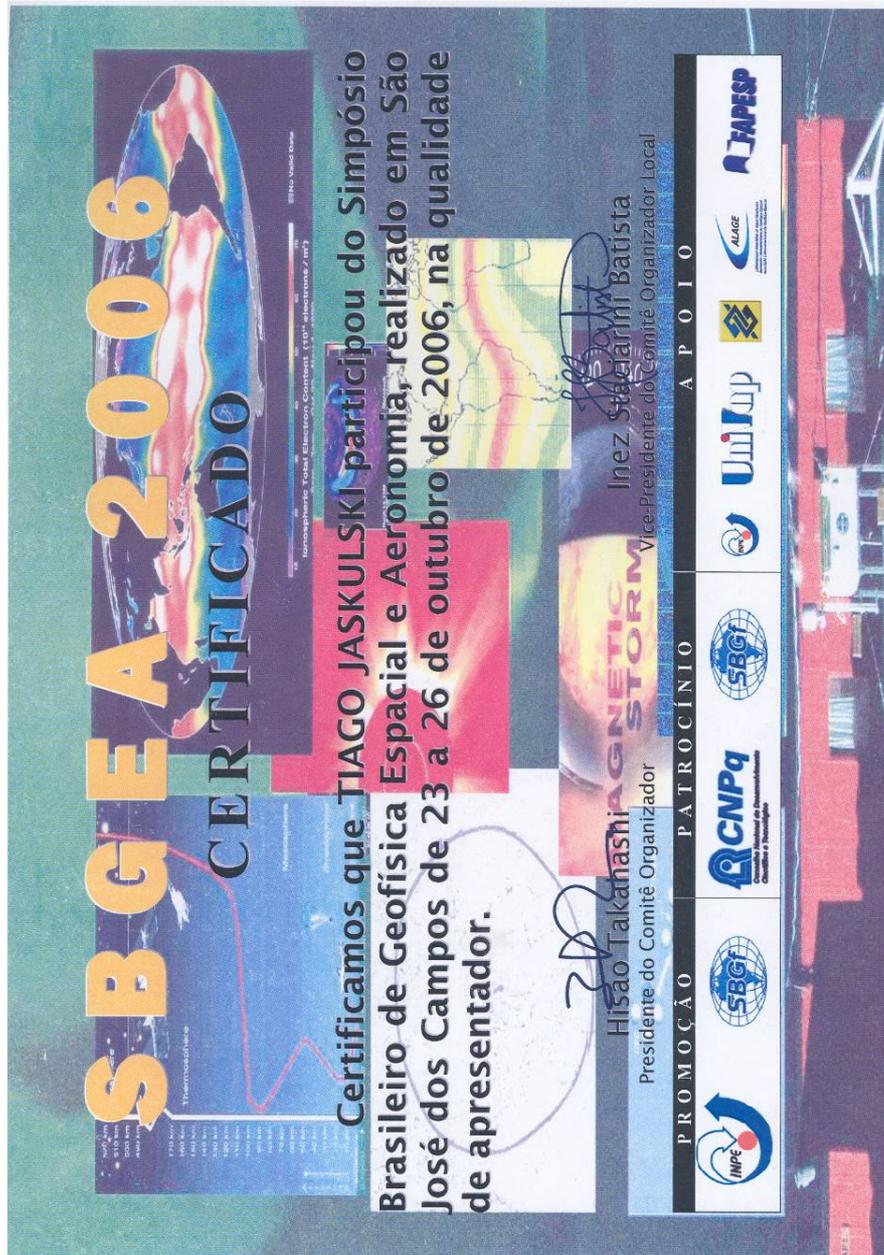
Certificado de participação no XXI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e X Feira de Protótipos:





ANEXO 2

Certificado de participação no 1º Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia:





CAPÍTULO 6

2ª PARTE

ATIVIDADES TÉCNICAS CIENTÍFICAS DESENVOLVIDAS NO PROJETO PELO BOLSISTA SUBSTITUTO – JULIANO MORO



INTRODUÇÃO

Neste Capítulo serão abordadas algumas das atividades específicas realizadas pelo bolsista Juliano Moro, desde o período que assumiu o Projeto. Será feita uma breve releitura, baseada nos estudos realizada pelo bolsista dos princípios de funcionamento do Riômetro.

6.1 A Ionosfera Terrestre

A atmosfera da Terra pode ser discutida em termos de seus componentes constituídos pelos: componentes minoritários e majoritários da atmosfera neutra, e a atmosfera ionizada (ou seja, a ionosfera). Considerada como um sistema estático, a atmosfera neutra é descrita por quatro propriedades: pressão, densidade, temperatura e composição. Com essas propriedades podemos determinar o comportamento atmosférico e sua classificação. Essa classificação, por exemplo, é feita de acordo com as variações com altura da temperatura, da composição e do estado de mistura dos gases, embora a primeira citada seja a mais usada. A Figura 1 ilustra os termos usados para estas várias regiões. Da esquerda para direita vemos a classificação da atmosfera de acordo com: a variação da temperatura; a variação da composição; o escape gasoso; e a densidade da atmosfera ionizada.

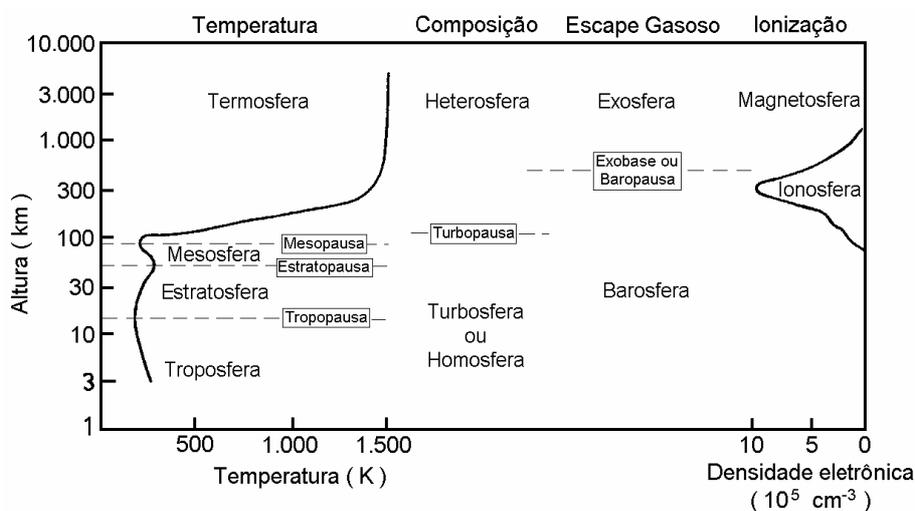


Fig. 6.1 – Classificação da Atmosfera neutra e da Atmosfera ionizada terrestre.
FONTE: Hargreaves (1992, p. 99).

6.1.1 – 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.

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

6.1.2 – 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 à 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.

6.1.3 – Foto-ionização

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

6.1.4 – Ionização por Impacto

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

6.1.5 – 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.

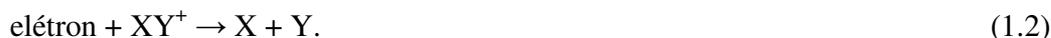
6.1.6 – Recombinação Química

A recombinação química engloba todos os processos de neutralização e/ou troca de carga da ionosfera. Há uma vasta gama de reações químicas que contribuem para esta recombinação, porém destacamos duas classes: recombinação radiativa e recombinação dissociativa.

A recombinação radioativa é o processo de recombinação no qual um íon positivo recombina-se com um elétron, liberando energia na forma de fótons (hv), 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.

6.1.7 – 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.

6.2 – Regiões Ionosféricas

Devido as diferentes composições, processos de ionização, densidade eletrônica e altura, a Ionosfera é dividida em três regiões básicas: Região D, Região E e Região F, que por sua

vez é subdividida em regiões F₁ e F₂. A Figura 1.2 ilustra as três camadas com suas respectivas alturas e densidades eletrônicas.

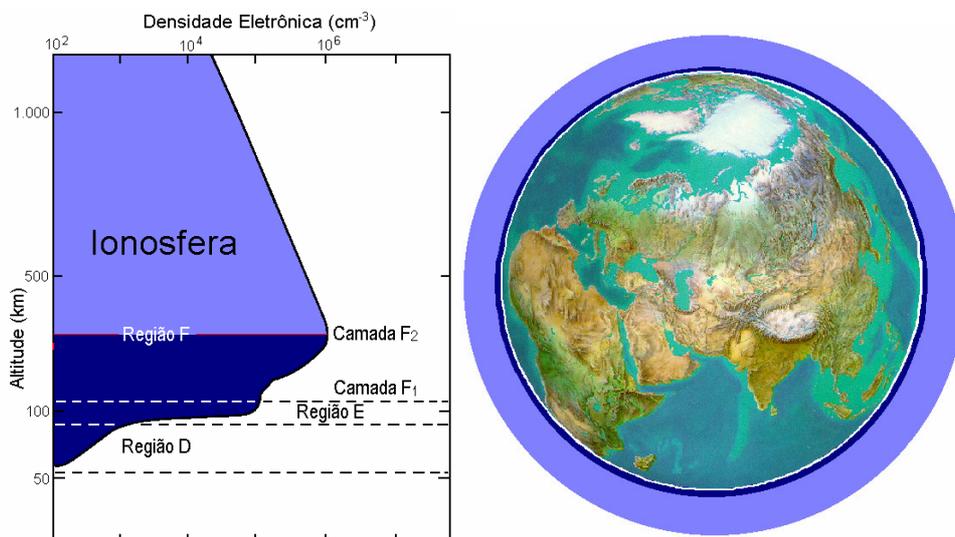


Fig. 6.2 – À esquerda, a localização das três camadas ionosféricas conhecidas no perfil ionosférico, com sua nomenclatura. E à direita, a dimensão aproximada da Ionosfera (em azul similar à esquerda) em relação à Terra.

FONTE: Denardini (1999, p. 26).

6.2.1 – Região D

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

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

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

6.2.2 – Região E

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

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

6.2.3 – Região F₁

Esta tem início por volta dos 140 km e estende-se por aproximadamente 20 - 40 km. A espécie neutra molecular predominante nessa região é o N_2 . A espécie atômica predominante nessa região é o oxigênio (Kivelson e Russell, 1995). O íon majoritário é o O^+ , e sua concentração pode variar de $2,5 \times 10^{11}$ a $4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Porém, à noite a densidade eletrônica dessa região se reduz.

6.2.4 – Região F₂

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

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

6.3 – Condutividade Ionosférica

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

Na ionosfera terrestre observa-se a presença simultânea dos campos elétricos e magnéticos. Portanto, convencionou-se apresentar a condutividade ionosférica em termos das suas três

componentes da seguinte forma: ao longo do vetor campo magnético; ao longo da componente do vetor campo elétrico perpendicular ao campo magnético; e perpendicular a ambos.

Aqui cabe uma observação importante, esta taxa de colisão não deve ser confundida com frequência de onda do fóton emitido nos processos de recombinação química ($h\nu$).

6.4 – 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 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 $E=U \times B$ em altas latitudes, devido à 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.

6.5 – Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS

Quando a AMAS foi descoberta, no final da década de 1950, sua localização se dava principalmente sobre o Atlântico Sul, por isso foi denominado de Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

Esta região com uma forma oval se caracteriza pela diminuição da intensidade do Campo Magnético Terrestre. O menor valor do campo atualmente está sobre o Sudeste brasileiro, cerca de 700 km da costa. Essa anomalia no Campo Magnético é causada pelo fato de seu centro magnético não estar localizado no centro do núcleo terrestre, gerando um campo mais fraco na região do Atlântico Sul. Assim, de forma semelhante da região auroral, as partículas eletricamente carregadas penetram com mais facilidade na região da AMAS,



atingindo camadas mais profundas da atmosfera, tornando esta região uma das mais vulneráveis do planeta aos efeitos das partículas energéticas e radiações.

Fazer previsões precisas do Campo Geomagnético, com o passar do tempo é praticamente impossível. Porém, analisando as mudanças que estão ocorrendo no Campo Geomagnético é possível estimar o comportamento mais provável do campo geomagnético no futuro.

CAPÍTULO 7

7.1 – Riômetro

A variação da absorção ionosférica de ondas de rádio de origem cósmica vem sendo observada a partir do equipamento Riômetro, instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS. O objetivo do estudo é estabelecer a relação entre esta absorção e o fluxo de partículas energéticas observadas na região de Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (AMAS).

7.1.2 – Técnica dos Riômetros

Um Riômetro (do inglês *Riometer: Radio Ionosphere Opacity Meter*) trata-se de uma importante ferramenta para sondagens ionosféricas. Este equipamento é usado desde a década de 50. O Riômetro é essencialmente um rádio receptor muito sensível ligado à uma antena. O rádio receptor acompanha o ruído de rádio natural produzido pelas estrelas, planetas (como Júpiter) e pelo Sol. A energia de radiação total, chamada de ruído do céu e proveniente de todas essas fontes é detectado e registrado. Os Riômetros instalados no mundo normalmente captam os sinais em frequências que variam de 20 MHz a 50 MHz e investigam principalmente a absorção na baixa ionosfera (camadas D e E) situada na faixa dos 80 km a 130 km. Como o ruído cósmico incidente sobre superfície terrestre depende apenas da direção que ela aponta no espaço, ou seja, depende apenas que a superfície terrestre cubra a mesma faixa do céu a cada dia, a variação do ruído cósmico repete-se a cada dia sideral. Mas não é possível ter o nível do ruído cósmico sobre a superfície terrestre sem a absorção ionosférica. Ela está sempre presente. É então determinada através de métodos estatísticos uma curva com o nível de intensidade do ruído cósmico mais alto captado no Riômetro ao longo de vários dias de dados, que se refere a um período magneticamente calmo com pouca absorção. Esta curva é tomada como padrão para comparação com os dados daqueles dias magneticamente perturbados e que atenuam o

ruído cósmico que chega ao Riômetro. Tal curva é chamada Curva do Dia Quietos ou QDC (Quiet Day Curve).

O nível de absorção é dado pela razão entre o sinal recebido sem absorção (QDC) e o atual sinal recebido. Normalmente a intensidade do ruído cósmico é dada em decibéis e é calculado através da seguinte equação:

$$A(dB) = 10 \log_{10} \frac{A_{QDC}}{A_{DIA}}$$

Abaixo vemos um exemplo de uma curva do dia quieto.

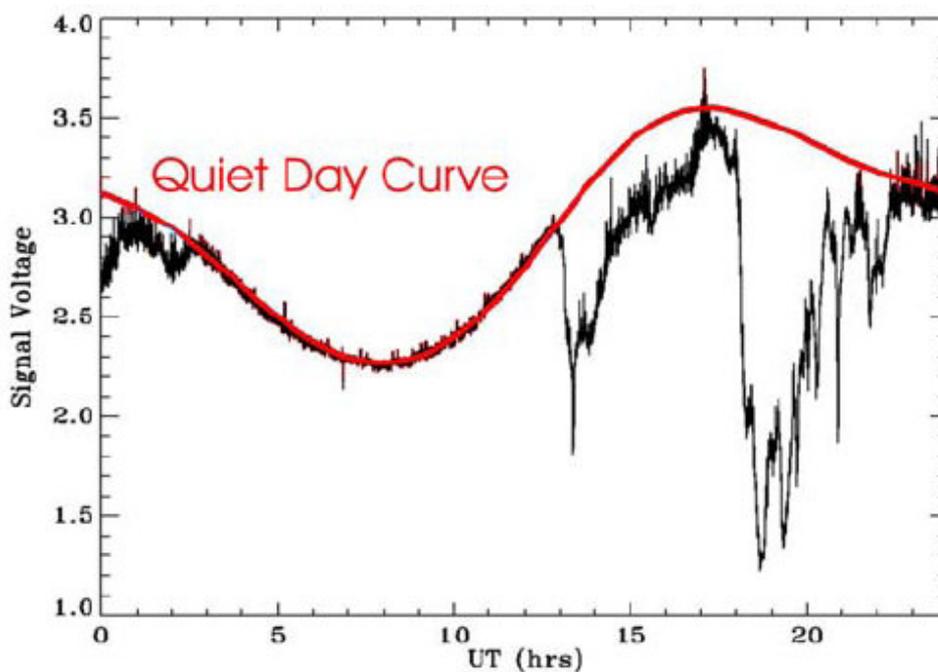


FIGURA 7.1 – Exemplo de uma curva do dia quieto (vermelho) e a comparação com um sinal atenuado pela ionosfera (preto).

Assim, a variação da absorção ionosférica de ondas de rádio de origem cósmica vem sendo observada a partir do equipamento Riômetro Convencional (FIG. 2.2) instalado

no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.



FIGURA 7.2 – Sistema Riômetro Convencional instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

No Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT há instalado também um Riômetro do tipo imageador. Este equipamento possui o diferencial de produzir imagens em duas dimensões da absorção e é capaz de captar o movimento espacial das irregularidades ionosféricas através do seu conjunto de antenas varrendo o campo de visão do céu. O conjunto de antenas deste Riômetro é formado por uma matriz 4x4 (16 antenas) com meio comprimento de onda dipolo e opera em 38,2 MHz (FIG. 2.3). Isto produz 16 feixes que varrem a ionosfera local com um campo de visão de aproximadamente 330x330 km tanto na direção norte-sul quanto na direção leste-oeste.



FIGURA 7.3 – Antenas dipolos 4 x 4 implementadas no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/ INPE – MCT.

Para complementar as pesquisas sobre fluxo de partículas energéticas observadas na região de Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul, recentemente foram instaladas mais dois Riômetros imageadores nesta região: um foi instalado em Concepcion (Chile) que fica situada a oeste de Santa Maria e outro foi instalado em Punta Arenas (Chile), ao sul de Santa Maria. Isto permitirá determinar a escala espacial da variação de absorção e o movimento do plasma ionosférico ao longo da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o período de trabalho na área de instrumentação para as medidas geomagnéticas, desenvolvida no Laboratório de Ionosfera e Rádio Propagação e no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, foi feita um estudo e discussões sobre os princípios de funcionamento do Riômetro. Este estudo teve como referência bibliográfica os seguintes textos:

- “The Earth’s Ionosphere” – Kelley, M.C;
- “Introduction to Space Physics” – Kivelson, M.G; Russel, C.T;
- “Introdução à Geofísica Espacial” – Kirchhoff, V. W. J. H.

Foram realizadas visitas mensais ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, para manutenção e coleta de dados do equipamento instalado.