

# **ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADO EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

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

Thainá de Oliveira Bertolotto (Unitau, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: thaina.bertolotto@inpe.br

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

## **COLABORADORES**

Dra. Laysa Cristina Araújo Resende (DAE/INPE)

**Junho de 2016**

**ESTUDO DA ELETRÔDINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA  
BASEADA EM DADOS DE SONDADEORES DIGITAIS E  
MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO  
MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em Geofísica Espacial,  
orientada pelo Dr. Clezio Marcos De  
Nardin.

INPE  
São José dos Campos  
2016

## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

Bolsista:

Thainá de Oliveira Bertolotto

Curso: Engenharia Elétrica e Eletrônica

UNITAU – Universidade de Taubaté

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Colaborador:

Dra. Laysa Cristina Araújo Resende - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão.

**ESTUDO DA ELETRÔDINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA  
BASEADA EM DADOS DE SONDADEORES DIGITAIS E  
MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO  
MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em Geofísica Espacial,  
orientada pelo Dr. Clezio Marcos De  
Nardin.

INPE  
São José dos Campos  
2016

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

A Deus, pela vida.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin, por todo o apoio, dedicação e compreensão a fim de realizar um bom trabalho.

A minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Ao meu amigo de trabalho, Sony Su Chen e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

*“Inutilia Truncat”*  
*António Dinis e Silva*

## RESUMO

Na região E ionosférica ocorre um adensamento do plasma denominado de camada E esporádica (Es). Estas camadas Es possuem tipos distintos, os quais são atribuídos aos seus diferentes mecanismos de formação, as suas características, a altitude e a latitude de onde são observadas. Nesse contexto, em regiões equatoriais as camadas Es ocorrem devido as irregularidades do plasma do Eletrojato Equatorial (EEJ) e são classificadas como sendo do tipo “q”. Já as camadas Es de baixas e médias latitudes ocorrem devido ao cisalhamento de ventos e podem ser classificadas através de letras minúsculas como l, f, c, h, dependendo do seu formato nos ionogramas. Neste trabalho será apresentado uma análise dos tipos de camadas Es e dos parâmetros ionosféricos de frequência da região E e das camadas Es para a região equatorial, São Luís-MA ( $2^{\circ} 31' S$ ,  $44^{\circ} 16' O$ ) e a região de baixa latitude, Cachoeira Paulista ( $22^{\circ} 39' S$ ,  $45^{\circ} 00' O$ ). Será analisado o período de mínimo solar (2006 e 2007) durante as diferentes estações do ano. Adicionalmente, serão apresentados os resultados de uma análise comparativa dos parâmetros ionosféricos de frequência provindos dos dados de Digisonda para ambas as estações durante as diferentes estações do ano.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Estrutura Interna do Sol.....	15
Figura 1.1: Estrutura Solar Interna.....	17
Figura 1.2: Diagrama de Borboleta.....	20
Figura 1.3: Proeminência Solar.....	22
Figura 1.5: Flare Solar.....	23
Figura 1.6: Ejeção de Massa Coronal.....	24
Figura 1.7: Vento Solar atingindo o campo magnético da Terra.....	25
Figura 1.8: Linhas de campo magnética do Sol.....	26
Figura 1.9: Interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra.....	27
Figura 1.10: Gráfico mostrando o índice K <sub>p</sub> no final do mês de maio do ano de 2003.....	28
Figura 1.11: Gráfico que mostra a variação da tempestade magnética medida pelo o índice Dst.....	30
Figura 1.12: Temperatura nas camadas atmosféricas terrestre.....	32
Figura 1.13: Divisões das camadas atmosféricas terrestre.....	33
Figura 1.14: Interação entre átomos e moléculas na Ionosfera (fotoionização).....	35
Figura 1.15: Altitude e densidade das camadas ionosféricas.....	36
Figura 1.16: Formação das Bolhas Ionosféricas.....	39
Figura 1.17: Evolução de uma instabilidade gerando as Bolhas Ionosféricas segundo Rayleigh-Taylor.....	40
Figura 1.18: Ecos do tipo 1 onde mostra o plasma atingindo uma alta amplitude em um curto espectro.....	41
Figura 1.19: Ecos do tipo 2 onde mostra o plasma atingindo uma alta amplitude em um longo espectro.....	42
Figura 2.1: Camada Es do tipo "f" (flat) observada no dia 5 de janeiro de 2007 às 19:00 hrs da noite em Cachoeira Paulista.....	45
Figura 2.2: Camada Es do tipo "l" (low) observada no dia 4 de setembro de 2007 às 11:30 da manhã em Cachoeira Paulista.....	45
Figura 2.3: Camada Es do tipo "c" (cusp) observada no dia 11 de janeiro de 2007 as 18:45 da tarde em Cachoeira Paulista – SP.....	46
Figura 2.4: Camada Es do tipo "h" (high) observada no dia 4 de janeiro de 2007 às 19:15 da noite em Cachoeira Paulista – SP.....	46
Figura 2.5: Camada Es do tipo "a" (auroral) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 da noite.....	47
Figura 2.6: Camada Es do tipo "q" observada às 14:00 do dia 10 de dezembro de 2010 em São Luís – MA.....	48
Figura 2.7: Formação de corrente no Eletrojato Equatorial.....	59
Figura 2.8: Mecanismo de formação da instabilidade do tipo 2 (Gradient Drift.....	50
Figura 2.9: Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 29 de outubro de 2003 em São Luís-MA às 09 30 (UT).....	51
Figura 3.1: Densidade eletrônica da região E ionosférica obtida pelo foE obtidas pelos dados observacionais (pontos) e pelo modelo IRI (linha cinza) para as estações do ano na região de São Luís.....	56
Figura 3.2: Densidade eletrônica da região E ionosférica obtida pelo foE obtidas pelos dados	



observacionais (pontos) e pelo modelo IRI (linha cinza) para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.....	59
Figura 3.3: Parâmetro ionosférico $fbEs$ para as estações do ano na região de São Luís.....	62
Figura 3.4: Parâmetro ionosférico $ftEs$ para as estações do ano na região de São Luís.....	65
Figura 3.5: Parâmetro ionosférico $fbEs$ para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.....	68
Figura 3.6: Parâmetro ionosférico $ftEs$ para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.....	71

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1: Estatísticas do Sol.....	13
Tabela 1.2: Principal Composição Química do Sol.....	14
Tabela 1.3: Composição da atmosfera terrestre.....	31
Tabela 2.1: Dias selecionados para análise, classificados de acordo com as estações para São Luís e Cachoeira Paulista.....	53

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 1 - REVISÃO TEÓRICA .....	13
1.1 SOL.....	13
1.1.2 ENERGIA SOLAR .....	14
1.1.3 ESTRUTURA SOLAR INTERNA.....	15
1.1.3.1 Núcleo: .....	15
1.1.3.2 Zona Radiativa: .....	16
1.1.3.3 Zona Convectiva:.....	16
1.1.4 ESTRUTURA SOLAR EXTERNA.....	16
1.1.4.1 Fotosfera.....	17
1.1.4.2 Cromosfera .....	17
1.1.4.3 Zona de Transição .....	18
1.1.4.4 Coroa .....	18
1.1.5 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR.....	19
1.1.5.1 Manchas Solares.....	19
1.1.5.2 Índices de Atividade Solar: .....	20
1.1.5.3 Fluxo Solar .....	21
1.1.6 ACONTECIMENTOS NA ATMOSFERA SOLAR .....	21
1.1.6.1 Protuberâncias ou Proeminências:.....	21
1.1.6.2 Flares .....	22
1.1.6.3 Erupções Solares .....	23
1.1.6.4 Ejeção de Massas Coronas .....	23
1.1.6.5 Vento Solar:.....	24
1.1.7 CONCEITOS SOBRE O CAMPO MAGNÉTICO DO SOL .....	25
1.1.7.1 O Campo Magnético do Sol .....	25
1.1.7.2 A interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra .....	26
1.1.7.3 Atividades Magnéticas: .....	27
1.2 A ATMOSFERA DA TERRA .....	30
1.2.1 COMPOSIÇÃO.....	30
1.2.2 CAMADAS ATMOSFÉRICAS.....	32
1.2.2.1 Troposfera.....	33
1.2.2.2 Tropopausa .....	33
1.2.2.3 Estratosfera.....	34
1.2.2.4 Estratopausa.....	34
1.2.2.5 Mesosfera .....	34
1.2.2.6 Mesopausa .....	34
1.2.2.7 Termosfera.....	34
1.3 IONOSFERA.....	35
1.3.1 REGIÃO D .....	37
1.3.2 REGIÃO E.....	37
1.3.3 REGIÃO F1 .....	37
1.3.4 REGIÃO F2.....	38

1.3.5 IRREGULARIDADES NA IONOSFERA .....	38
1.3.5.1 Bolhas Ionosféricas.....	38
1.3.5.2 Eletrojato Equatorial.....	40
CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS.....	43
2.1 - AS CAMADA E-ESPORÁDICAS (ES) .....	43
2.1.1 CISALHAMENTO DOS VENTOS.....	43
2.1.2 TIPOS DE CAMADAS ES EM MÉDIAS E BAIXAS LATITUDES .....	44
2.1.3 CAMADA ES EM REGIÕES EQUATORIAIS .....	47
2.1.4 O ELETROJATO EQUATORIAL (EEJ) E SUAS IRREGULARIDADES .....	48
2.1.5 CAMADA ES <sub>q</sub> NA REGIÃO EQUATORIAL.....	50
2.1.6 PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA IONOSFÉRICA DA REGIÃO E E DAS CAMADAS ES .....	51
2.1.7 O MODELO <i>INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE</i> (IRI) .....	52
2.1.8 SELEÇÃO DOS DADOS .....	52
2.1.9-ATIVIDADES DE FORMAÇÃO COMPLETAR .....	53
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
3.1- ANÁLISES DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI.....	55
3.1.1-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI PARA SÃO LUÍS .....	55
3.1.2-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI PARA CACHOEIRA PAULISTA .....	58
3.1.3-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>fbES</i> PARA SÃO LUÍS .....	61
3.1.4-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>ftES</i> PARA SÃO LUÍS .....	64
3.1.5-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>fbES</i> PARA CACHOEIRA PAULISTA .....	67
3.1.6-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>ftES</i> PARA CACHOEIRA PAULISTA .....	70
3.2 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....	73
3.2.1- ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI.....	73
3.2.2- ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>fbES</i> .....	75
3.2.3- ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO <i>ftES</i> .....	76
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES .....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentados os estudos realizados nos meses de agosto de 2015 até junho de 2016. Neste período foram realizados três estudos teóricos a fim de iniciar o desenvolvimento de pesquisa. O primeiro deles é referente ao Sol, mostrando desde a sua composição até a sua anatomia. Em seguida, foi realizado um trabalho sobre a Ionosfera, descrevendo seus processos químicos e físicos em todas as suas camadas. Além disso, foi realizado um trabalho dando ênfase a camada E esporádica (Es) e os fenômenos que a distinguem, objetivo principal deste estudo. A partir disso, foram iniciados os trabalhos referentes aos dados. O principal objetivo deste trabalho é o estudo comparativo das camadas Es entre as estações de São Luís-MA ( $2^{\circ}31' S$ ,  $44^{\circ}16' O$ ) e de Cachoeira Paulista ( $22^{\circ}39' S$ ,  $45^{\circ}00' O$ ). Neste estudo, foram analisados dados de sondadores digitais, equipamentos capazes de obter a densidade eletrônica, denominados também digissonda. Esses dados geram gráficos, ionogramas, capazes de mostrar a altura da reflexão das ondas e as suas frequências. Nos ionogramas foram estudados os perfis ionosféricos, analisando os parâmetros de frequência da Região E ionosférica e das camadas Es. Após esta análise, estes parâmetros foram comparados com dados ionosféricos de um modelo teórico bem conhecido, o IRI. Por fim, os resultados mostraram-se importantes no ponto de vista ionosférico e foi submetido à apresentação do Sicinpe 2016 – Seminário de Iniciação Científica do INPE.

# CAPÍTULO 1 - REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão mostrados os trabalhos teóricos referentes aos temas propostos no projeto inicial. No primeiro item será abordado o Sol, sua composição e as suas principais características. Em seguida serão abordados os assuntos referentes a ionosfera e seus principais processos físicos.

## 1.1 SOL

O Sol é considerado uma estrela por ser formado, principalmente, pelos gases Hélio, Hidrogênio, Carbono e Oxigênio e por possuir luminescência própria. A sua massa é 332.959 vezes maior que a da Terra e toda a sua matéria está em forma de plasma, um fluído completamente ionizado. O que mantém o Sol estável é um equilíbrio entre a força gravitacional, que tende a puxar todo o seu conteúdo para o centro, e a pressão, que faz com que os gases se expandam.

Essa estrela possui um núcleo que gera energia através de reações termonuclear e apesar de ser muito maior que a Terra, sua gravidade é apenas 28 vezes maior. Apenas 2% da massa do sistema solar estão concentradas em planetas, asteroides e cometas, sendo os 98% restantes pertencentes ao Sol. Na Tabela 1.1 estão as principais características do Sol e na Tabela 1.2 a sua principal composição química.

A parte mais externa é a chamada de fotosfera com espessura menor que 0,1% do raio do Sol. Além disso, há outras estruturas que podem ser representadas por várias camadas, estabelecendo regiões sob diferentes condições físicas. Estas divisões do Sol serão abordadas nas seções seguintes.

Tabela 1.1: Estatísticas do Sol

<b>Estatísticas do Sol</b>	
<b>Massa (kg)</b>	1,989x10 <sup>30</sup>
<b>Massa (Terra = 1)</b>	332.830
<b>Raio equatorial (km)</b>	695.000
<b>Raio equatorial (Terra = 1)</b>	108,97

<b>Densidade média (gm/cm<sup>3</sup>)</b>	1,410
<b>Período de rotação (dias)</b>	25-36*
<b>Velocidade de escape (km/seg)</b>	618,02
<b>Luminosidade (ergs/seg)</b>	3,827x10 <sup>33</sup>
<b>Magnitude (Vo)</b>	-26,8
<b>Temperatura média da superfície</b>	6 000°C
<b>Idade (bilhões de anos)</b>	4,5
<b>Período rotacional no equador</b>	25 dias
<b>Período rotacional na latitude 60°</b>	29 dias
<b>Tipo espectral e Classe de Luminosidade</b>	G2V

Fonte: Filho e Saraiva, (2015)

Tabela 1.2: Principal Composição Química do Sol

<b>Principal Composição Química</b>	
<b>Hidrogênio</b>	92,1%
<b>Hélio</b>	7,8%
<b>Oxigênio</b>	0,061%
<b>Carbono</b>	0,030%
<b>Nitrogênio</b>	0,0084%
<b>Néon</b>	0,0076%
<b>Ferro</b>	0,0037%
<b>Silício</b>	0,0031%
<b>Magnésio</b>	0,0024%
<b>Enxofre</b>	0,0015%
<b>Todos os restantes</b>	0,0015%

Fonte: Hamilton, C. J., (1997)

### **1.1.2 ENERGIA SOLAR**

O Sol tem capacidade para produzir energia equivalente a 10 bilhões da hidrelétrica de Itaipu (Stensmann, 2002). Toda essa energia provém do núcleo. O Hidrogênio funciona como um combustível que é rendido a uma enorme pressão e temperatura e, assim, possibilita que essas reações ocorram. O Hidrogênio da reação se transforma em Hélio que libera uma energia de  $10^{12}$  J na forma de radiação (principalmente raios gama e raios X). Essa energia é dissipada especialmente como luz e calor que atinge cada metro quadrado da Terra com uma potência de 1400 W (Stensmann, 2002). A outra parte da energia liberada é utilizada para manter as condições de temperatura e pressão. A radiação liberada pelo o núcleo demora cerca de anos para chegar até as camadas externas. Finalmente, estima-se

que o Sol ainda tenha um período de vida de 6,5 bilhões de anos e que durante esse tempo ele ainda continuará em sua fase calma, sem muitas variações de energia. Contudo, ao decorrer dos anos, ele passará a emitir mais luz e ocasionará em um aumento de temperatura na Terra. (Maciel, 1995).

### **1.1.3 ESTRUTURA SOLAR INTERNA**

O interior do Sol é separado em três regiões distintas de acordo com os processos que ocorrem em cada uma delas (Figura 1.1). Essa estrutura varia de acordo com a massa em que a estrela possui, podendo ser classificadas entre as categorias de “estrela de baixa massa” (similar ao Sol) ou “grande massa” (Cecatto, 2009). No caso do Sol as regiões são: O Núcleo ( $2 \times 10^5$  km), Zona Radiativa ( $3 \times 10^5$  km), Zona Convectiva ( $2 \times 10^5$  km).

Figura 1.1: Estrutura Interna do Sol



Fonte: Casas, 2009

#### **1.1.3.1 Núcleo**

O núcleo é o local onde ocorrem as reações termonucleares. A sua densidade é de aproximadamente  $150 \text{ g/cm}^3$ , sua pressão interna é de  $2,5 \times 10^3 \text{ atm}$  com temperatura de  $1,5 \times 10^7 \text{ K}$ . O seu tamanho estende-se do centro solar até 0,2 a 0,25 raios solares (García, 2007).



Como já dito anteriormente, as reações no núcleo acontecem pelo o fato da sua maior parte ser formada por Hidrogênio, que é submetido a uma grande pressão. Assim, quando o Hidrogênio é submetido a estas condições, há um aumento de temperatura e ocorre a fusão para a liberação do Hélio. Em síntese, no Sol a temperatura alcança 15 milhões de graus °C, que é o suficiente para fazer com que aconteça fusão de quatro núcleos de Hidrogênio para liberar um de Hélio (partícula alfa). O Hélio, por sua vez, irradia uma quantidade de energia significativa. Especificamente, o Sol é capaz de transformar aproximadamente 600 milhões de toneladas de Hidrogênio em Hélio por segundo.

### 1.1.3.2 Zona Radiativa

A Zona Radiativa representa 45% do raio do Sol e a sua temperatura decai em 2 milhões em °C. A sua densidade é de 20g/cm e até a parte mais externa há uma diminuição de 0,2 g/cm (Pinheiro, 2012).

É nessa área que é transportada a energia em forma de fótons (radiação em forma de luz) na velocidade da luz. Os fótons emitidos no centro viajam para o exterior e são absorvidos e reemitidos. Um fóton emitido no centro do Sol demora 10000 a 170000 anos para chegar à superfície (Mitalas et al., 1992).

### 1.1.3.3 Zona Convectiva

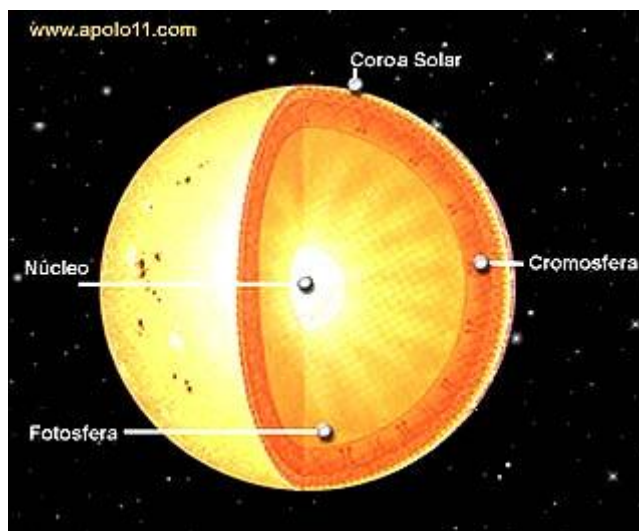
A Zona Convectiva representa 30% do raio do Sol e a sua temperatura decai significativamente, passando de 2 milhões em °C para 6 mil °C. Essa queda brusca acontece devido as correntes convectivas (correntes de gás frio e gás quente). O transporte da energia nessa área ocorre por convecção, fazendo com que o material mais quente na base da zona convectiva, ou seja, menos denso, seja levado até a superfície do Sol.

## **1.1.4 ESTRUTURA SOLAR EXTERNA**

Assim como a estrutura interna, a externa é dividida de acordo com a sua funcionalidade. Neste caso, a atmosfera é composta pela fotosfera, cromosfera, zona de transição e a coroa (parte mais externa) (Figura 1.2). A coroa e a cromosfera são transparentes para a luz

visível. Por essas duas regiões serem de transição entre o meio interno e externo, encontra-se uma grande variedade das propriedades físicas como temperatura, pressão e composição química.

Figura 1.1 Estrutura Solar Interna



Fonte: Leite, 2012

#### 1.1.4.1 Fotosfera

A fotosfera é a única camada do Sol que podemos enxergar, possuindo um tamanho de 500 km, temperatura de 5800 K e uma diminuição considerável da sua densidade ( $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) (Hetem et al., 2010).

É na fotosfera que se encontra as manchas solares. Essa camada tem a aparência de um líquido em ebulição cheia de bolhas ou grânulos, chamado de granulação fotosférica (Filho et al., 2015). Esses grânulos são observados porque os gases mais frios e os mais quentes da zona convectiva são irradiados para a fotosfera. As partes mais claras estão relacionadas aos gases quentes e as mais escuras aos gases mais frios.

#### 1.1.4.2 Cromosfera

A Cromosfera é uma camada heterogênea da atmosfera solar que possui a cor avermelhada e se encontra acima da fotosfera. Existem diversas maneiras de detectá-la. A mais comum delas é quando ocorre o eclipse lunar total onde a lua cobre totalmente o disco da fotosfera.

Assim, com a ajuda de um espectroscópio, é possível observar uma espécie de anel vermelho em volta e proeminências. A outra maneira de observação é usar um filtro especial que é encaixado em telescópios ópticos que deixa passar somente o comprimento de onda da transição do átomo de Hidrogênio.

A cromosfera possui espessura de  $1,5 \times 10^3$  km, a sua densidade varia de  $10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$  na sua base até  $10^9$   $\text{cm}^{-3}$  na parte mais externa. Ela é constituída principalmente dos gases Hidrogênio e Hélio. Nota-se que na cromosfera há um aumento de temperatura, comparado com a fotosfera. A cromosfera chega a 10.000 K na parte mais baixa e as mais altas podem chegar a 20.000 K. A explicação para esse fenômeno é que parte da energia deixada da fotosfera é em forma de som e quando chega à cromosfera ela se dissipa em forma de calor. Contudo, como os gases nessa região são mais rarefeitos, ocorre um aumento da temperatura que é suficiente para a emissão de luz do Hidrogênio.

É na cromosfera em que ocorre também a formação de espículas (observado pelo o filtro H- $\alpha$ ). Estes são jatos de gases que emitem partículas e duram entre 5 a 10 minutos. As espículas representam um papel importante no equilíbrio de massa da cromosfera, da coroa e do vento solar. O fato de não terem uma estrutura uniforme, formam uma estrutura de super-grânulos, que ocorrem apenas nas regiões de aumento da intensidade do campo magnético (Silva, 2006).

#### 1.1.4.3 Zona de Transição

A Zona de transição é uma camada irregular e pequena com apenas  $8,5 \times 10^3$  km que separa a relativa camada fria cromosfera da coroa solar. A sua temperatura varia dos 20.000 para milhões de K. Em consequência desta temperatura, o Hidrogênio nesta região encontra-se ionizado, ou seja, na forma de prótons e elétrons. A emissão dessa região é do espectro ultravioleta, sua detecção só pode ser feita através de aparelhos especializados.

#### 1.1.4.4 Coroa

A Coroa é uma camada tênue e heterogênea formada de plasma que se localiza na parte mais externa da estrutura atmosférica do Sol. O seu tamanho não é definido, pois atingem vários raios solares e sua temperatura chega de 1 a 2 milhões de K. Os gases presentes nesta

camada irradiam em forma de raios-X. Além disso, a elevada temperatura provoca uma reação constante dos átomos que a compõem e que provavelmente produz o vento solar. Sua densidade decai de 2 a 3 ordens de grandeza em relação a da cromosfera. Por este fato, a coroa só pode ser observada quando ocorrem eclipses totais ou com a ajuda de um coronógrafo (instrumento que simula eclipses que cobrem o disco solar) (Silva, 2006).

### **1.1.5 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR**

A atividade Solar são fenômenos cíclicos ligados à rotação e a variação do campo magnético do Sol, estes fenômenos variam a cada 11 anos e são definidos como Ciclo Solar. O Ciclo Solar ou Ciclo de Atividade Solar se dá pela variação alta e baixa de atividade do Sol. Considera-se uma emissão máxima quando há presença de atividades, como o aparecimento de manchas solares, proeminências, flares e praias. Quando a emissão de energia do Sol é mínima há uma diminuição dessas atividades. Este ciclo é a principal fonte de alterações no clima espacial, que é um conjunto de condições ambientais no espaço sideral próximo a Terra. Um exemplo são as alterações na órbita dos satélites que podem ter inúmeras consequências, entre elas o desvio de sinais de GPS e comunicações por rádio (Barbosa, 2012).

#### **1.1.5.1 Manchas Solares**

As Manchas Solares são regiões irregulares e perceptíveis da superfície (fotosfera) do Sol com uma aparência mais escura e avermelhada. Elas adquirem essa aparência por possuir uma temperatura menor (4.000 K) que a matéria que a está circundando (6.000 K) (França, 2013). Elas tendem a se formar em grupo e apresentam estrutura como: umbra, que é a parte central da mancha (região mais escura e com temperatura mais baixa) e a penumbra, que é a região mais clara em torno da umbra (França, 2013). O seu tamanho pode variar de  $1,5 \times 10^2$  a  $1,0 \times 10^5$  km. A sua duração pode chegar a meses dependendo do seu estágio de formação.

Essas manchas são zonas de intenso campo magnético que vão de 0,1 a 0,4 T e impede o gás de circular, ou seja, o transporte de energia por convecção é impedido. Este, por sua vez, tem uma queda de temperatura. Pelo o fato de possuírem esse intenso campo

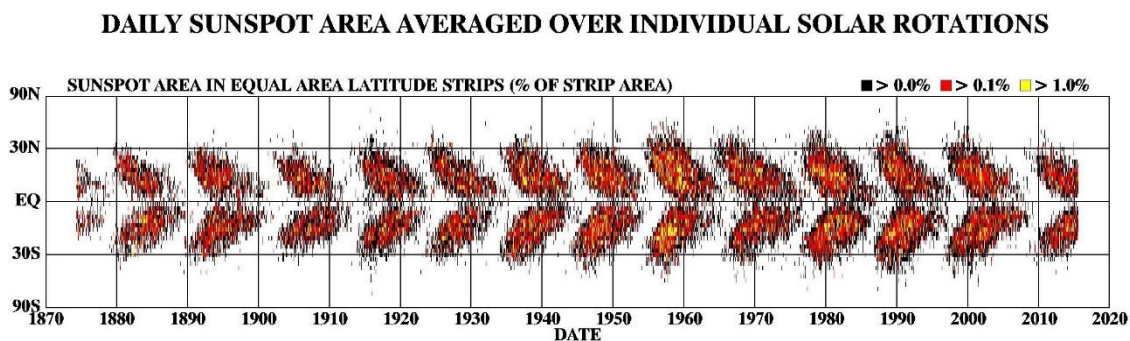
magnético, as manchas podem apresentar polaridades para o sul ou norte. Como tendem a se formar em pares, ocorrem com polaridades opostas uma das outras.

#### 1.1.5.1.1 Ciclo de Manchas Solares

Através da observação das manchas solares que definiu o Ciclo Solar de 11 anos. O Ciclo Solar apresenta pontos de máxima e mínima atividade, que é definido pela quantidade de manchas solares presentes na superfície do Sol. Em caso de atividade mínima, as quantidades de manchas são quase zero. Quando o Sol está em atividade máxima podem aparecer mais de 100 manchas.

Observa-se também que as manchas solares seguem um padrão para o seu surgimento. No começo do ciclo, as manchas aparecem primeiro nas latitudes médias do Sol, acima e abaixo do seu equador e não passam dos 40° de latitude. Isso ocorre devido à aproximação das linhas magnéticas, que devido ao fato da velocidade do Sol no equador ser mais rápida, acabam causando repulsão entre elas, formando as manchas solares. À medida que a atividade solar vai aumentando, elas vão se alargando e movendo-se na direção do equador solar da esquerda para a direita do corpo do Sol. Um novo ciclo começa quando as manchas próximas ao equador passam a surgir novamente em latitudes altas, como explica o gráfico da borboleta (Figura 1.3).

Figura 1.2 -Diagrama de Borboleta



Fonte: Hathaway, 2015

#### 1.1.5.2 Índices de Atividade Solar

Os índices de atividade solar medem a intensidade do fluxo solar e as perturbações causadas na alta atmosfera terrestre, principalmente a ionosfera. O índice mais usado para a medição da atividade solar no meio interplanetário é o *Planetarische Kennziffer* (Kp) que será melhor relatado nas próximas seções.

O grau de atividade solar pode ser dado também pela a quantidade de manchas solares que se apresenta no Sol. Usa-se uma equação desenvolvida por Wolf em 1850 para obter o número delas, conhecida como número de Zurich ou Internacional (Equação 1).

$$R_z = k (10 g + f) \quad (1)$$

Na equação acima, o  $R_z$  representa o número de manchas solares de Wolf,  $k$  é uma constante de normalização para um observador particular,  $g$  é o número de grupos de manchas solares e  $f$  é o número solares individuais visíveis no disco solar (Hoyt e Schatten, 1998).

### 1.1.5.3 Fluxo Solar

Fluxo Solar é a quantidade de liberação da energia solar ligada proporcionalmente a quantidade de manchas solares. Pode variar conforme a hora do dia, época do ano e da posição entre a Terra e o Sol. As observações sobre o fluxo solar é feita na faixa de 10,7 cm. Essa faixa é a medida da radiação térmica do Sol e contribui no processo de ionização. O fluxo solar é observado de ano em ano para se obter a média de manchas solares, que recebe o nome de *número plano de spots* (SSN).

## **1.1.6 ACONTECIMENTOS NA ATMOSFERA SOLAR**

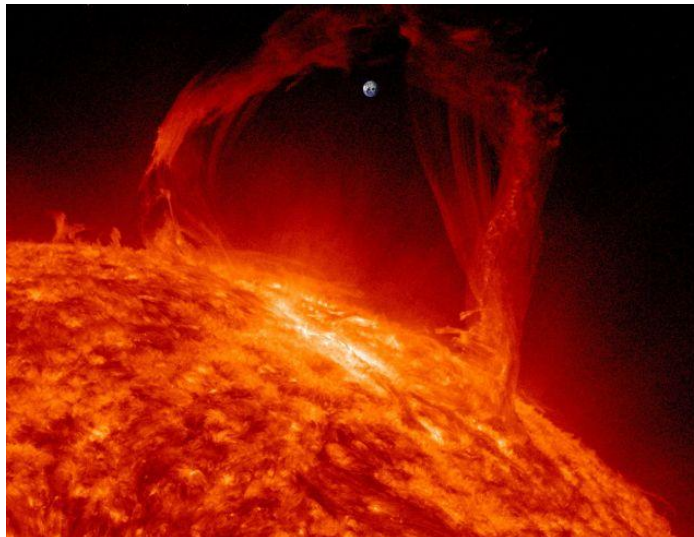
Na atmosfera solar ocorrem vários fenômenos como: protuberâncias, flares, erupções solares, ejeções de massas coronais (CME) e Vento Solar, apresentados a seguir.

### 1.1.6.1 Protuberâncias ou Proeminências

Protuberâncias são arcos de gases excitados que se estendem por milhares de quilômetros na coroa solar (Figura 1.4). Elas estão ligadas a associação de campo magnético do Sol, que vai de 20 até 200 Gauss, e as manchas solares. Elas podem ser vistas sem a ajuda de um coronógrafo e possuem praticamente uma temperatura de 10.000 a 20.000 K. As protuberâncias seguem as linhas de campo magnético, originando-se em uma mancha solar com uma polaridade e passando para outra.

As protuberâncias podem se dividir em dois tipos: protuberâncias quiescentes, quando se formam e evoluem lentamente e as eruptivas que se produzem em lapsos de poucas horas.

Figura 1.3 Proeminência Solar



Fonte: NASA/SDO/AIA, 2012

### 1.1.6.2 Flares

Os flares são intensas explosões de radiação que se propagam desde a região das ondas de rádio até a região dos Raios X e raios gama (Figura 1.5) (Koop et al., 2005). Eles acontecem quando uma significativa quantidade de energia armazenada em campos magnéticos próximos às manchas solares é repentinamente liberada. Este fenômeno pode durar de minutos a horas e são observados como áreas brilhantes.

Figura 1.5 Flare Solar



Fonte: Nasa/SDO, 2013

### 1.1.6.3 Erupções Solares

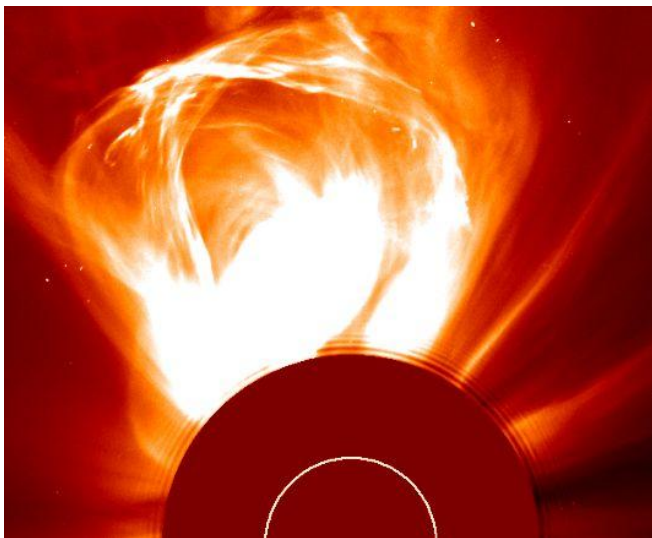
As Erupções Solares são explosões que ocorrem na superfície do Sol e que são causadas por mutações no campo magnético solar (Koop et al, 2005). O plasma quando atingido, causa irradiação de partículas, essas explosões são parecidas com os flares porém ocorrem em escalar bem maiores.

### 1.1.6.4 Ejeção de Massas Coronas

Ejeção de massa corona *Coronal Mass Ejections* (CME) ocorre quando o Sol libera uma massa com cerca de  $10^{13}$  kg de plasma do Sol para o meio interplanetário a uma velocidade de milhares de km/s (Figura 1.6) (Christhian, 2012). Essas ejeções podem ser evidentes tanto nos períodos de baixa quanto de alta atividade solar.



Figura 1.6: Ejeção de Massa Coronal



Fonte: NASA/SDO/AIA, 2000.

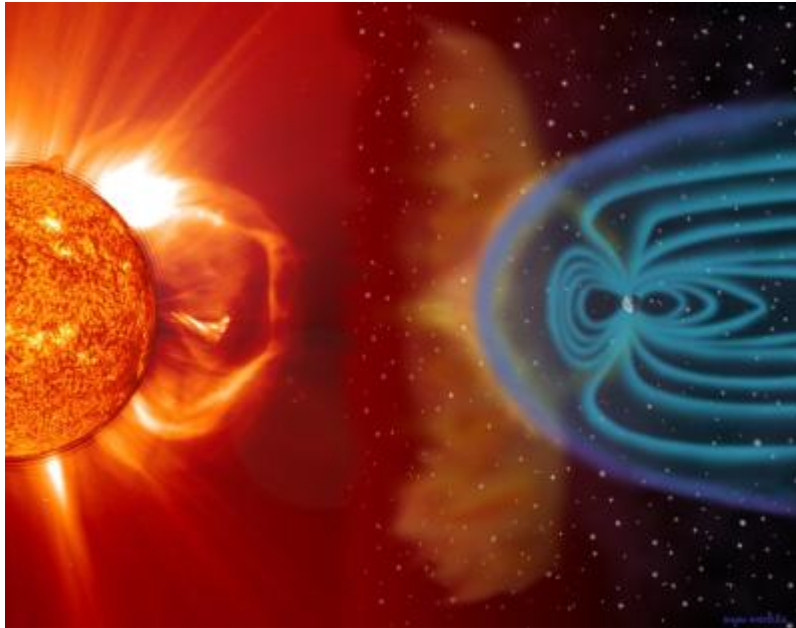
#### 1.1.6.5 Vento Solar:

Vento solar é a emissão contínua de partículas proveniente da coroa solar (Figura 1.7). Ele é disparado em todas as direções, devido ao fato de sofrer uma aceleração provocada pelas reações termonucleares do Sol. Sabe-se que as emissões do Vento Solar emitem partículas de elétrons e prótons e subpartículas, como os neutrinos, a uma grande velocidade que pode chegar a 400 km/s (Gasparetto, 2010).

Além disso, sabe-se também que existem dois tipos de Vento Solar caracterizados de acordo com a sua zona geradora: vento rápido e vento lento. O vento rápido é originado nos buracos coronais, regiões mais frias e menos densas da coroa solar, podendo atingir picos de velocidade da ordem de 900 km/s. já o vento lento se origina em regiões de baixas latitudes, mais próximas ao equador do Sol, atingindo velocidades da ordem de 300 km/s (Russel, 2009).

Ao atingir a Terra, o Vento Solar forma auroras boreais e austrais, podendo causar também a interrupção dos sinais de rádio.

Figura 1.7: Vento Solar atingindo o campo magnético da Terra



Fonte: Ornelas, 2011

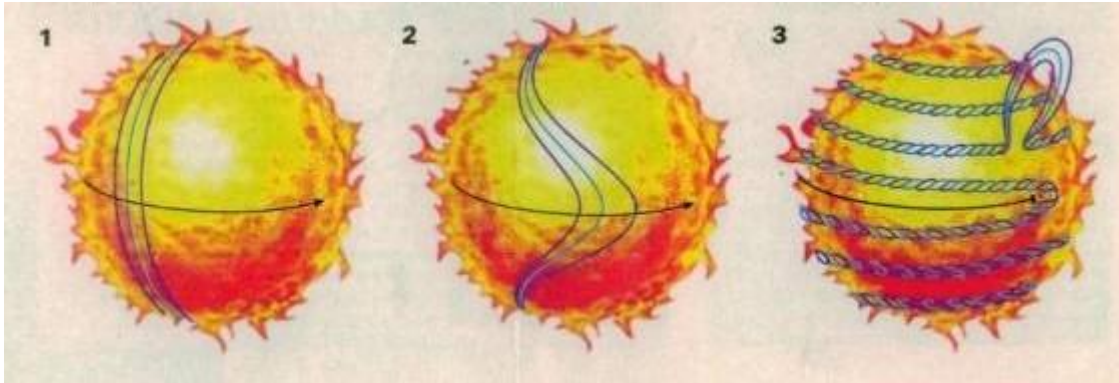
## **1.1.7 CONCEITOS SOBRE O CAMPO MAGNÉTICO DO SOL**

### **1.1.7.1 O Campo Magnético do Sol**

O Campo Magnético do Sol é responsável pela maioria dos fenômenos que ocorrem no Sol. Ele se inicia nos dois polos, onde as linhas do campo se ligam verticalmente. Porém, como a rotação do Sol perto do equador solar é mais rápida essas linhas sofrem uma distorção e os gases presos a elas se locomovem também. A cada rotação, as linhas de campo vão sendo mais arrastadas e distorcidas até que sua densidade de linhas de campo torne-se muito elevada e sua direção passe a ser praticamente paralela à linha equatorial solar. A partir disso, essas linhas começam a emergir da fotosfera até a coroa solar (Figura 1.8) (Cecatto, 2009).

A cada 11 anos, o Sol inverte os seus polos e começa a passar por esses acontecimentos novamente.

Figura 1.8: Linhas de campo magnética do Sol.



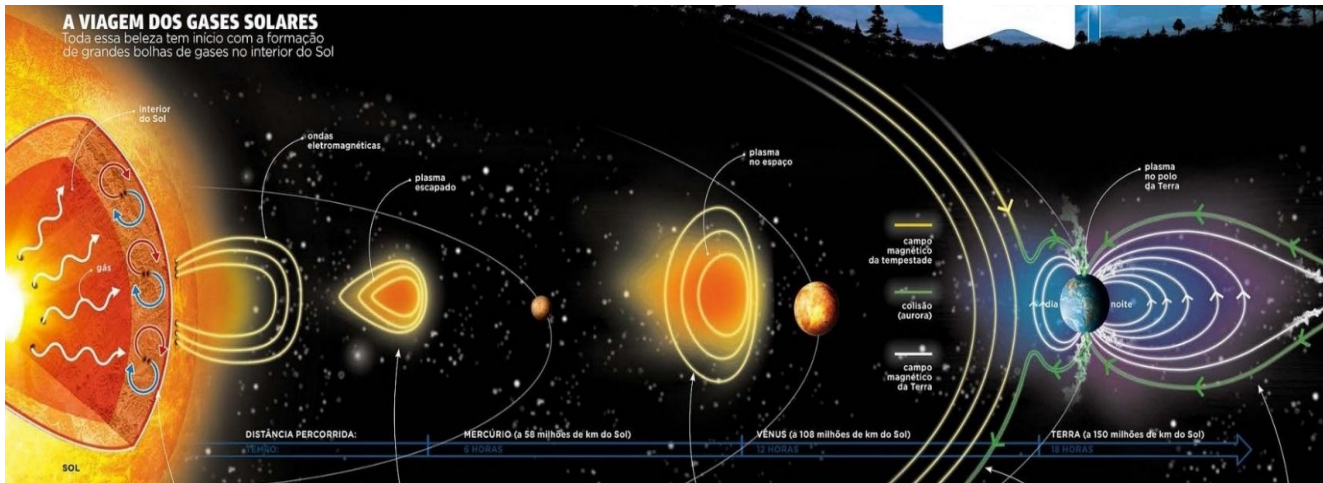
Fonte: Cecatto, 2009

### 1.1.7.2 A interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra

Como já mencionado, o Vento Solar libera para o espaço partículas que atingem a Terra e interagem com o seu Campo Magnético, especificamente na parte chamada de Magnetosfera. Esses fragmentos oriundos atingem e comprime a magnetosfera causando um aumento de energia, circulação do plasma e corrente elétrica (ocorre um aumento também na ionosfera) (Phillips, 2012).

A deformação da magnetosfera causada pelo Vento Solar produz fenômenos como as auroras polares, cujas perturbações são representadas pela mudança na luminosidade e causam também efeitos no comportamento da atmosfera da Terra (Figura 1.9) (Cecatto, 2009).

Figura 1.9: Interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra



Fonte: Nasa e Departamento de Física de Oslo, 2014

### 1.1.7.3 Atividades Magnéticas

A atividade Magnética é a representação de uma ampla gama de fenômenos relacionados com o campo magnético. Para isso são utilizados alguns índices que indicam o nível de Atividade Magnética

#### *1.1.7.3.1 Índices de Atividades Magnéticas*

O objetivo de um índice magnético é fornecer informações a respeito de fenômenos complexos que variam de acordo com o tempo.

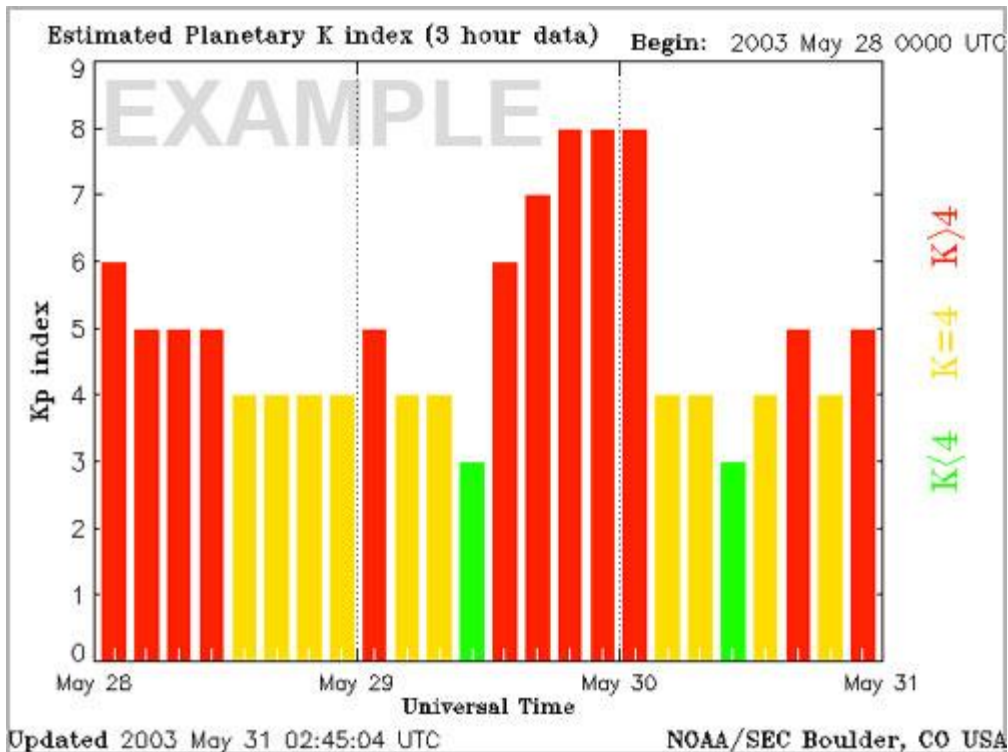
Para construí-lo são utilizadas medidas do campo magnético terrestre que são feitas por instrumentos chamados de magnetômetros. Os magnetômetros medem as variações desse campo magnético terrestre em várias localizações. Os índices mais usados são: *Kp*, *Ap*, *Auroral Electrojet (AE)* e *Disturbed Storm Time (Dst)*.

#### *Índice Kp:*

O índice *Kp* mede as perturbações na alta atmosfera (44 e 60° de latitude) terrestre e a intensidade de atividade solar que é atualizado a cada 3 horas pelo os observatórios magnéticos instalados principalmente no Canadá e Estados Unidos.

O resultado obtido é uma média entre os observatórios em uma escala de 9 pontos, cujo valor dessas medições servem para dizer o quão perturbado está o campo magnético (Ionosfera) da Terra. Quando chega a mais de 5, significa que o campo está mais ativo e que provavelmente está recebendo tempestades do Sol e quando a escala fica entre 1 e 2 ele está quieto. Em outros momentos, valores altos de Kp podem indicar rearranjos repentinos do campo magnético da Terra.

Figura 1.10: Gráfico mostrando o índice Kp no final do mês de maio do ano de 2003



Fonte: NOAA/SEC Boulder, 2003.

*Índice Ap:*

É a forma linear do índice Kp que mede, para um dado dia, o nível geral da atividade magnética sobre o globo. As medidas são obtidas utilizando dados de magnetômetros espalhados ao longo do globo que medem a variação do campo magnético na magnetosfera e das correntes que fluem na ionosfera.

*Índice AE*

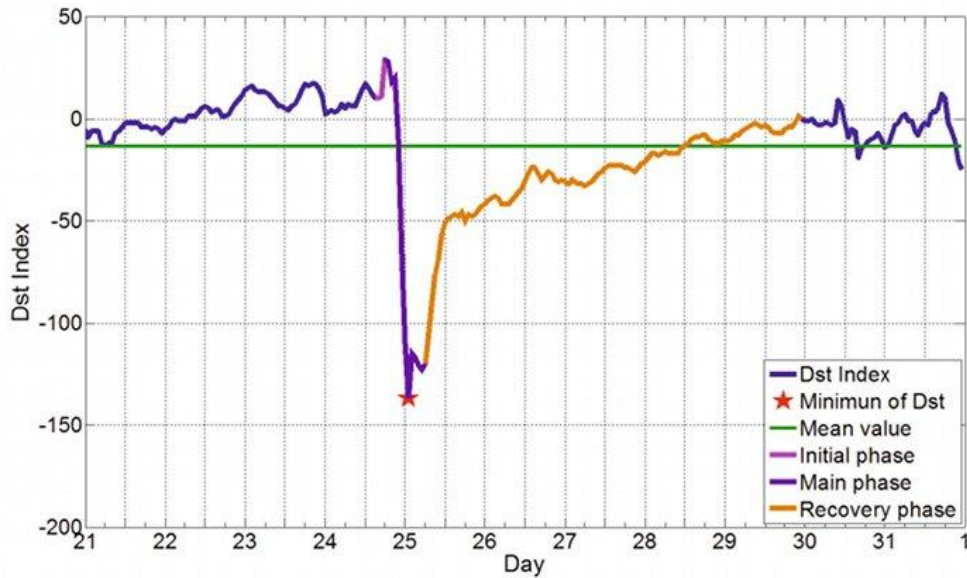
O índice AE serve para indicar a quantidade de atividade geomagnética na região auroral. As medidas são feitas a partir de magnetogramas, onde se é calculado a média dos dias mais calmos de um mês e esse valor é usado como base para subtrair dos valores obtidos a cada minuto desse mês (Toyohisa, 1992). Dessa forma obtém-se o maior valor (AU) e o menor valor (AL) para a subtração. Esses valores recebem o símbolo de envelope superior (upper) e envelope inferior (lower), respectivamente. Em síntese o AE é calculado através da diferença entre o AU e o AL. Já o AO, que fornece a medida da corrente zonal equivalente, é calculado através da média entre o AU e o AL (Guarnieri, 2006).

### *Índice Dst*

O índice Dst é a medida da variação da tempestade magnética na Terra e tem seu cálculo feito por quatro observatórios magnéticos em baixa latitude (Kakioka no Japão, Hermanus na África do Sul, Honolulu e San Juan nos Estados Unidos). Os dados obtidos através desses observatórios representam o aumento da corrente em anel da magnetosfera medida a cada 1 hora. O cálculo é feito isolando-se a variação secular (influência do campo do núcleo) e a variação diurna regular onde o resultado é somente o distúrbio causado pela tempestade (Pinheiro, 2012).

As variações demonstradas nos gráficos do índice Dst (Figura 1.11) mostram as fases de uma tempestade magnética, que seria a fase inicial (Initial phase), a fase principal (Main phase) e a fase de recuperação (Recovery phase) (De Lucas, 2005).

Figura 1.11: Gráfico que mostra a variação da tempestade magnética medida pelo o índice Dst



Fonte: Sarachaga et al, 2014

Esses distúrbios, observados a partir do equatorial do dipolo terrestre, na maioria são negativos, vistos como decréscimos no campo geomagnético (Guarnieri, 2006). Portanto uma tempestade magnética pode ser classificada em intensas quando o Dst for menor que -100 nT, moderadas quando o Dst se encontra entre -100 nT e -50 nT e fracas quando o Dst está entre -50 nT e -30 nT (Resende, 2010).

## 1.2 A ATMOSFERA DA TERRA

A atmosfera terrestre é a camada de gases que envolvem a Terra numa espessura de mais de 2000 km. Ela é formada principalmente pelo os gases Nitrogênio e Oxigênio (Faria, 2007) e possui diferentes camadas em relação à altitude.

### 1.2.1 COMPOSIÇÃO

A atmosfera da Terra é formada em aproximadamente 78% de Nitrogênio e 21% de Oxigênio. Os outros 1% restantes é ocupado pelo Argônio e 0,03% por gases nobres como o Ozônio, Criptônio, Hélio, Neônio, Radônio e Xenônio (Pena, 2013). Os valores exatos da composição atmosférica são apresentados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3: Composição da atmosfera terrestre

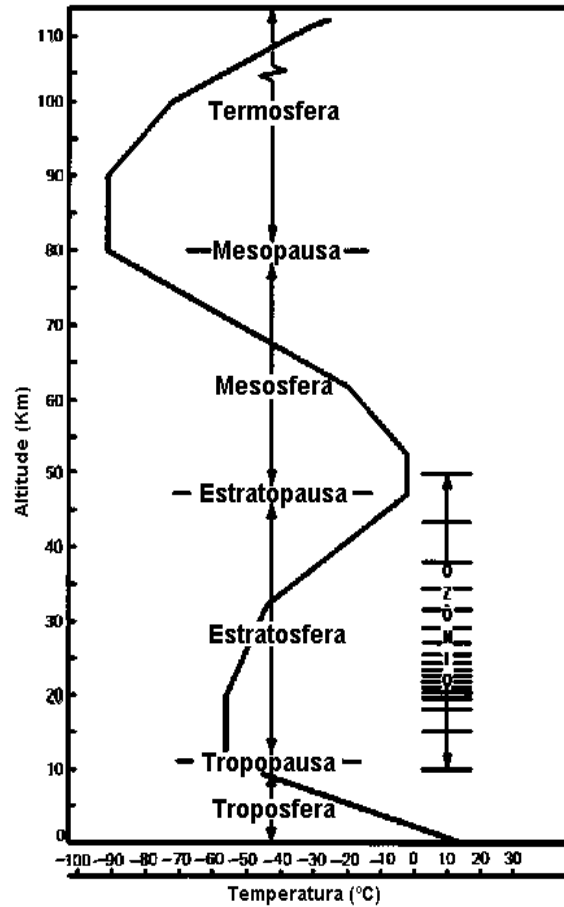
<b>Composição da atmosfera terrestre</b>		
<b>Gás</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Partes por Milhão</b>
Nitrogênio	78,08	780.000,0
Oxigênio	20,95	209.460,0
Argônio	0,93	9.340,0
Dióxido de carbono	0,035	350,0
Neônio	0,0018	18,0
Hélio	0,00052	5,2
Metano	0,00014	1,4
Kriptônio	0,00010	1,0
Óxido nitroso	0,00005	0,5
Hidrogênio	0,00005	0,5
Ozônio	0,000007	0,07
Xenônio	0,000009	0,09

Fonte: Grimm, 2002

A sua temperatura se dá pela o grau de aquecimento dos gases presentes na atmosfera terrestre. Esse grau varia de acordo com a altura das camadas atmosféricas (Figura 1.12) (Moises, 2009).



Figura 1.12: Temperatura nas camadas atmosféricas terrestre

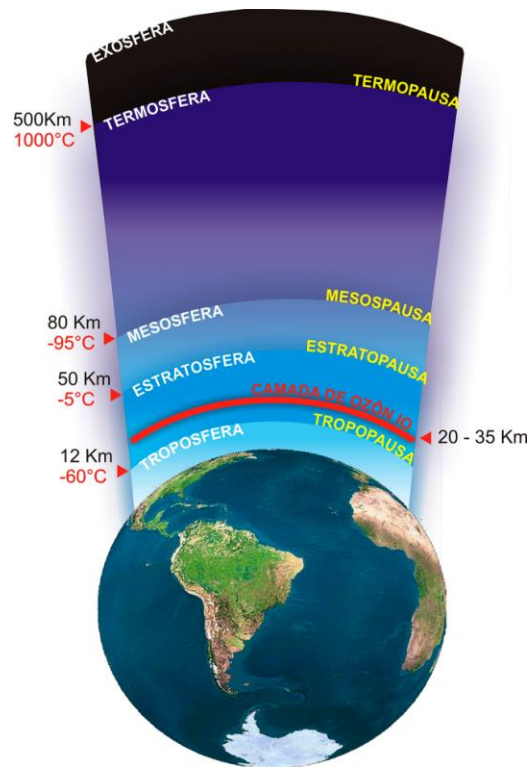


Fonte: Grimm, 2002

## 1.2.2 CAMADAS ATMOSFÉRICAS

A atmosfera terrestre se divide em camadas de acordo com as suas propriedades físicas e químicas (Figura 1.13). Estas camadas são designadas como: Troposfera, Tropopausa, Estratosfera, Estratopausa, Mesosfera, Mesopausa e Termosfera (Luiz, 2010).

Figura 1.13: Divisões das camadas atmosféricas terrestre



Fonte: Vodianitskaia, 2015

### 1.2.2.1 Troposfera

A Troposfera é a camada mais inferior da atmosfera terrestre. Ela estende-se até os 20 km no equador e 10 km nos pólos (Aranha, 2006). Seu peso equivale a 80% da atmosfera onde está concentrado  $\frac{3}{4}$  dos gases. É na Troposfera que ocorre às mudanças climáticas como a chuva, geada entre outros (Petrim, 2014).

### 1.2.2.2 Tropopausa

A Tropopausa é a camada que separa a Troposfera e a Estratosfera. Ela possui temperatura na ordem dos 50°C e cerca de 3 a 5 km de espessura. É caracterizada pela inversão da

temperatura em relação à altitude, em que abaixo da tropopausa há uma diminuição da temperatura e acima um aumento da temperatura aumenta (Filipe, 2013).

### 1.2.2.3 Estratosfera

A Estratosfera se encontra em torno de 50 km de altitude. É nela que a temperatura aumenta devido à absorção da radiação ultravioleta pelo o Ozônio presente nesta camada. Além disso, nesta camada ocorre o Efeito Estufa, caracterizado pelo aquecimento excessivo da atmosfera terrestre devido à emissão de certos gases para atmosfera (Aranha, 2006).

### 1.2.2.4 Estratopausa

A Estratopausa é a camada que separa as camadas Estratosfera Mesosfera. Encontra-se a 50 km de altitude e chega a uma temperatura de 0° C.

### 1.2.2.5 Mesosfera

A Mesosfera está localizada em 50 a 80 km de altitude. Ela caracteriza-se por ser uma região fria, com uma temperatura que varia entre os -10°C até os -100°C. Devido à esse esfriamento, ocorre nessa camada um fenômeno chamado de aeroluminescência (Silva, 2014).

### 1.2.2.6 Mesopausa

A Mesopausa é a região que divide a Mesosfera e a Termosfera. Ela se situa a aproximadamente 90 km de altitude e possui temperatura, de aproximadamente, -80°C. Nessa região há uma separação de processos da difusão molecular e da difusão turbulenta.

### 1.2.2.7 Termosfera

A Termosfera é a camada que se localiza de 90 a 550 km de altitude. Nessa camada a temperatura aumenta junto com a altitude atingindo até 1200°C (Aranha, 2006). Esse aumento de temperatura se dá pela a velocidade alta em que as moléculas de gases se movem (Grimm, 2002).

### 1.3 IONOSFERA

Descoberta em 1902, por dois cientistas chamados de Arthur Kennelly e Oliver Heaviside, a Ionosfera se localiza entre 60 a 1500 km de altitude (Sarmiento, 2009). Ela se caracteriza, por haver uma interação entre átomos e moléculas neutras na atmosfera, que gera uma concentração de elétrons e íons livres através da fotoionização ou do processo corpuscular. Por esse fenômeno, ela é considerada a atmosfera ionizada da Terra (Aranha, 2006, Amorim, 2010).

A fotoionização é o processo onde as moléculas dos gases presentes na Ionosfera (H, He, O<sub>2</sub>, O, N<sub>2</sub>, N) absorvem as faixas espectrais EUV e Raios- X a ponto de retirar elétrons das órbitas dos átomos neutros (Figura 1.14). Esse processo chama-se corpuscular, no qual as partículas ionizadas com elevada energia cinética causam a ionização através das partículas neutras, e o número de íons produzidos é proporcional ao número de partículas ionizáveis (Kirchhoff, 1991).

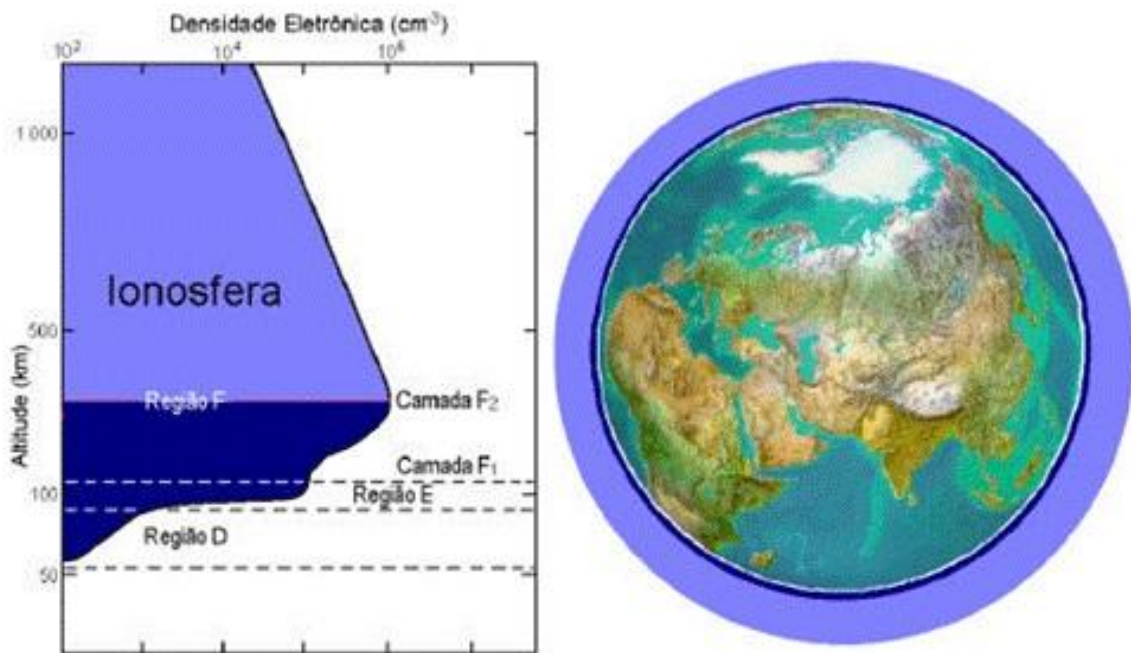
Figura 1.14: Interação entre átomos e moléculas na Ionosfera (fotoionização)



Fonte: Adaptada de BUGOSLAVSKAYA, 1968 *apud* EL GIZAWY, 2003

Na Ionosfera ocorre a reflexão das ondas de rádio onde o intervalo de frequência depende de vários fatores. As ondas na faixa de HF são refletidas pela Ionosfera e são devolvidas a Terra após percorrerem distâncias significativas. O instrumento mais utilizado para investigar esses fenômenos é a ionossonda (Sarmiento, 2009). Ela possui diferentes camadas delimitadas verticalmente devido a densidade de elétrons e do seu comportamento. De acordo com o seu perfil vertical, à medida que a radiação eletromagnética penetra na atmosfera mais densa, a produção de elétrons livres aumenta até um nível onde a densidade se torna máxima. Porém abaixo deste nível, mesmo com esse aumento de densidade na atmosfera neutra, a produção de elétrons decresce, pois a maior parte da radiação ionizante já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção de elétrons. Assim, devido as diferentes taxas de absorção e aos diferentes constituintes atmosféricos, são formadas as regiões denominadas de D, E e F, sendo essa última subdividida em F1 e F2 (Figura 1.15) (Salomoni,2008).

Figura 1.15: Altitude e densidade das camadas ionosféricas



Fonte: Denardini, 2006

### **1.3.1 REGIÃO D**

A região D é a camada mais baixa da Ionosfera e ela se localiza entre 60 a 95 km (Denardini, 2006). Ela é a camada menos densa em elétrons, podendo não ser detectada durante a noite (Santana, 2000). A região D é observada com bastante importância na radiopropagação, uma vez que ela pode atenuar, refletir e/ou absorver os sinais de rádio. Além disso, a região D é considerada a mais complexa nos aspectos químicos (Denardini, 2006). Ela tem como causas principais a alta pressão e a grande variedade de fontes de ionização onde as principais fontes são:

- Raios X ( $l < 10 \text{ \AA}$ ): produzem  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ;
- Radiação Lyman- $\alpha$  ( $l = 1216 \text{ \AA}$ ): produz  $NO^+$ ;
- Raios cósmicos: ionizam principalmente nas alturas inferiores da região D;
- Radiação na faixa do EUV (com comprimento de onda entre 1027 e 1118  $\text{\AA}$ );
- Partículas de origem solar ou auroral.

### **1.3.2 REGIÃO E**

A região E se localiza acima da região D, entre 90 e 150 km de altura (Santana, 2000). O Sol é sua principal fonte produtora de densidade eletrônica, portanto, ao meio-dia local, que é o período de maior incidência do Sol, a densidade atinge seu valor maior e ao anoitecer essa densidade decresce significativamente (Bispo, 2000). Nesta região há a presença de íons metálicos como  $Mg^+$  e  $Fe^+$  onde a presença desses íons é creditada à desintegração meteórica pelo atrito com a atmosfera terrestre e na formação da camada E-esporádica (Es). A camada Es tem como característica refletir as ondas de rádio devido a sua grande densidade eletrônica (Denardini, 2006).

### **1.3.3 REGIÃO F1**

A região F1 encontra-se entre 150 e 200 km de altitude. A sua observação se dá durante o dia sendo mais pronunciada no verão, durante a noite tende a desaparecer. O principal íon da camada F1 é o  $O^+$  e a espécie molecular predominante é o  $N_2$  (Aranha, 2006, Denardini,

1999). Ela se funde com a região F2 formando a região F da Ionosfera (Silva, 2013). Essa região é refletora das ondas de rádio com maior densidade do plasma (Zolesi; Cander, 2014).

### **1.3.4 REGIÃO F2**

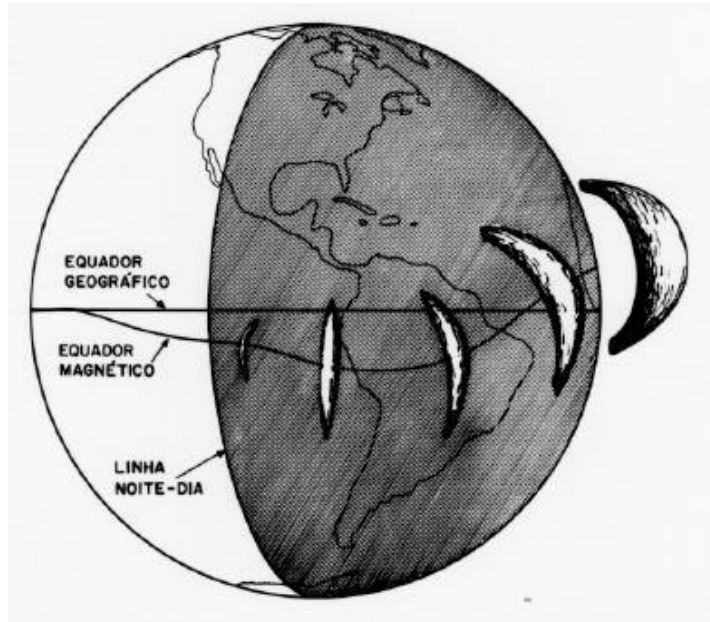
A região F2 se concentra em torno de 220 a 1000 km, sendo a parte mais alta da Ionosfera (Silva, 2013, Denardini, 2006). É nesta região em que ocorre o pico na densidade eletrônica que desempenha um papel importante tanto de dia quanto de noite na reflexão de ondas de rádio de altas frequências (HF) (Batista et al., 2002). Ela apresenta concentração maior de elétrons durante o dia e durante a noite há um decaimento, porém ela ainda continua com uma densidade eletrônica significativa (Denardini, 2006).

### **1.3.5 IRREGULARIDADES NA IONOSFERA**

#### **1.3.5.1 Bolhas Ionosféricas**

As Bolhas Ionosféricas ou Bolhas de Plasma, são regiões onde ocorre grande rarefação do plasma ionosférico, ou seja, redução da concentração do plasma, que provocam interferência nos sinais de satélites (Santos, 2005). A bolha é uma irregularidade típica de regiões tropicais, pois dependem da atividade solar para o seu surgimento. Portanto, as Bolhas de Plasma são mais propícias a aparecer durante noite. Elas tendem a surgir a cada 90 minutos, mas este tempo pode mudar com o aumento das explosões solares (Fonseca; Souza, 2003). As Bolhas Ionosféricas se desenvolvem no equador magnético e estende-se transequatorialmente ao longo das linhas de força do campo geomagnético (Figura 1.16) (Abdu et al., 1991).

Figura 1.16: Formação das Bolhas Ionosféricas



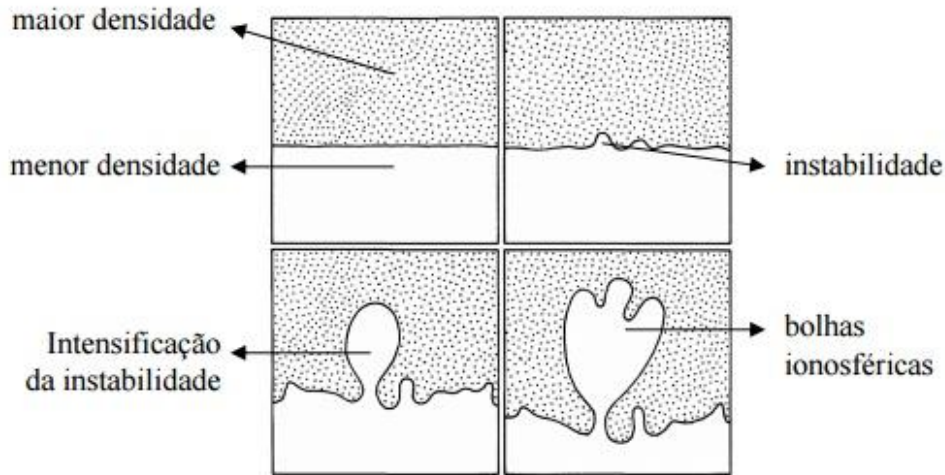
Fonte: Sobral, 1999

#### ***1.3.5.1.1 Teoria de Rayleigh-Taylor***

A teoria de Rayleigh-Taylor é a mais aceita para explicar o surgimento das Bolhas Ionosféricas. Em síntese, uma perturbação na região F da Ionosfera é capaz de gerar as Bolhas Ionosféricas (Mascarenhas, 2011). Esta teoria considera um meio mais denso sendo sustentado por um meio menos denso, que sob a ação da gravidade, resulta em um equilíbrio instável. Este equilíbrio instável pode ser rompido quando ocorre um evento que introduz uma pequena instabilidade, que sob condições especiais, intensificasse podendo desenvolver-se formando as bolhas ionosféricas (Figura 1.17) (Santana, 2000).



Figura 1.17: Evolução de uma instabilidade gerando as Bolhas Ionosféricas segundo Rayleigh-Taylor



Fonte: Kelley, 1989

### 1.3.5.2 Eletrojato Equatorial

O Eletrojato Equatorial é uma faixa intensa de corrente centrada no equador magnético, na região E da Ionosfera. Ele possui 600 km de extensão na direção norte-sul entre aproximadamente 90 a 120 km de altitude. Ao longo do dia suas direções variam devido ao sistema de correntes existentes na região E que polariza positivamente do lado do amanhecer e negativamente do lado do anoitecer (Resende, 2010). Enquanto dia, seu sentido é para leste e durante a noite, oeste (Denardini, 1999). A importância do Eletrojato Equatorial é que nele se origina o sistema de forças elétricas que regem a distribuição do plasma ionosférico em baixas latitudes e assim influí nas características da radiopropagação (Fonseca; Souza, 2003).

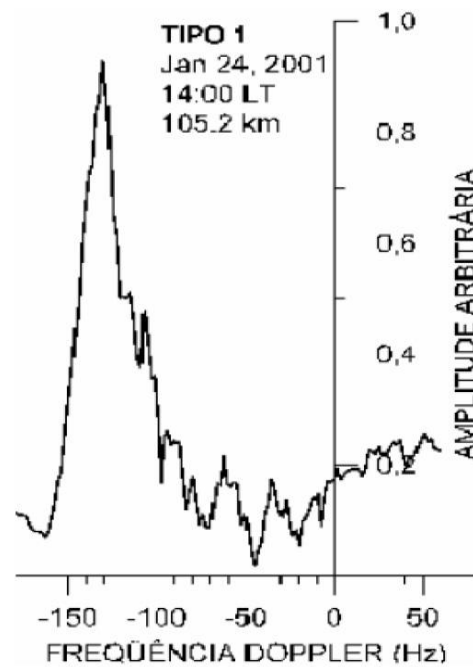
O Eletrojato Equatorial apresenta irregularidades. Essas irregularidades são definidas como perturbações na densidade eletrônica local e são fortemente alinhadas ao campo geomagnético (Denardini, 1999). Elas podem apresentar dois tipos de irregularidades levando-se em consideração a análise espectral destes ecos, o tipo 1 chamado também de

instabilidade de dois-feixes modificada (*modified two-stream*) e do tipo 2 chamado também de deriva de gradiente (*gradiente drift*) (Resende, 2010).

#### **1.3.5.2.1 Ecos Tipo 1 ou Instabilidade de Dois-Feixes Modificada (*Modified two-stream*)**

Os Ecos Tipo 1 são associados às irregularidades geradas pela a instabilidade de plasma chamada dois feixes (*two-stream*) (Denardini, 1999). Elas são caracterizadas por possuir um espectro fino de alta amplitude predominante na parte mais alta do EEJ (Figura 1.18) (Resende, 2003). O que ocorre nos ecos tipo 1 é que a força inercial dos íons com uma perturbação de densidade excede a força de pressão e tende a destruir a perturbação causando difusão através da linha de campo magnético. Isso tende a acontecer quando a velocidade de deslocamento dos elétrons ultrapassa a velocidade íon acústica (Denardini 1999).

Figura 1.18: Ecos do tipo1 onde mostra o plasma atingindo uma alta amplitude em um curto espectro



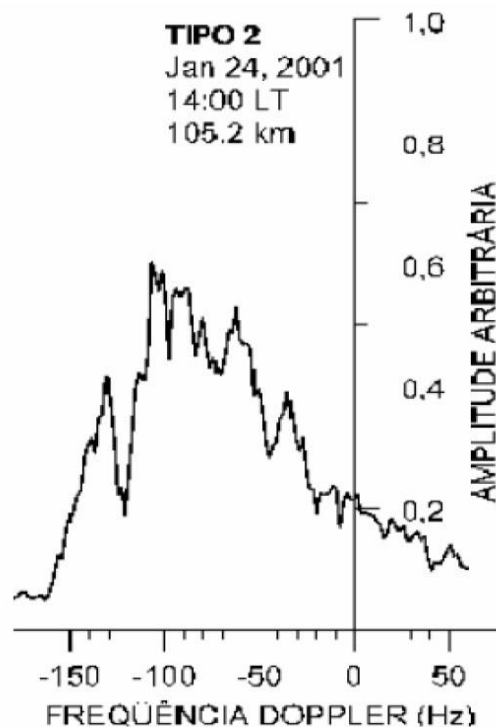
Fonte: Denardini, 2003

### 1.3.5.2.2 Ecos Tipo 2 ou Deriva de Gradiente (*gradiente drift*)

Os ecos do tipo 2 são associados as irregularidades geradas pela a instabilidade do plasma chamada de deriva de gradiente (*gradiente drift*) (Denardini, 1999). Elas possuem um espectro mais largo e de amplitude inferior às irregularidades do tipo 1 (Figura 1.19) (Resende, 2010).

O que caracteriza os ecos tipo 2 é que a instabilidade ocorre em plasmas não homogêneos se um campo elétrico ambiente gerado pela diferença de densidade muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Existe um campo magnético nesta região onde o campo elétrico produz uma força sobre ele que pode ser ascendente ou descendente dependendo da distribuição da densidade da região perturbada (Resende, 2010). Devido a interação desses dois campos existentes, a amplitude das perturbações de densidade parece crescer em relação a densidade de fundo.

Figura 1.19: Ecos do tipo 2 onde mostra o plasma atingindo uma alta amplitude em um longo espectro



Fonte: Denardini, 2003

## **CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS**

Neste capítulo será apresentado o principal tema de estudo e a metodologia para a análise dos dados.

### **2.1 - AS CAMADA E-ESPORÁDICAS (ES)**

As camadas Es são adensamentos do plasma ionosférico e ocorre nas alturas da região E. Elas são classificadas de acordo com a sua altitude e principalmente da sua latitude, que são: (Resende, 2010):

–Altas Latitudes: associada à precipitação de partículas em região aurorais e a campos elétricos (Sauli e Bourdillon, 2008).

Médias e Baixas Latitudes: associada a teoria do cisalhamento de ventos onde há um acúmulo de íons em uma camada fina numa faixa de altitude específica. Essa teoria se adequa mais aos íons metálicos provenientes da ablação meteórica, pois esses íons demoram mais para se recombinarem fazendo com que os ventos tenham maior ação sobre eles (Whitehead, 1989, Hook, 1997; Lanchester et al., 2001; Jayachandran, 1991).

–Regiões Equatoriais: são irregularidades do plasma formada no equador magnético devido as ondas planas alinhada ao campo magnético, movendo-se perpendicular a ele (Rastogi, 1972).

As camadas Es de em baixas e médias latitudes e equatoriais, principal assunto deste estudo, serão explicadas a seguir.

#### **2.1.1 CISALHAMENTO DOS VENTOS**

O mecanismo de cisalhamento dos ventos refere-se basicamente a mudança de sentido e de amplitude dos ventos nas alturas da região E, o qual ocorre um acúmulo de íons e elétrons em uma camada fina. Esse fenômeno foi primeiramente observado através de foguetes lançados por Rao e Smith (1968).

Os ventos de cisalhamento podem ser de convergência zonal e meridional. Os ventos de convergência zonal são mais comuns para as camadas de baixas e médias latitudes. Eles são ventos neutros que partem de leste para oeste, carregando junto de si os íons livres presentes no plasma da Ionosfera. Os elétrons, que por possuir carga maior que a dos íons, tende a seguir as linhas de campo elétrico terrestre, e assim, mudam a sua trajetória para a mesma que a dos íons com o objetivo de manter o plasma neutro. Conseqüentemente, há um acúmulo de cargas nas regiões em que o vento muda de sentido. Já os ventos de convergência meridional são mais comuns para camadas Es em altas latitudes. É importante ressaltar que o cisalhamento dos ventos só ocorre quando o campo magnético possui uma componente vertical, ou seja, não ocorrendo no equador magnético.

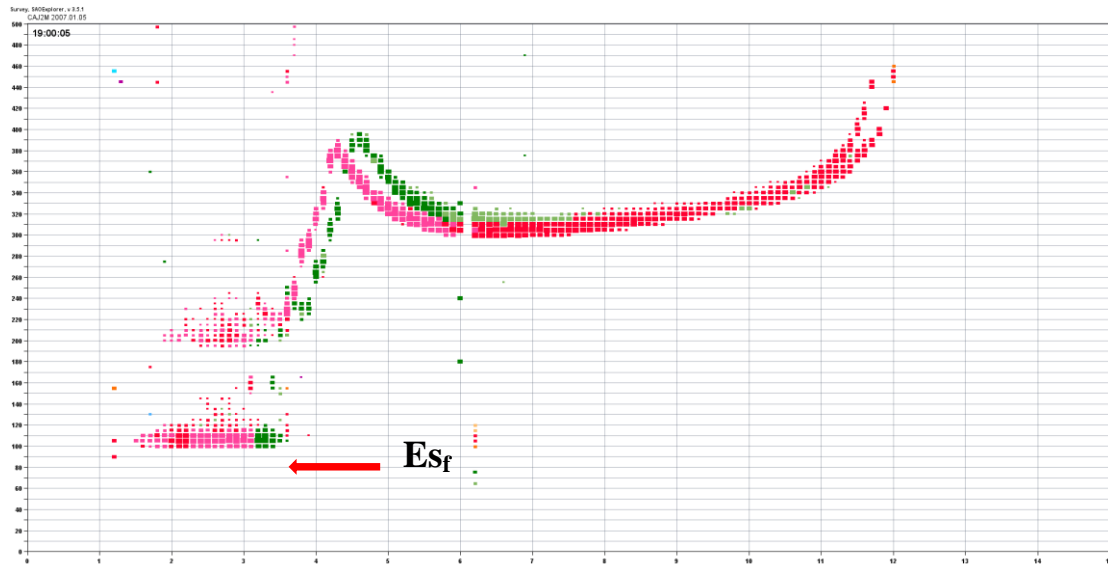
### **2.1.2 TIPOS DE CAMADAS ES EM MÉDIAS E BAIXAS LATITUDES**

As camadas Es são identificadas por sondadores ionosféricos através de ionogramas, que são ecos do sinal refletido. Estes ecos são registrados em gráficos de frequência versus altura virtual, os ionogramas, a partir dos quais é possível se obter parâmetros ionosféricos das diferentes camadas. De acordo com o seu formato nos ionogramas, as camadas Es em baixas e médias e baixas latitudes podem ganhar algumas classificações.

As classificações são: *f(flat)*, *l(low)*, *c(cusp)*, *h(high)*, *a(auroral)*, sendo que a *auroral* é mais comum ser formada em altas latitudes porém ela também pode aparecer em médias e baixas latitudes (Smith, 1957). Abaixo, elas são explicadas detalhadamente:

“f”: As camadas do tipo *flat* ocorrem geralmente durante a noite e são traços que geralmente não mostram aumento de altura com a frequência. Além disso elas ocorrem apenas quando não se é observado a camada E (Figura 2.1).

Figura 2.1: Camada Es do tipo "f" (flat) observada no dia 5 de janeiro de 2007 às 19:00 hrs da noite em Cachoeira Paulista.



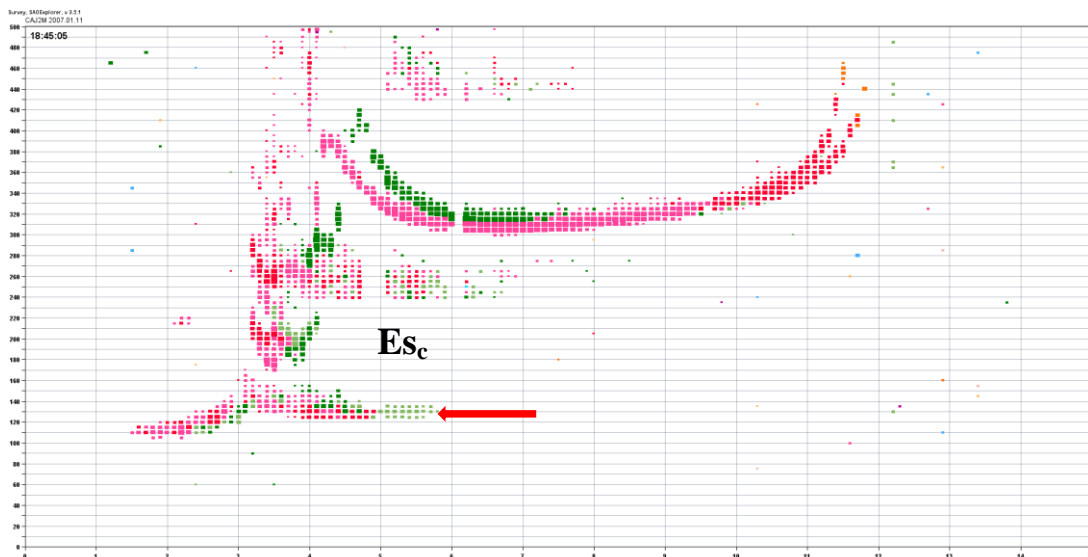
“l” : As camadas classificadas como as do tipo *low* apresentam características como um traço achatado localizado na mesma altura ou abaixo da camada E (Figura 2.2).

Figura 2.2: Camada Es do tipo “l” (low) observada no dia 4 de setembro de 2007 às 11:30 da manhã em Cachoeira Paulista.



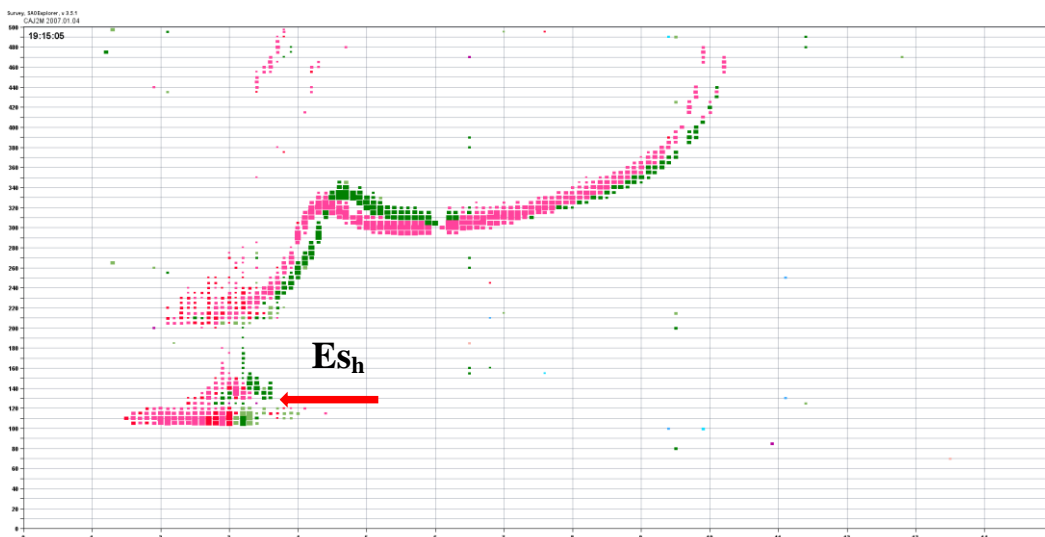
“c” : As do tipo *cusp* se mostram um traço com uma leve curvatura simétrica a camada E, ela é contínua ao traço da camada E normal (Figura 2.3).

Figura 2.3: Camada Es do tipo "c" (cusp) observada no dia 11 de janeiro de 2007 as 18:45 da tarde em Cachoeira Paulista – SP



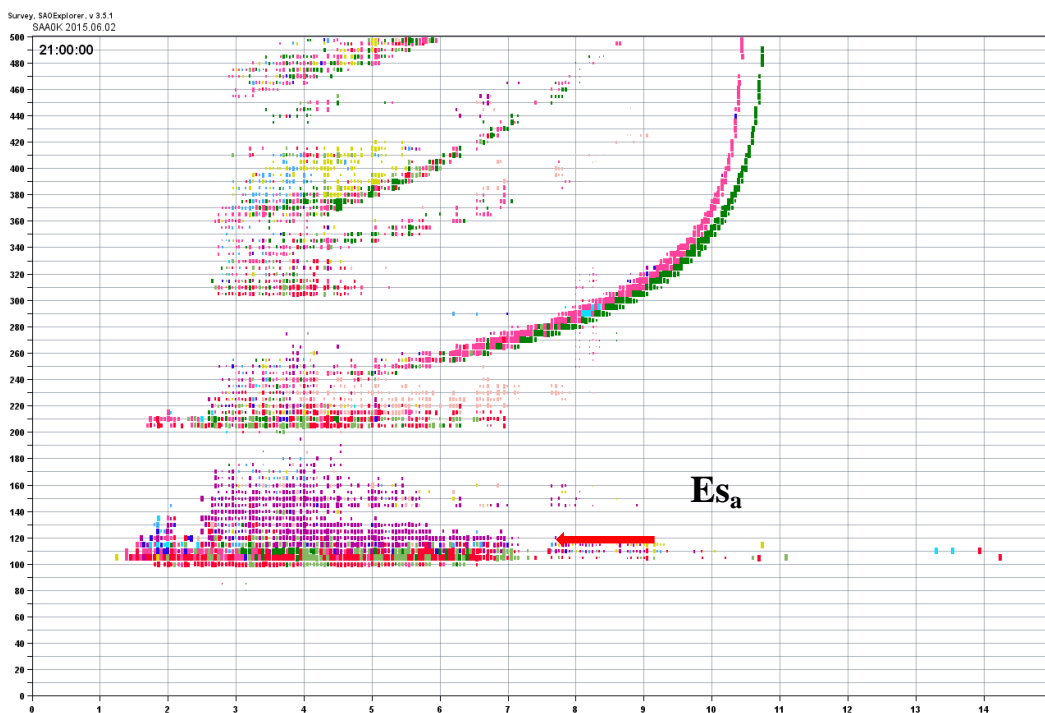
“h””: As camadas do tipo *high* em um traço descontínuo em relação a altura com a camada E normal. O traço possui uma curvatura assimétrica na qual a extremidade da baixa frequência do traço da camada Es fica claramente acima da extremidade de alta frequência do traço E normal (Figura 2.4).

Figura 2.4: Camada Es do tipo "h" (high) observada no dia 4 de janeiro de 2007 às 19:15 da noite em Cachoeira Paulista – SP.



“a”: As do tipo *auroral* apresentam traços muito difusos combinados que podem se estender por centenas de quilômetros de altura. Os padrões típicos mostram um traço de base achatado ou levemente inclinado que variam rapidamente com o tempo (Figura 2.5).

Figura 2.5: Camada Es do tipo “a” (auroral) observada no dia 2 de junho de 2015 às 21:00 da noite

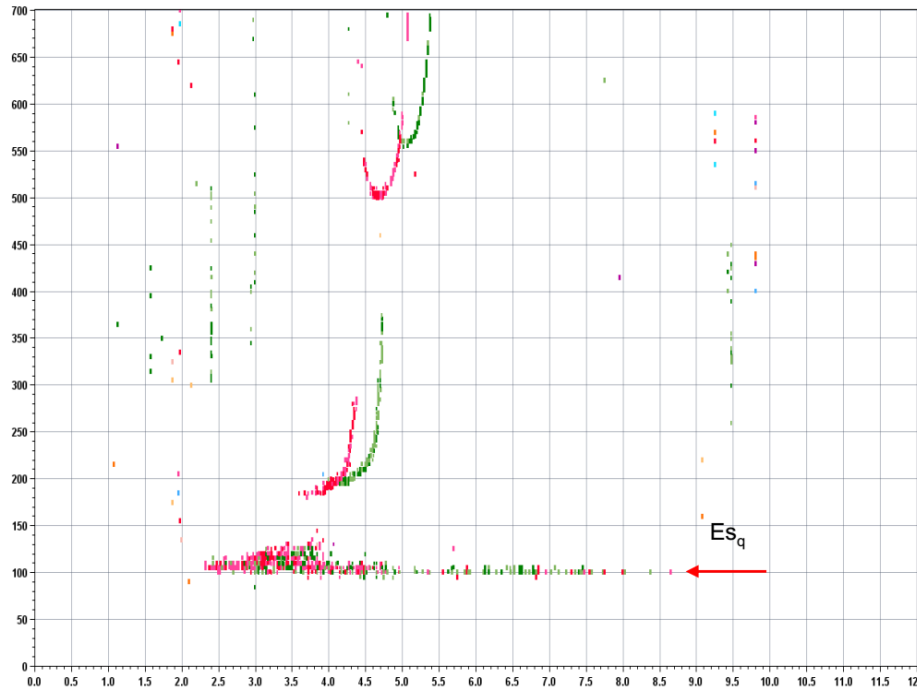


### 2.1.3 CAMADA ES EM REGIÕES EQUATORIAIS

As camadas Es em regiões equatoriais tem como perfil ionogramas com traços espalhados e difusos. Ela é denominada camada Es do tipo “q” ( $Es_q$ ) (Figura 2.6), cujo a sua existência se dá pelas irregularidades do tipo 2 devido a corrente do Eletrojato Equatorial (EEJ) (Cohen; Bowles, 1963).



Figura 2.6: Camada Es do tipo "q" observada às 14:00 do dia 10 de dezembro de 2010 em São Luís – MA.

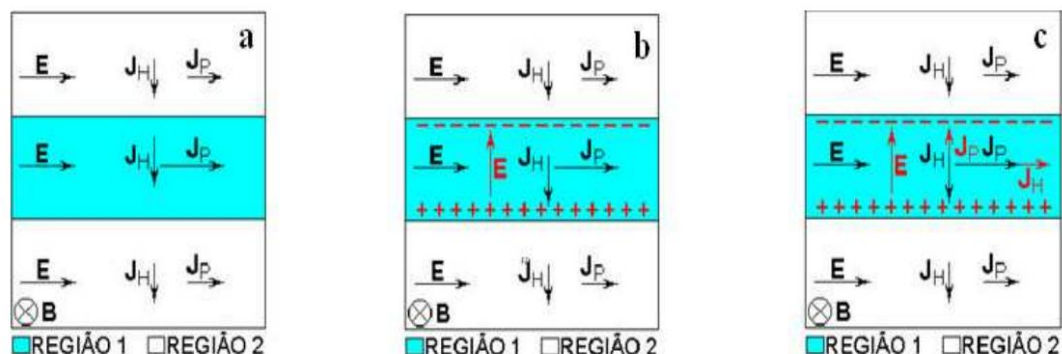


## **2.1.4 O ELETROJATO EQUATORIAL (EEJ) E SUAS IRREGULARIDADES**

O EEJ é uma corrente que flui de leste para oeste, devido ao fato de não existir componentes vertical do campo magnético na região do equador magnético da Terra.

A fim de exemplificar seu entendimento, considera-se que a corrente do EEJ flui em uma camada fina de alta condutividade (Figura 2.7 a). Assim, devido as diferentes cargas dos elétrons e dos íons, tende a aparecer uma corrente elétrica  $E$  na vertical e com o sentido para cima. Essa corrente faz com que surtem novas correntes de Pedersen e Hall (Figura 2.7 b). A nova corrente de Pedersen ( $J_P$ ) aparece paralelamente e com o mesmo sentido da corrente elétrica e a nova corrente de Hall ( $J_H$ ) aparece perpendicularmente e com o sentido para a direita (Figura 2.7 c).

Figura 2.7: Formação de corrente no Eletrojato Equatorial.

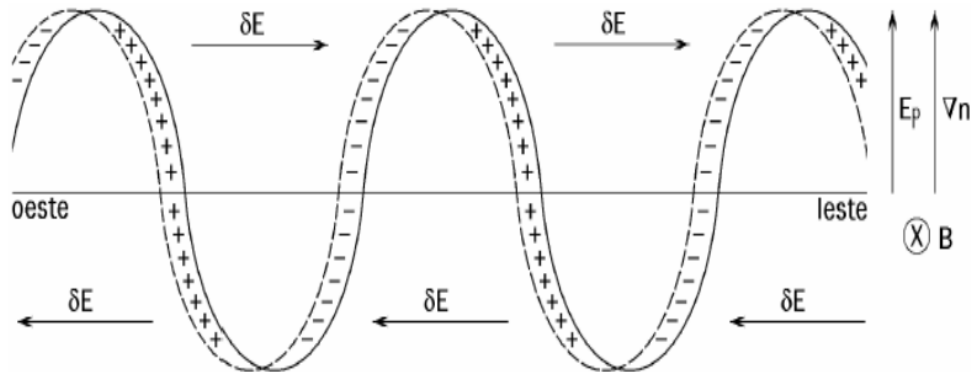


Fonte: Denardini, 1999

No plasma do EEJ apresenta irregularidades ionosféricas. Essas irregularidades são perturbações na densidade eletrônica local, que são fortemente alinhadas ao campo geomagnético. A análise espectral realizada nesses ecos levou-se a concluir que existem dois tipos de irregularidades. Elas são denominadas de tipo 1 ou instabilidade de dois feixes modificada (*modified two-stream*) e tipo 2 ou deriva de gradiente (*gradiente drift*) (Denardini, 1999).

A instabilidade do tipo 2 (deriva de gradiente) ocorre devido as derivas dos íons e dos elétrons e está relacionada com a camada Es do tipo “q”. Devido a presença de campo magnético (B), o campo elétrico (E<sub>p</sub>) realiza uma força, causando movimentos de cima para baixo. Pelo o fato de E estar direcionada para cima, origina-se uma força para oeste. Além disso, a deriva dos íons é menor que a deriva dos elétrons tendo como consequência a formação de campos de polarização (Figura 2.8).

Figura 2.8: Mecanismo de formação da instabilidade do tipo 2 (Gradient Drift).



Fonte: Fejer e Kelley (1980)

### **2.1.5 CAMADA $E_s_q$ NA REGIÃO EQUATORIAL**

A camada  $E_s_q$  formada na região equatorial possui características distintas nos ionogramas como (Rastogi, 1976):

- Aparecem em horários diurnos
- São camadas transparentes a sinais de rádio, não bloqueando as camadas mais altas.
- São vistas como um traço difuso com uma altura de 100 km.
- A frequência máxima da camada não ultrapassa os 13 MHz.
- Os múltiplos ecos da camada  $E_s_q$  geralmente não são vistos.

Esse fenômeno é observado geralmente o período diurno. Durante a noite, devido a diminuição do gradiente da densidade do EEJ, a corrente de Hall inverte o seu sentido, permanecendo para baixo onde acaba inibindo a instabilidade. Além disso, durante o dia a camada  $E_s_q$  também desaparece por curtos períodos devido a um fenômeno chamado de contra-eletrojato. A ocorrência do contra-eletrojato pode ser devido a inversão da corrente do EEJ (Rastogi, 1976).

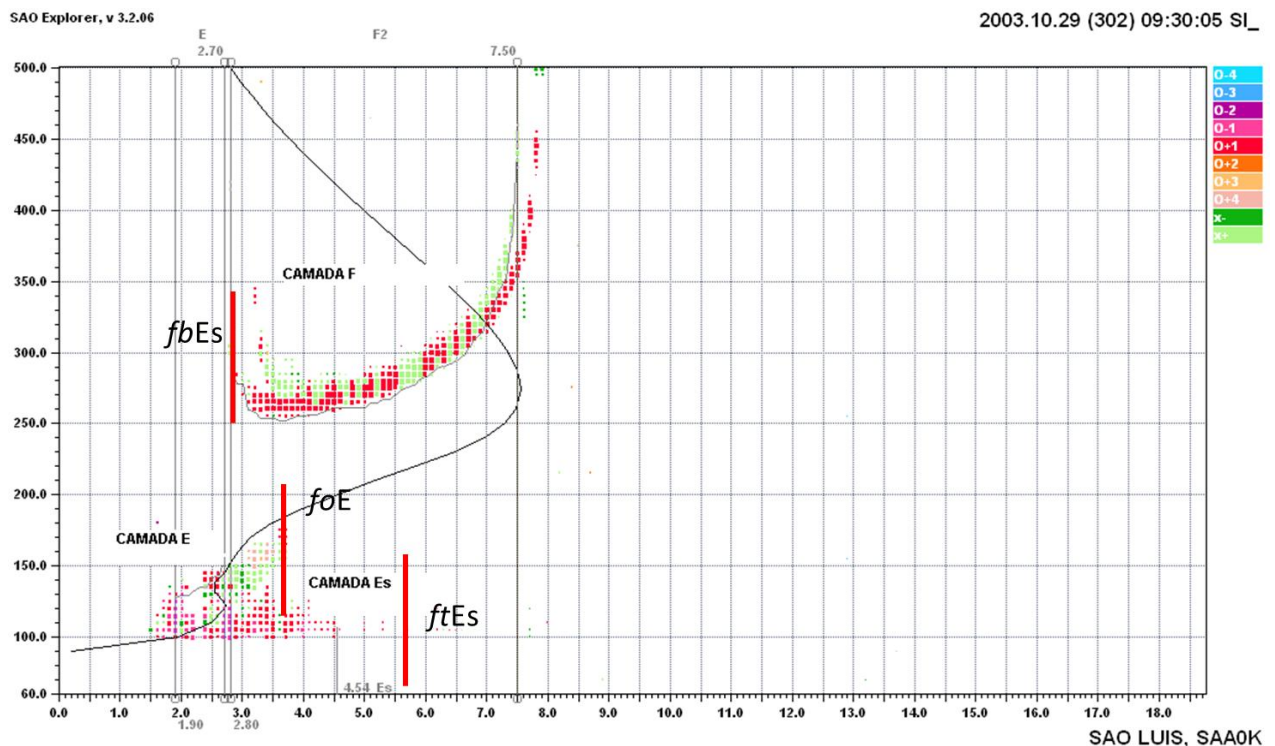
## 2.1.6 PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA IONOSFÉRICA DA REGIÃO E E DAS CAMADAS ES

Para este estudo foram analisados os parâmetros referentes a frequência da Região E (Camada E) ionosférica e da camada Es. São eles:

- $f_oE$ : Frequência crítica da camada E, ou seja, a frequência que a camada E possui.
- $fbEs$ : Frequência de bloqueio da camada Es, no caso, aonde a camada Es bloqueia o sinal da Região superior da ionosfera.
- $ftEs$ : Frequência de topo da camada Es, ou seja, a máxima frequência que a camada Es possui no ionograma.

A fim de exemplificar, a Figura 2.?? mostra as principais regiões bem como indica os parâmetros que foram estudados nessa análise.

Figura 2.9 - Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 29 de outubro de 2003 em São Luís-MA às 09 30 (UT).



### **2.1.7 O MODELO INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE (IRI)**

O modelo numérico IRI é um modelo de padrão empírico da ionosfera, baseado em fontes disponíveis de dados, patrocinado pelo *Committee on Space Research (COSPAR)* e *International Union of Radio Science (URSI)*. Além disso, com ele é possível gerar perfis ionosféricos e obter parâmetros ionosféricos simulados. Assim, este modelo pode ser usado como ferramenta para estimar a densidade eletrônica em todas as regiões do globo, para diversas épocas do ano e várias faixas de altura (Bilitza, 2001).

Neste trabalho, os dados do modelo IRI de densidade eletrônica da Região E ionosférica foram comparados com os dados obtidos através dos ionogramas. Em síntese, o parâmetro  $f_oE$  foi utilizado para obter a densidade eletrônica da região E nos dados observacionais utilizando a seguinte relação:

$$n = 1,24 \times 10^4 (f_oE)^2 \quad (2)$$

Já os dados de densidade eletrônica do modelo IRI são fornecidos diretamente. Vale ressaltar que além da transformação de frequência em densidade eletrônica, foi necessária a conversão das unidades do parâmetro  $f_oE$  a fim de possibilitar a comparação.

### **2.1.8 SELEÇÃO DOS DADOS**

Para o presente trabalho os dias selecionados para o período de estudo foram classificados de acordo com as estações do ano para duas regiões de análise, uma equatorial, São Luís e outra de baixa latitude, Cachoeira Paulista. Em síntese, foram reduzidos os parâmetros de frequência da região E e das camadas Es para 10 dias de cada mês representando a estação do ano. Os anos trabalhados foram 2006 para São Luís e 2007 para Cachoeira Paulista, que representa uma fase de mínimo solar. A Tabela 2.1 apresenta os dias selecionados para análise, classificados de acordo com as estações para São Luís e Cachoeira Paulista.

Tabela 2.1: Dias selecionados para análise, classificados de acordo com as estações para São Luís e Cachoeira Paulista

<b>Dias selecionados para análise</b>		
<b>Região</b>	<b>Estação</b>	<b>Meses</b>
<b>São Luís Cachoeira Paulista</b>	Verão	Janeiro
	Inverno	Julho
	Primavera	Setembro
	Outono	Abril

Com base na seleção de dados apresentada acima, foi iniciado um estudo comparativo os dados de digissonda coletados nas duas estações mencionadas com os dados o modelo IRI para a região E. Além disso, foram comparados os parâmetros de frequência das camadas Es entre estas estações. Este último estudo tem a finalidade de comparar o comportamento das camadas Es para a região Es de São Luís, equatorial, e Cachoeira Paulista, baixa latitude. A bolsista reduziu efetivamente vários dias das duas estações para este estudo comparativo, os quais são sumarizados na tabela acima. Os resultados são apresentados no próximo capítulo.

### **2.1.9-ATIVIDADES DE FORMAÇÃO COMPLETAR**

Aqui serão apresentadas as atividades complementares referentes ao assunto deste trabalho. Essas atividades têm como objetivo o desenvolvimento pessoal e profissional da bolsista e foram desenvolvidas no período a que se refere este relatório:

#### **1 –Título: Participação das reuniões semanais do Clima Espacial**

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Ministrante:Grupo de pesquisadores do Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace)

Período:Toda segunda-feira da semana

Carga horária:2 horas semanais

**2- Título: Workshop do Programa de Clima Espacial do INPE com Usuários**

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Ministrante:Dr. Clezio Marcos De Nardin

Período 5 de novembro de 2015

Carga horária:6 horas.

## **CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo apresentaremos o estudo realizado com os dados reduzidos pela bolsista referente às duas estações do setor brasileiro. Nesta fase do projeto, este estudo compreendeu uma análise sazonal da variação do parâmetro ionosférico da região E e dos parâmetros de frequência das camadas Es. As duas regiões de análise foram: São Luís – MA (2°31' S, 44°16' O), uma região considerada equatorial e Cachoeira Paulista – SP (22° 39' S, 45° 00' O), uma região de baixa latitude. Além disso, a bolsista comparou os dados de densidade eletrônica da região E ionosférica com os dados do modelo IRI. No mais, os anos estudados referem-se ao mínimo solar, 2006 e 2007. Estes parâmetros ionosféricos e a classificação dos dias de acordo com a estação do ano foi mencionada nos capítulos anteriores.

### **3.1- ANÁLISES DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI**

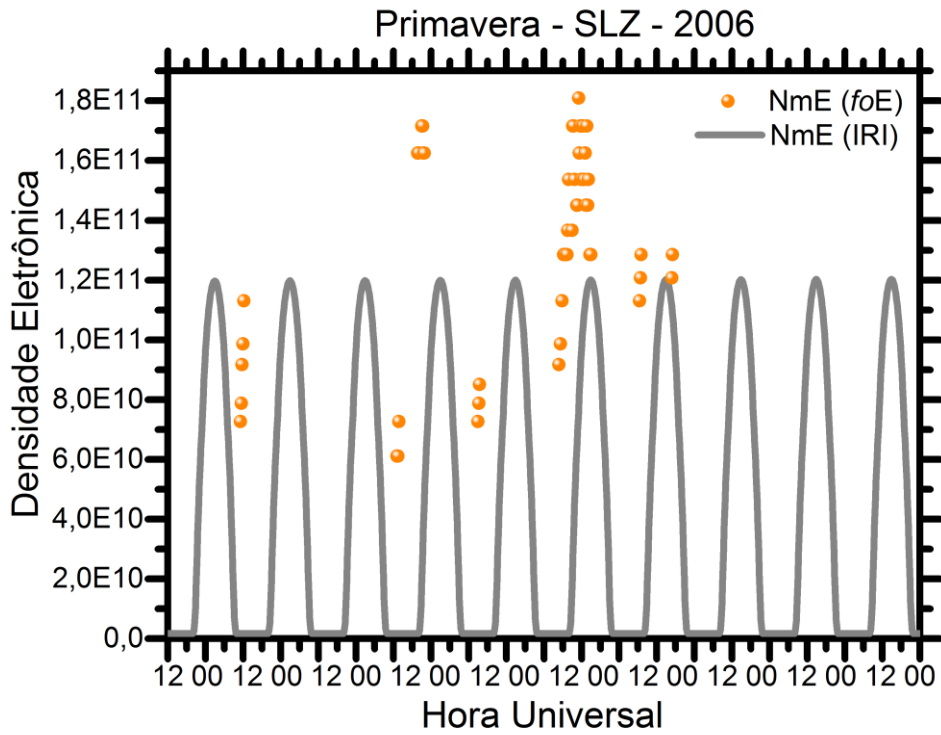
#### **3.1.1-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI PARA SÃO LUÍS**

Na figura 3.1 apresentamos os gráficos da densidade eletrônica da região E ionosférica com os dados da densidade eletrônica da região E do modelo IRI para São Luís. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

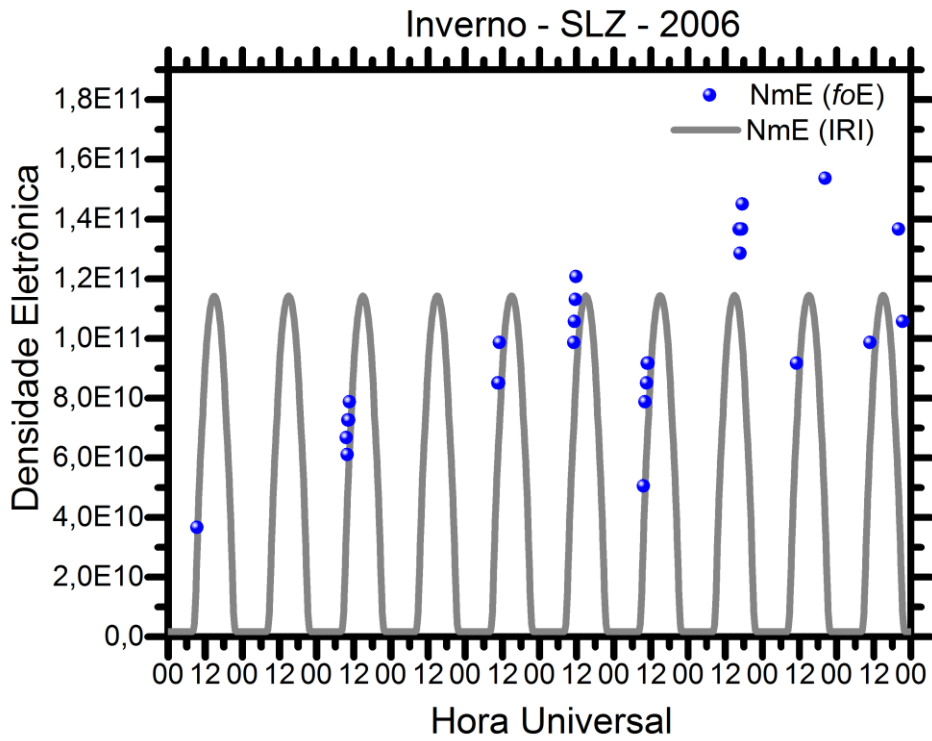


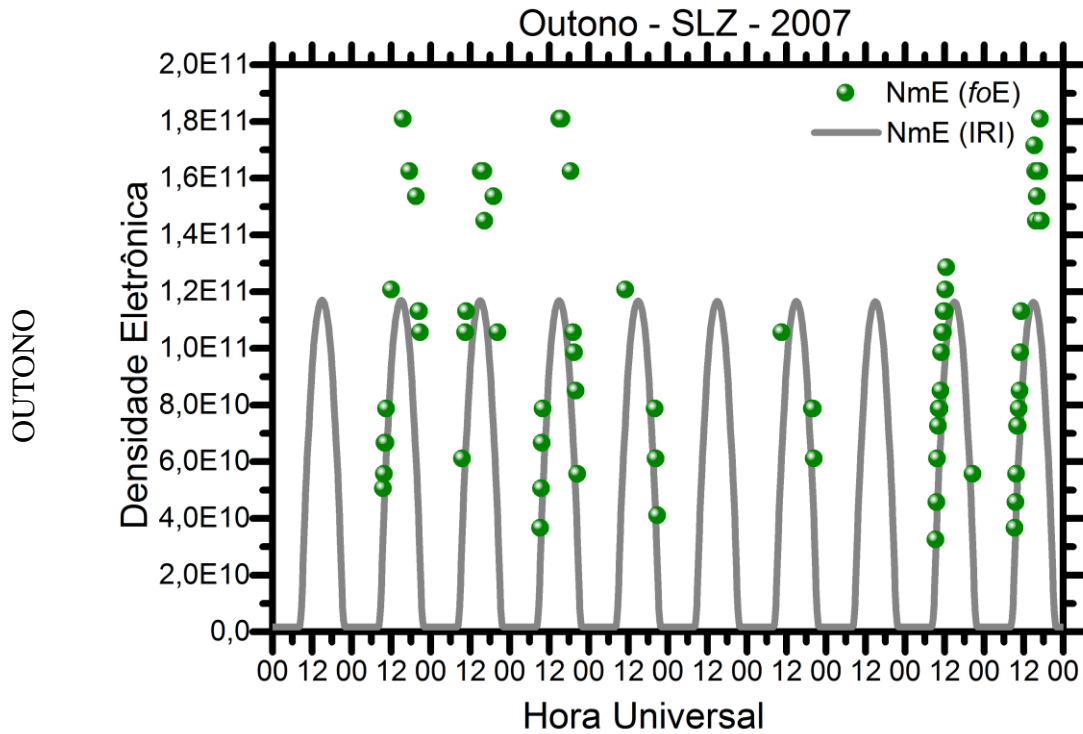


PRIMAVERA



INVERNO



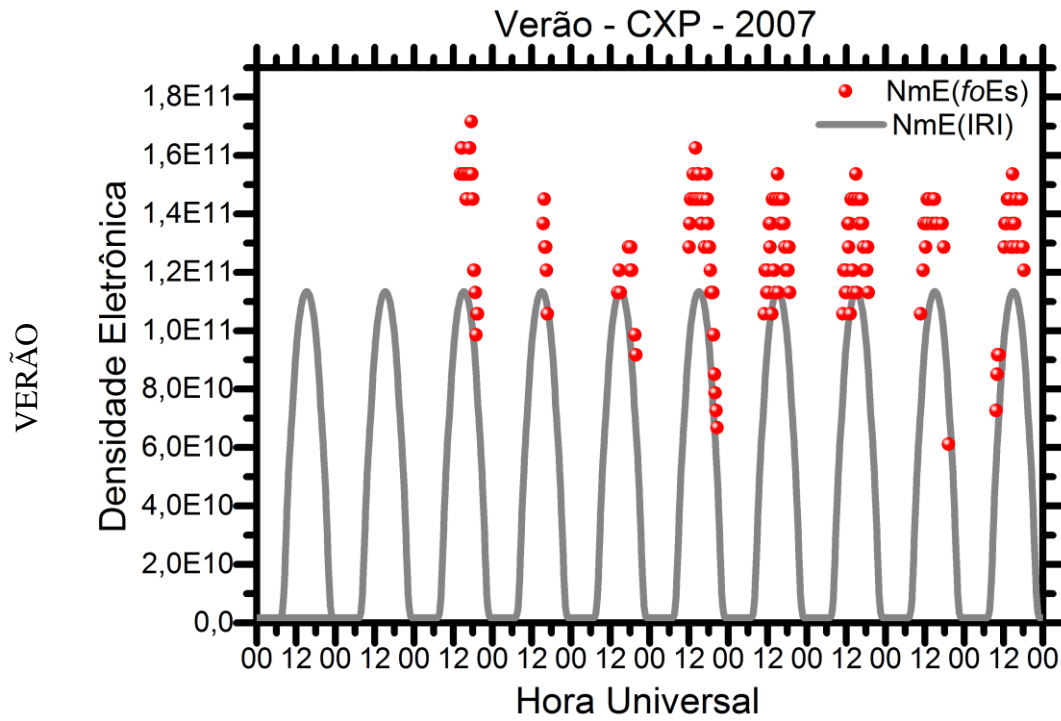


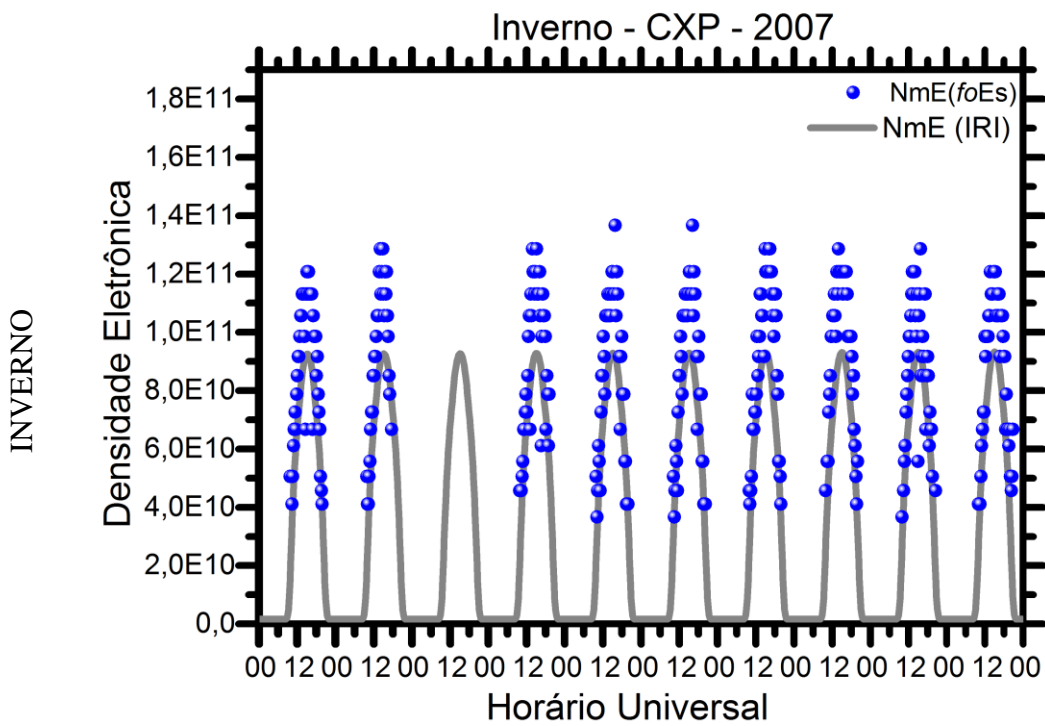
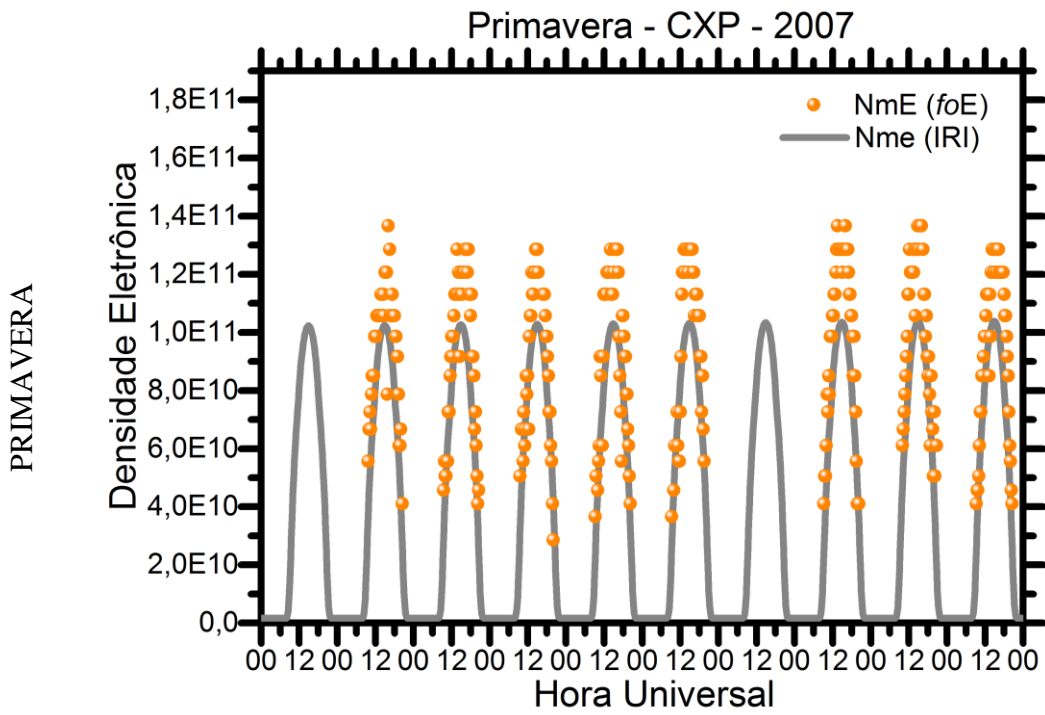
### **3.1.2-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI PARA CACHOEIRA PAULISTA**

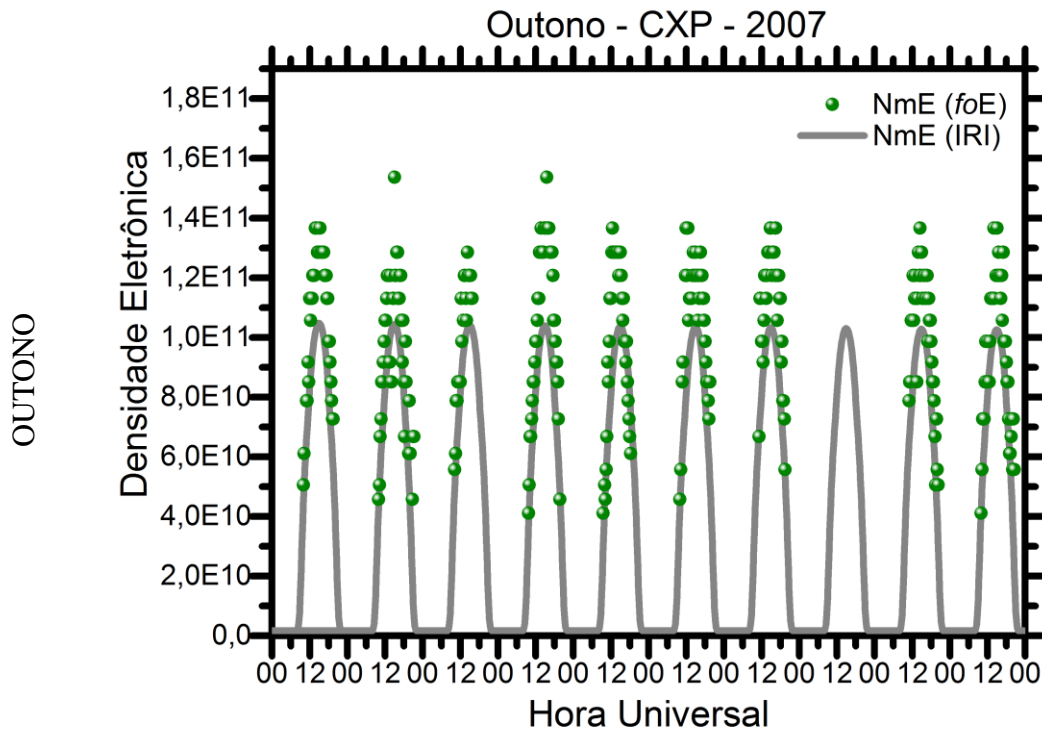
Na figura 3.2 apresentamos os gráficos da densidade eletrônica da região E ionosférica com os dados da densidade eletrônica da região E do modelo IRI para Cachoeira Paulista. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

Figura 3.2: Densidade eletrônica da região E ionosférica obtida pelo foE obtidas pelos dados observacionais (pontos) e pelo modelo IRI (linha cinza) para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.

CACHOEIRA PAULISTA





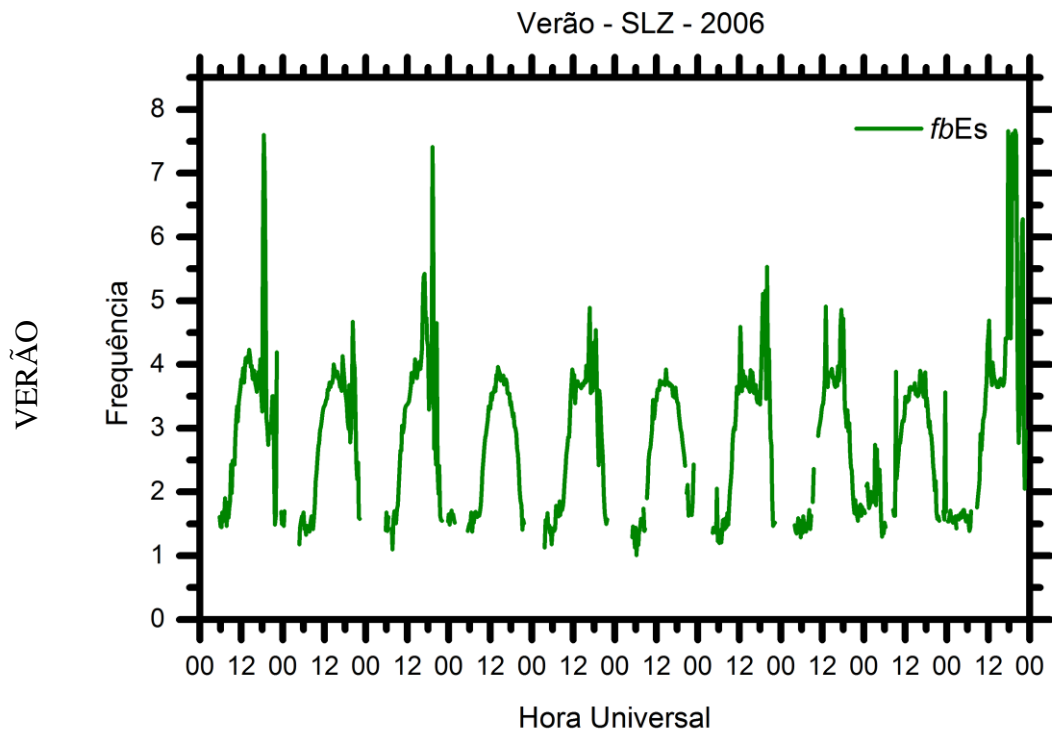


### **3.1.3-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO *fb*ES PARA SÃO LUÍS**

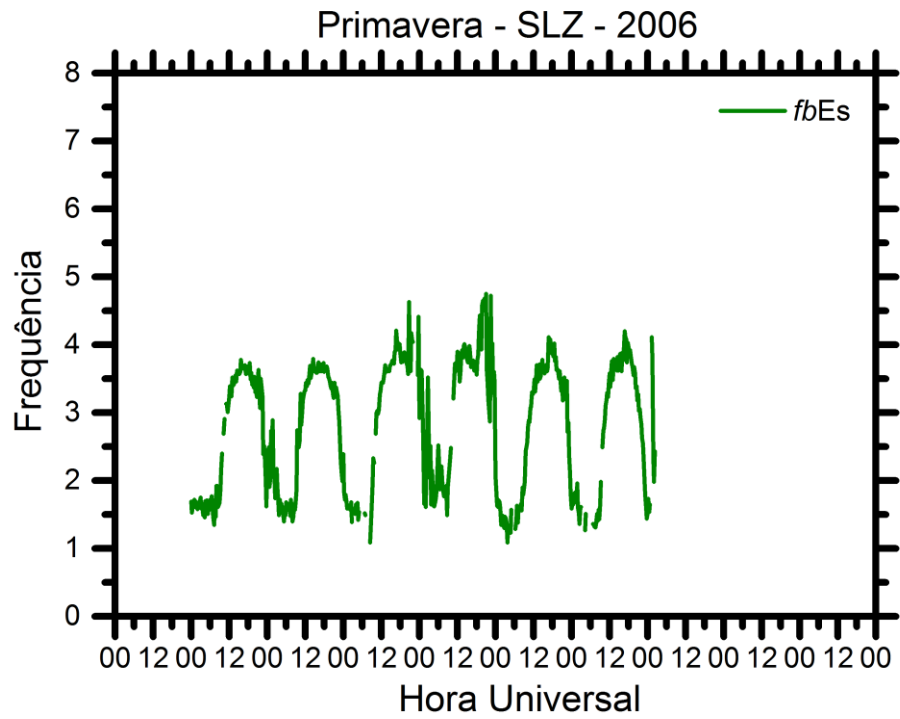
Na figura 3.3 apresentamos os gráficos do parâmetro ionosférico *fb*Es para São Luís. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

Figura 3.3: Parâmetro ionosférico  $fbEs$  para as estações do ano na região de São Luís.

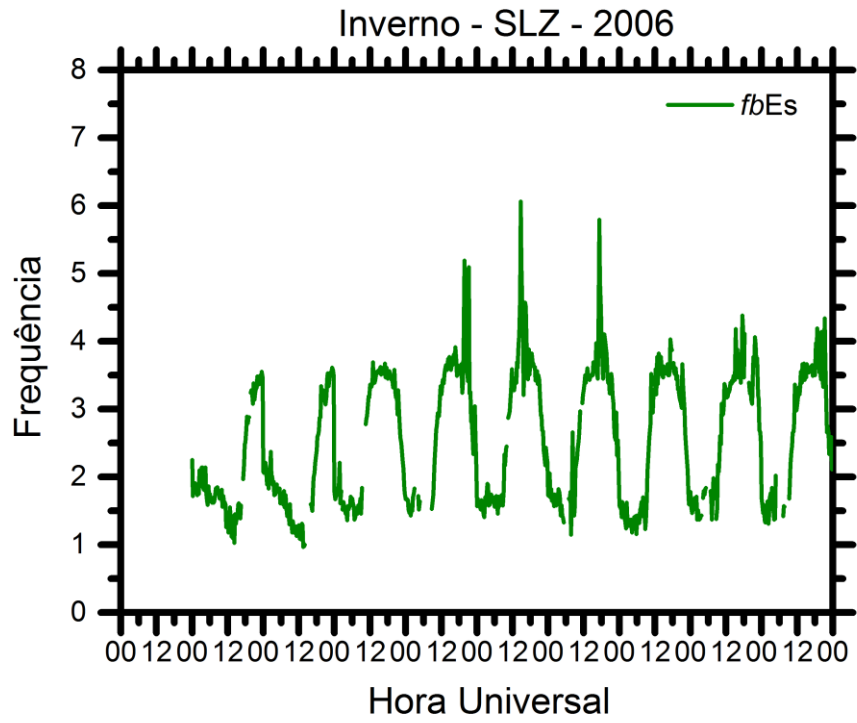
### SÃO LUÍS



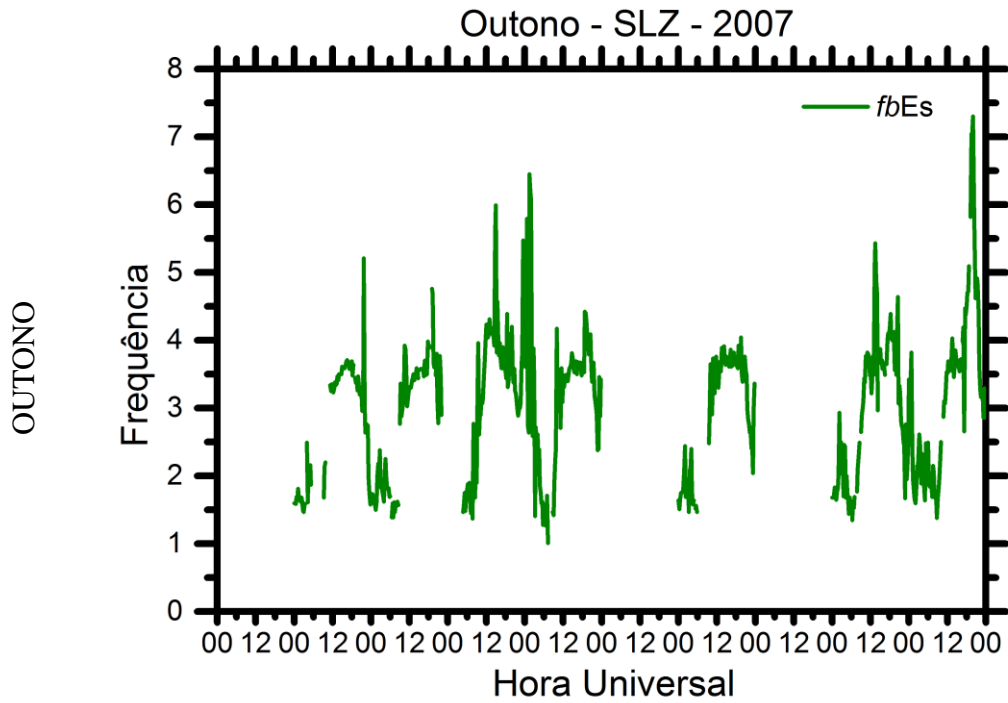
PRIMAVERA



INVERNO





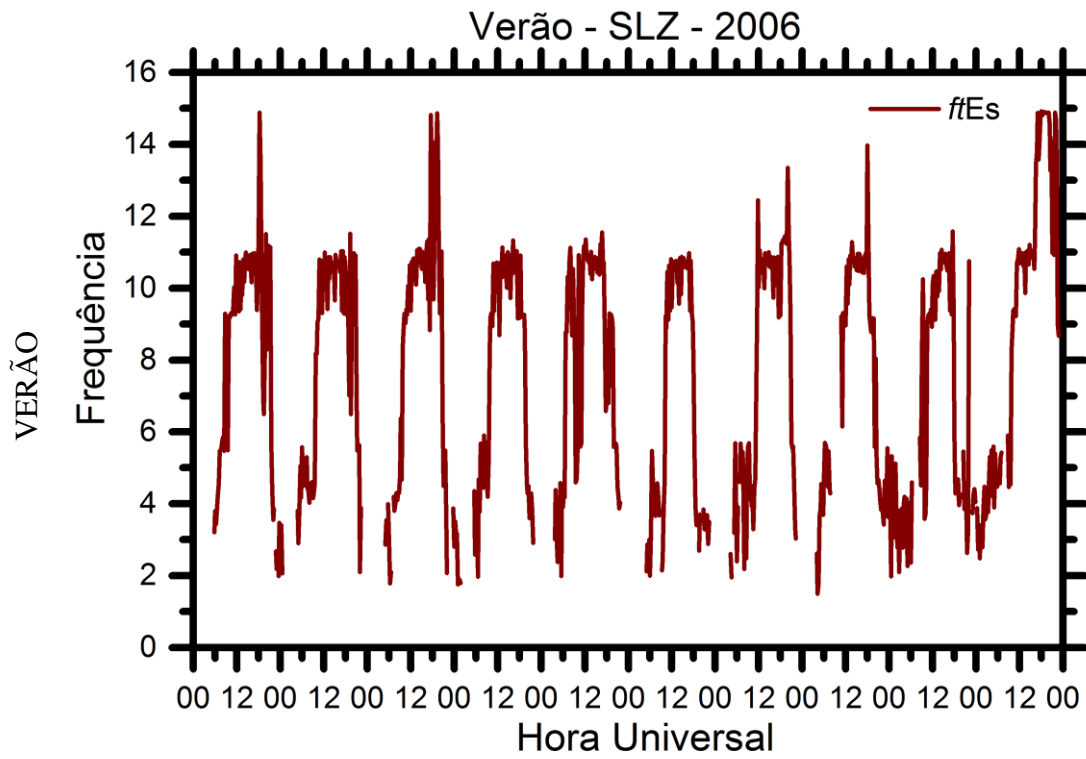


### **3.1.4-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO *fbEs* PARA SÃO LUÍS**

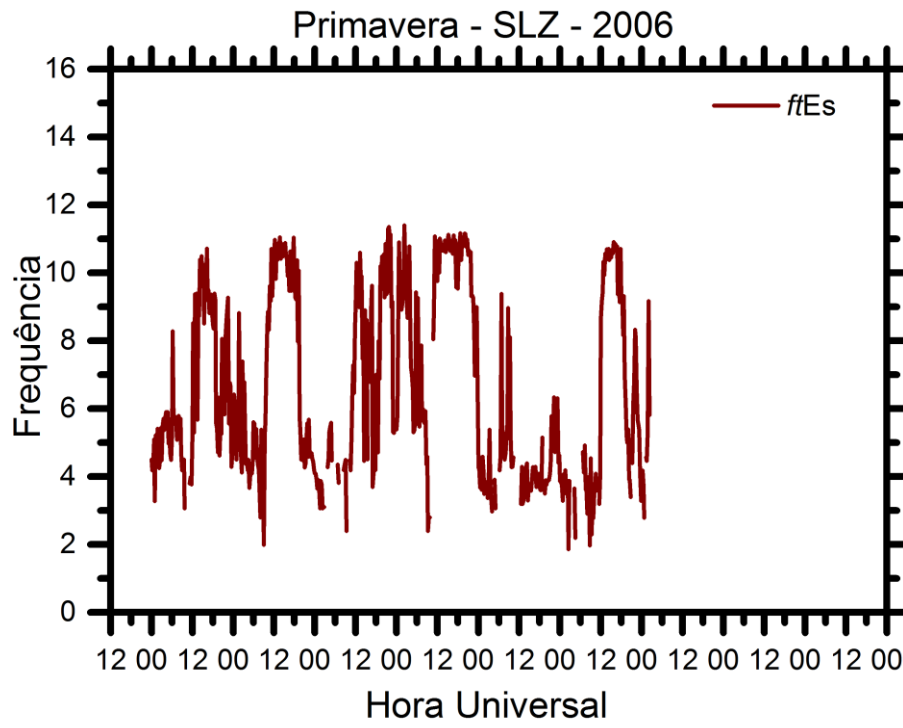
Na figura 3.4 apresentamos os gráficos do parâmetro ionosférico *fbEs* para São Luís. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

Figura 3.4: Parâmetro ionosférico  $f^oE_s$  para as estações do ano na região de São Luís.

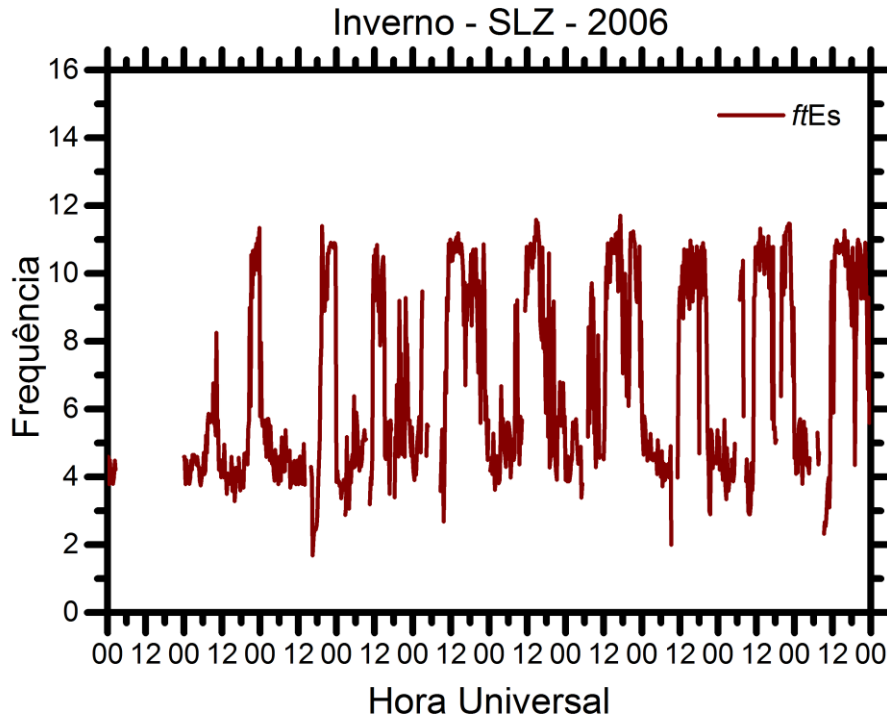
SÃO LUÍS

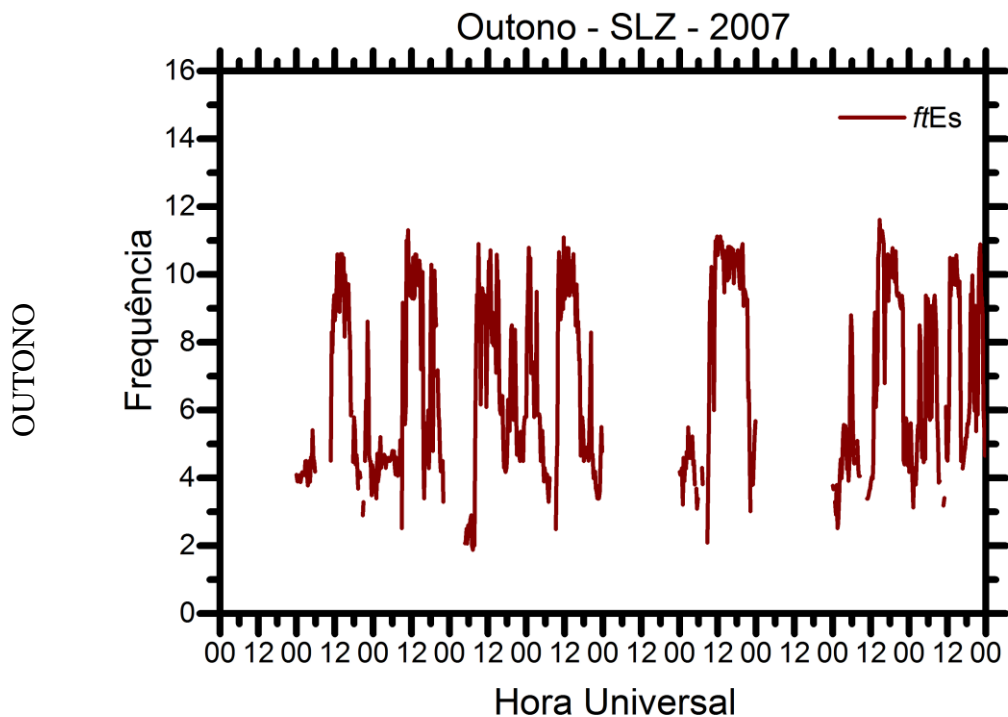


PRIMAVERA



INVERNO



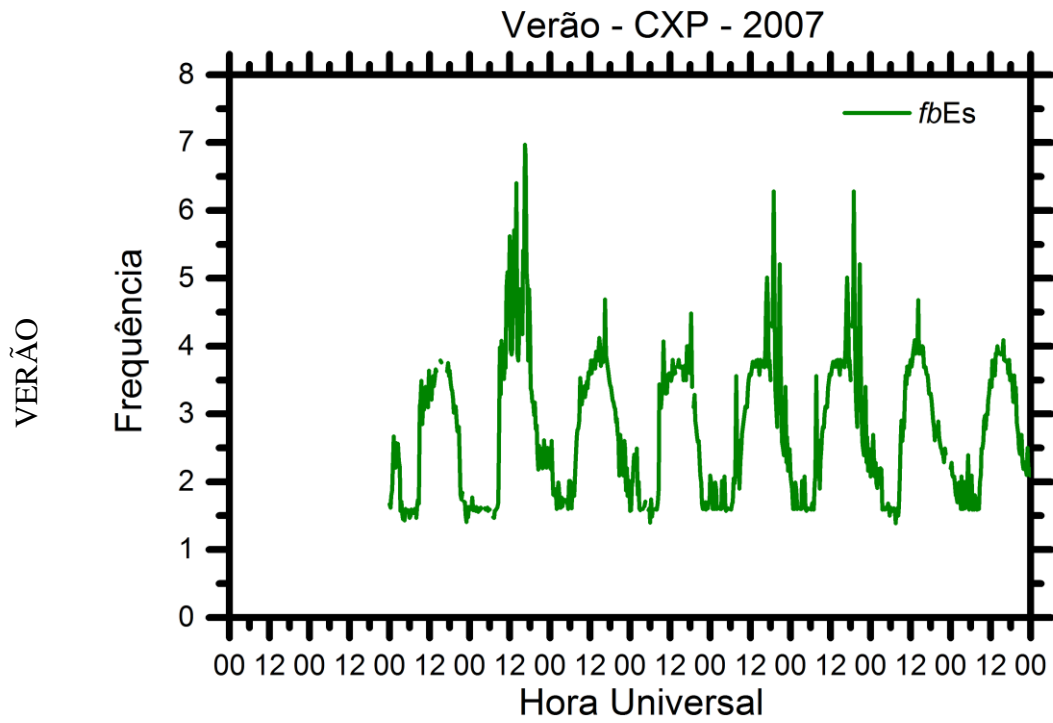


### **3.1.5-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO *fb*ES PARA CACHOEIRA PAULISTA**

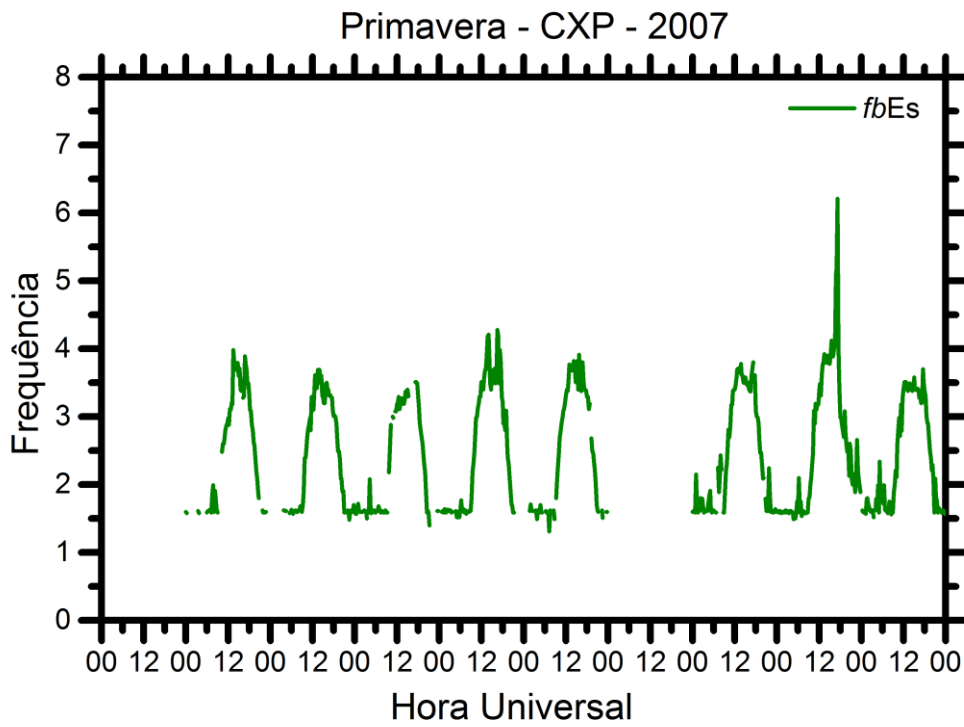
Na figura 3.5 apresentamos os gráficos do parâmetro ionosférico *fb*Es para Cachoeira Paulista. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

Figura 3.5: Parâmetro ionosférico  $fbEs$  para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.

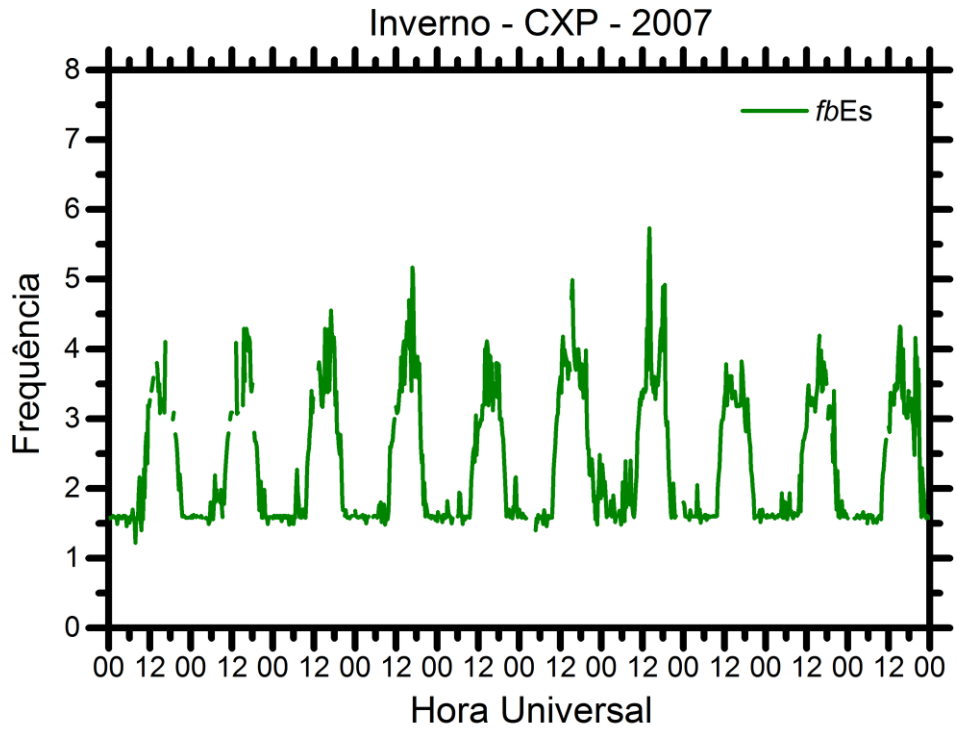
CACHOEIRA PAULISTA

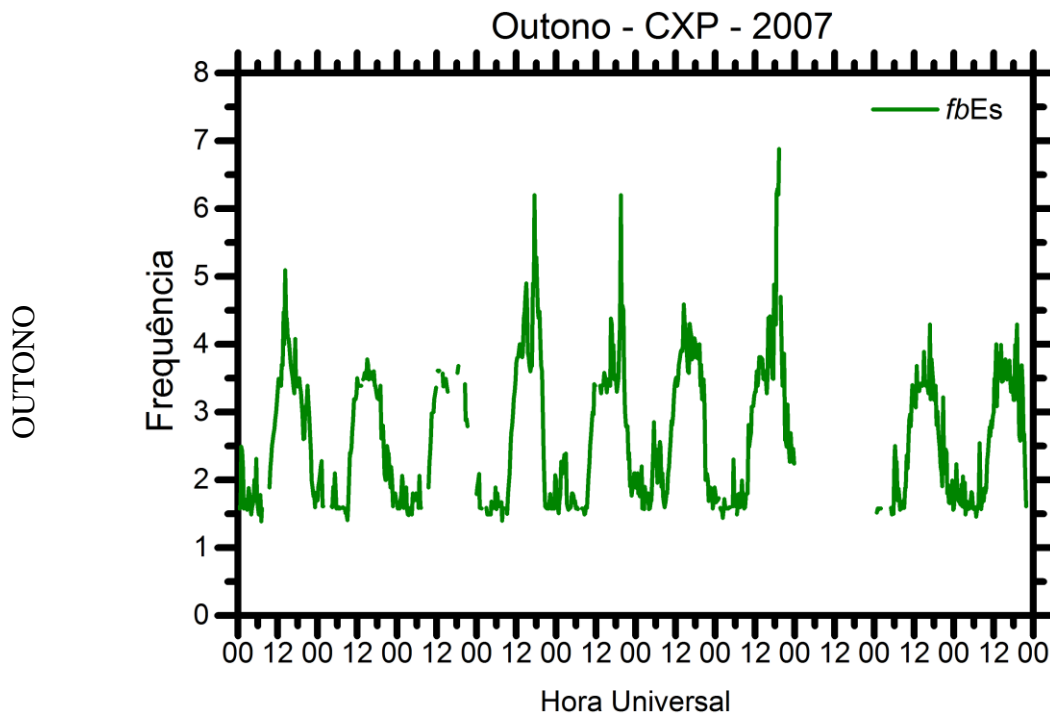


PRIMAVERA



INVERNO



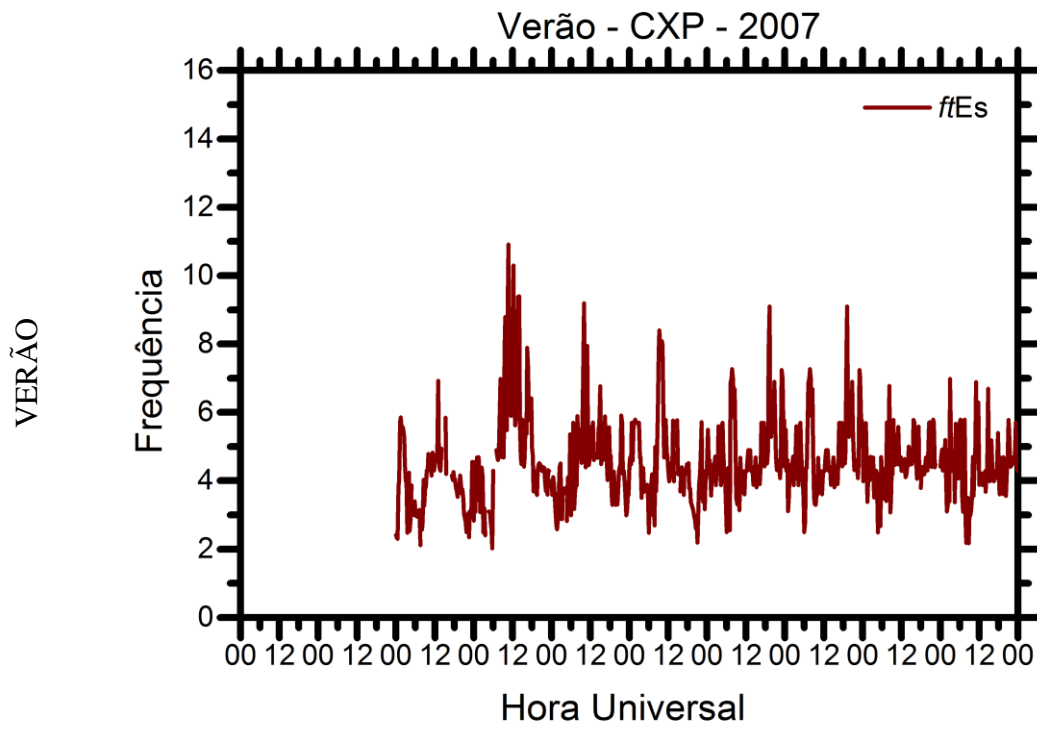


### **3.1.6-RESULTADOS DA ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO $f_bE_s$ PARA CACHOEIRA PAULISTA**

Na figura 3.6 apresentamos os gráficos do parâmetro ionosférico  $f_bE_s$  para Cachoeira Paulista. Os gráficos referem-se às diferentes estações do ano, verão, primavera, inverno e outono.

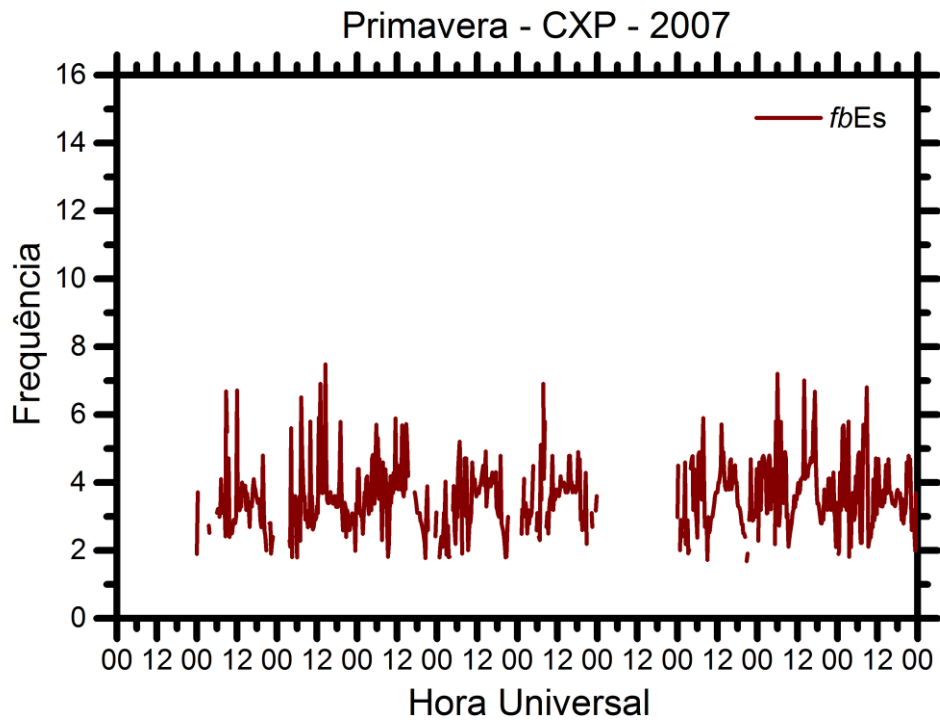
Figura 3.6: Parâmetro ionosférico  $f^oE_s$  para as estações do ano na região de Cachoeira Paulista.

CACHOEIRA PAULISTA

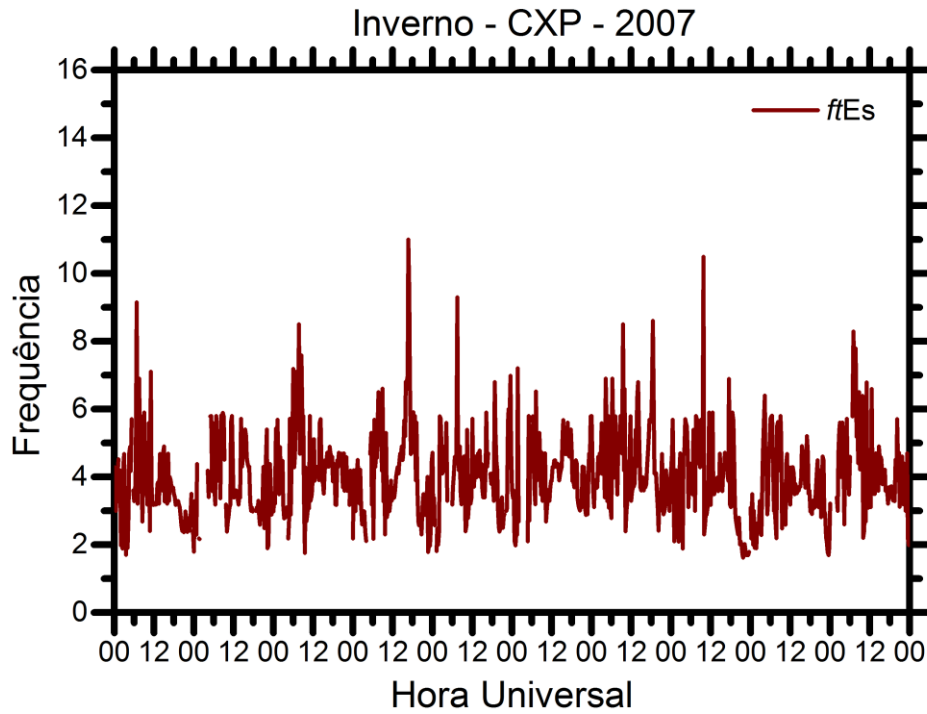


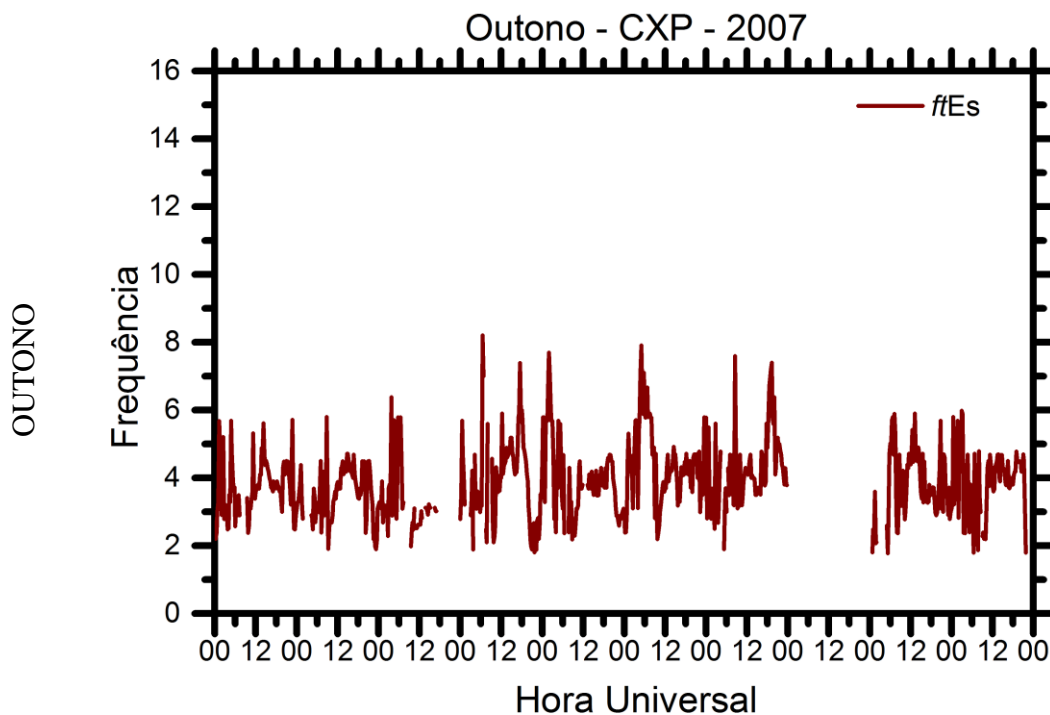


PRIMAVERA



INVERNO





## 3.2 - DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

### 3.2.1- ANÁLISE DOS DADOS DA REGIÃO E E O MODELO IRI

Os dados observacionais mostrados nos gráficos 3.1 e 3.2 são referentes à densidade eletrônica da região E que pode ser obtida através da redução automática do parâmetro  $foE$  nos ionogramas, como já foi mostrado no capítulo 2.

De uma forma geral, os dados do modelo IRI apresentam um comportamento típico da Região E, com valores de densidade eletrônica baixos durante a noite e atingindo um máximo em torno das 15 UT. Esse comportamento assemelha-se a uma função cosseno.

Em relação a São Luís, observa-se que o modelo IRI prevê a densidade eletrônica ao longo do dia enquanto os dados observacionais não é possível notar tal comportamento. Isso ocorre porque a camada Es do tipo “q”, já discutida no capítulo anterior, prejudica a observação da região E ionosférica nos ionogramas.

Apesar dos poucos dados observacionais durante o verão na região de São Luís (pontos vermelhos), nota-se uma boa concordância com o modelo. Geralmente, no verão, as camadas Es são fortemente observados devido a maior entrada de íons metálicos (Haldoupis, 2011). Isso confirma a hipótese que as camadas Es prejudicam a visualização da região E ionosférica nos ionogramas. Na primavera, os dados observacionais mostrados pelos pontos laranja não tem boa concordância com o modelo IRI. Notam-se dois pontos importantes. Um deles é que o modelo IRI antecede a decaimento da densidade eletrônica em relação aos dados observacionais. O outro é o máximo de densidade eletrônica dos dados observacionais alcançam valores maiores que  $1,8E11$  enquanto o IRI tem seu pico em torno dos  $1,2E11$ . Já no inverno, é observado que em geral há uma boa concordância entre os dados observacionais e os dados do modelo IRI. Porém, em alguns horários o IRI subestima os valores reais de densidade eletrônica. Por fim, no outono o ponto mais significativo é que a região E ionosférica aparece mais frequentemente nos dados observacionais, concordando na maioria das vezes com os valores previstos pelo modelo IRI. Alguns horários, como no inverno, o IRI subestima os valores observacionais.

Já em Cachoeira Paulista, nota-se que a região E somente não é observada durante o período noturno, uma vez que a densidade eletrônica da região E diminui significativamente e a digissonda não consegue obter os dados. Contudo, durante o dia, é visto que os dados observacionais aparecem com um comportamento semelhante ao previsto pelo modelo IRI.

Como em São Luís, no verão a região E não aparece com tanta frequência quanto as outras estações. Nota-se ainda que os modelo IRI subestima os valores de densidade eletrônica para quase todos os horários. Os valores do verão alcançam  $1,6E11$  enquanto os dados do IRI mostram valores máximos em torno de  $1,2E11$ . No restante das estações são observadas que a região E dos dados observacionais possuem um comportamento do tipo cosseno, o que é a principal característica da região E modelada. Contudo, nas três estações (primavera, inverno e outono) observa-se que o modelo IRI tem valores de densidade eletrônica inferiores do que se é observado. No inverno, é o caso mais significante, no qual

o modelo IRI não alcança valores maiores que 1,0E11 enquanto os dados alcançam valores de 1,4E11.

Comparando as duas estações, é observado que em São Luís camada  $Es_q$  prejudica mais intensamente a visualização da região E do que as outras camadas  $Es$  em Cachoeira Paulista. Em ambas as estações, o modelo IRI subestima o pico de densidade eletrônica da região E ionosférica. Contudo, de uma forma geral, o modelo concorda nos valores diurnos em relação aos dados, principalmente para a região de Cachoeira Paulista.

### **3.2.2- ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO $fbEs$**

Analisando as figuras 3.3 e 3.5 observa-se que o parâmetro  $fbEs$  possui um comportamento do tipo cosseno semelhante a densidade eletrônica da região E ionosférica tanto para São Luís quanto para Cachoeira Paulista. O perfil desse parâmetro refere-se a densidade eletrônica da camadas  $Es$ , caracterizado com valores inferiores a 2 MHz durante o período noturno, com picos de no máximo 5 MHz às 15 UT (12 LT).

Em São Luís, nota-se que ocorrem picos superpostos ao perfil de fundo para todas as estações de análise. No verão e no outono esses picos alcançam valores de até 8 MHz. Esses picos referem-se a outros tipos de camadas  $Es$ , que não a do tipo “q”, observadas na região de São Luís. Isso ocorre porque São Luís é uma região em que o equador magnético se move ao longo dos anos e, assim, o mecanismo de cisalhamento de ventos pode superar as irregularidades do EEJ (Resende, 2010).

Por outro lado, em Cachoeira Paulista, observa-se picos de densidade eletrônica que não são tão expressivos quanto São Luís. Em síntese, o pico de maior densidade eletrônica (7 MHz) foi observado durante o outono. Em Cachoeira Paulista, sabe-se que existe a presença da camada do tipo “a”, que causam esses picos significativos. Essa camada é característica de altas latitudes e é formada devido a um processo denominado precipitação de partículas. Na região brasileira, principalmente em Cachoeira Paulista, a camada  $Es_a$  ocorre porque há um fenômeno chamado Anomalia do Atlântico Sul. Essa anomalia causa

um enfraquecimento do campo magnético da Terra, possibilitando a entrada de partículas do meio interplanetário. Assim, camadas do tipo “a” são observadas em Cachoeira Paulista, causando um aumento significativo no parâmetro  $f_b E_s$ .

### **3.2.3- ANÁLISE DOS DADOS DO PARÂMETRO $f_t E_s$**

Em relação ao parâmetro  $f_t E_s$ , que é a máxima densidade eletrônica das camadas Es, nota-se que para ambas as regiões de análise não houve um comportamento típico.

Em São Luís, observa-se que o parâmetro  $f_t E_s$  tem picos de densidade superiores a 12 MHz. No verão o parâmetro  $f_t E_s$  alcançou 16 MHz. Esse fato ocorre porque a camada  $E_s q$  tem um perfil com frequências maiores (Figura 2.6) devido a ser uma camada de irregularidade do EEJ.

Por sua vez, em Cachoeira Paulista o parâmetro  $f_t E_s$  não alcança valores superiores a 10 MHz. Esse fato concorda com as teorias existentes sobre as camadas Es em baixas latitudes devido ao processo de cisalhamento de ventos. Nesse caso, as camadas do tipo “c”, “h”, e “l/f”, comuns em Cachoeira Paulista, possuem um perfil com valores baixos de frequência (Figuras 2.1 até 2.4).

Por fim, o parâmetro  $f_t E_s$  apresenta valores máximos no verão para São Luís e Cachoeira, o que confirma que o nosso estudo está condizente com os estudos anteriores sobre camadas Es. No verão, a camada Es é mais forte devido a entrada da ablação meteórica ser mais significativa. Como os íons metálicos são os mais importantes na formação das camadas Es, estas foram observadas com valores maiores em relação as outras estações.

## CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES

O estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera é de grande importância para o seu controle. Para este trabalho, os esforços foram concentrados no campo da região E ionosférica.

A rotina desenvolvida foi à realização de trabalhos referentes ao assunto proposto, ao processamento de dados e a introdução a modelagem. O método utilizado para o processamento de dados foi à redução dos dados da Digissonda e o estudo de literatura específica. Em relação ao modelo, ela iniciou os seus estudos utilizando um modelo conhecido na comunidade científica, o IRI. Assim, possibilitou-se o entendimento e o comportamento da região E e das camadas Es ionosféricas em um nível de iniciação científica. Através da análise dos dados pode-se verificar que o modelo IRI não concorda com alguns pontos em relação aos dados observacionais. Os resultados ainda permitiram observar os parâmetros ionosféricos e as anomalias que ocorrem de acordo com a hora do dia.

Finalmente, as atividades teóricas e técnicas cumpriram o cronograma do projeto sendo: estudo da bibliografia referente ao trabalho a ser desenvolvido, treinamento, familiarização e desenvolvimento de aplicativos de software de processamento de dados da Digissonda, tais como processamento e análise de dados, e introdução à modelagem, que serão importantes no futuro para a análise de outros dados para o auxílio de pesquisa no Clima Espacial. Além disso, houve um aprendizado em adquirir um comportamento científico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu, M. A.; Muralikrishna, P.; Batista, I.S.; Sobral, J.H.A. Rocket observation of equatorial plasma bubbles over Natal, Brazil using a high-frequency capacitance probe. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A5, p. 7689-7695, 1991.

Amorim, D. C. M., Caracterização de distúrbios ionosféricos propagantes na região de baixas latitudes no setor brasileiro associado á instabilidade plasma perkins gerada em médias latitudes, Dissertação (Mestrado – Geofísica Espacial) – Instituto de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Aranha, S.L., Estudo de Ondas Planetárias na Ionosfera em Baixas Latitudes e Região Equatorial, Dissertação (Mestrado – Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

Barbosa, C., Um ciclo bizarro, G1 (online), disponível:

<http://g1.globo.com/platb/observatoriog1/2012/11/19/um-ciclo-bizarro/>, acesso: agosto, 2015.

Batista, I. S.; Abdu, M. A.; Macdougall, J.; Souza, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F-3 layer over Fortaleza, Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1409-1412, 2002.

Bilitza, C. International Reference Ionosphere 2000, **Radio Science**, v.36, p.261- 275, 2001.

Cecatto, J.R., O Sol, Inpe (online), disponível:

[http://www.das.inpe.br/ciaa/cd/HTML/sol/4\\_03.htm](http://www.das.inpe.br/ciaa/cd/HTML/sol/4_03.htm), acesso: agosto, 2015.

Christhian, E. R., Coronal Mass Ejections, disponível: <http://helios.gsfc.nasa.gov/cme.html>, acesso: agosto, 2015.

Cohen, R.; Bowles, K. L. Ionospheric vhf scattering near the magnetic equator during the international geophysical year. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 81, n.7, p. 1391 - 1396, 1976.

De Lucas, A. Estudo da dinâmica da corrente de anel durante a fase principal de supertempestades magnéticas Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

Denardini, C. Regiões Ionosféricas, Inpe (online), disponível: [http://www.dae.inpe.br/~clezio.denardin/SCI\\_iono\\_regioes.htm](http://www.dae.inpe.br/~clezio.denardin/SCI_iono_regioes.htm), acesso: novembro, 2015.

Denardini, C., Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão, 137p. Dissertação (Mestrado – Ciência Espacial/ Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

Filho, K. S. O, Oliveira, M. F., UFRGS (online), disponível: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>, acesso: agosto, 2015.

França, A., As Manchas Solares, Astronomia Singular (online), disponível: <http://www.astronomiasingular.com/2013/03/manchas-solares.html>, acesso: agosto, 2015.

Faria, C., Atmosfera, Info Escola (online), disponível: <http://www.infoescola.com/geografia/atmosfera/>, acesso: outubro, 2015.

Filipe, L., O que é a tropopausa?, Artigos & Notícias (online), disponível: [http://www.artigosnoticias.com/artigos/fisica/217/o\\_que\\_e\\_a\\_tropopausa.html](http://www.artigosnoticias.com/artigos/fisica/217/o_que_e_a_tropopausa.html), acesso: outubro, 2015.



Fonseca, F. J. B. and Souza, C. F., Efeito das bolhas ionosféricas nas telecomunicações. 13 p. Dissertação (Iniciação Científica em telecomunicações) - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

Guarnieri. F. L., Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração. Dissertação (Doutorado em Geofísica Espacial)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

Gasparetto, A. J. Vento Solar, Info Escola (online), disponível:

<http://www.infoescola.com/astrologia/vento-solar/>, acesso: agosto, 2015.

García, R.; et al., Tracking solar gravity modes: the dynamics of the solar core, Wikipedia (online), disponível: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sol#cite\\_note-Garcia2007-40](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sol#cite_note-Garcia2007-40), acesso: agosto, 2015.

Grimm, A. M., UFPR (online), disponível:

<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>, acesso: outubro, 2015.

Haldoupis, C. Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere: A tutorial review on sporadic and layers. Crete: University of Crete, 2011.

Hetem, G. and Pereira, J., O Sol, USP (online), disponível: [www.astro.iag.usp/~jane/aga215/apostila/cap07.pdf](http://www.astro.iag.usp/~jane/aga215/apostila/cap07.pdf), acesso: agosto, 2015.

Hook, W. H. Ionospheric response to internal gravity waves 2. Lower F-region response. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n.34, p. 519-525, 1991.

Kopp, G.; Lawrence, G and Rottman, G., "The Total Irradiance Monitor (TIM): Science Results", disponível: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Erup%C3%A7%C3%A3o\\_solar](https://pt.wikipedia.org/wiki/Erup%C3%A7%C3%A3o_solar), acesso: agosto, 2015.

Luiz, C., Slide Player (online), disponível: <http://slideplayer.com.br/slide/343040/>, acesso: outubro, 2015.

Lanchester, B. S.; Nygren, T.; Huskomen, A.; Turnen, T.; Jarvis, M. J. Sporadic e as trace of atmospheric gravity waves. **Planet Space Science**, v. 39, n. 10, p. 1421-1434, 2001.

Maciel, W. J., O Futuro do Sol, USP (online), disponível: [www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/artigos/futuro/futuro.html](http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/artigos/futuro/futuro.html), acesso: agosto, 2015.

Mitalas, R. and Sills, K., 1992, The Astrophysical Journal, 401, 759-760.

Machado, P. Ondas Curtas (online), disponível: <http://www.ondascurtas.com/artigos/propagacao-transequatorial-via-bolhas-ionosfericas/>, acesso novembro, 2015.

Mascarenhas, M., Estudo de irregularidades ionosféricas através de simulação numérica de dados experimentais. Dissertação (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Moises, N., Temperatura Atmosférica, disponível: <http://nicolaumoises.blogspot.com.br/2009/11/temperatura-atmosferica.html>, acesso: outubro, 2015.

Pinheiro, K., O campo Magnético do Sol, disponível: [www.on.br/ead\\_2012/pdf/modulo3/3.1\\_campo\\_magnetico\\_sol.pdf](http://www.on.br/ead_2012/pdf/modulo3/3.1_campo_magnetico_sol.pdf) acesso: agosto, 2015.

Phillips, T., "Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012", NASA, disponível: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Tempestade\\_geomagn%C3%A9tica#cite\\_note-NASA-20140723a-5](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tempestade_geomagn%C3%A9tica#cite_note-NASA-20140723a-5), acesso: agosto, 2015.

Russel, C. T., Solar Wind and Interplanetary Magnetic Fields: A Tutorial, disponível: [http://www-spc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/solwind\\_interact\\_magsphere\\_tutorial.pdf](http://www-spc.igpp.ucla.edu/ssc/tutorial/solwind_interact_magsphere_tutorial.pdf), acesso: agosto, 2015

Resende, L.C.A. Estudo do comportamento dos parâmetros de frequência das camadas E-espórâdicas na região equatorial durante períodos perturbados. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Rastogi, R. Equatorial sporadic and cross-field instability. **Annales Geophysic**, v. 28, n. 4, p.717-727, 1971.

Stensmann, B. H. W., UFRGS (online), disponível: [http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008\\_02/Berenice/aula4.html](http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/mef008_02/Berenice/aula4.html), acesso: agosto, 2015.

Salomoni, C.S., GPS e Ionosfera: Estudo do comportamento do tec e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar. Dissertação (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Sarmento, C., Introdução a Ionosfera, disponível: [http://www.sarmento.eng.br/Ionosfera.htm#A\\_IONOSFERA](http://www.sarmento.eng.br/Ionosfera.htm#A_IONOSFERA), acesso: outubro, 2015.

Santana, D. C., Estudos da evolução temporal/espacial das derivas das depleções do plasma ionosférico por imagens digitais da aeroluminescência OI 630 nm noturna..Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

Silva, M. E. D., Estudo da espessura equivalente ionosférica durante um ano de baixa atividade solar. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2013.

Smith, E. K. Word wide occurrent of sporadic e. **Nature**, p. 582-587, 1957.

Toyohisa, K., Masahisa, S. and Tohru, A., disponível: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/onAEindex.html> acesso: agosto, 2015.

Vieira, M. X., Ondas Curtas (online), disponível:  
<http://www.ondascurtas.com/artigos/propagacao-pela-e-esporadica/>, acesso: novembro, 2015.

Whitehead, J. Recent work in mid-latitude and equatorial Sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.15, n.5, p.401-424, 1989.