

Universidade do Vale do Paraíba
IP&D Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

FLÁVIA ELAINE COELHO

DERIVA ZONAL DO PLASMA IONOSFÉRICO NO SETOR
BRASILEIRO DURANTE UM PERÍODO DE EXTREMA BAIXA
ATIVIDADE SOLAR

São José dos Campos, SP

2013

Flávia Elaine Coelho

**DERIVA ZONAL DO PLASMA IONOSFÉRICO NO SETOR
BRASILEIRO DURANTE UM PERÍODO DE EXTREMA
BAIXA ATIVIDADE SOLAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientadores: Prof. Dr. José Ricardo Abalde Guede
Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, SP

2013

C616d

Coelho, Flávia Elaine

Deriva zonal do plasma ionosférico no setor brasileiro durante um período de extrema baixa atividade solar / Flávia Elaine Coelho; Orientadores: Prof. Dr. José Ricardo Abalde Guede, Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes. – São José dos Campos, SP, 2013.

1 CD-ROM; 125 p. ; 21cm

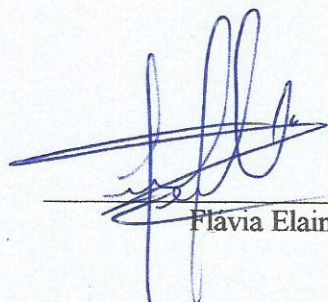
Dissertação (mestrado) - Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Irregularidades ionosféricas. 3. Bolhas de Plasma. 4. Imageador All-Sky. I. Guede, José Ricardo Abalde, orient. II. Fagundes, Paulo Roberto, orient. III. Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

CDU: 52

Autorizo exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processo fotocopiadoras ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.



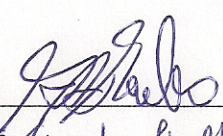
Flávia Elaine Coelho

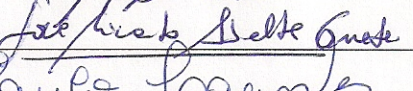
Data da defesa

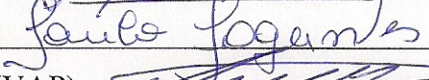
FLÁVIA ELAINE COELHO

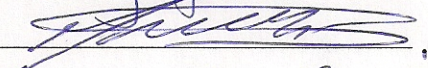
“DERIVA ZONAL DO PLASMA IONOSFÉRICO NO SETOR BRASILEIRO DURANTE UM PERÍODO DE EXTREMA BAIXA ATIVIDADE SOLAR”

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. MÁRCIO TADEU DE ASSIS H. MUELA (UNIVAP) 

Prof. Dr. JOSE RICARDO ABALDE GUEDE (UNIVAP) 

Prof. Dr. PAULO ROBERTO FAGUNDES (UNIVAP) 

Prof. Dr. MARLOS ROCKENBACH DA SILVA (UNIVAP) 

Prof. Dr. ALEXANDRE ÁLVARES PIMENTA (INPE) 

Prof^a. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa

Diretor do IP&D – UniVap

São José dos Campos, 25 de fevereiro de 2013.

O verdadeiro ser humano é aquele que busca fazer o bem sem esperar nada em troca.

FLÁVIA COELHO

Dedico a uma pessoa muito especial que passou pela minha vida, infelizmente já se foi, mas que com certeza deixou muito de si em mim, uma MULHER GUERREIRA, me ensinou muita coisa boa, sua luta pela vida, me mostrou o quanto pequenos somos nesse UNIVERSO, me fez enxergar que as coisas são pequenas demais para nos derrubar, que há muito mais, além daquilo que nosso mundo pequeno conhece, ela me ensinou que podemos ser bem melhor do que somos, e que o pouco tempo que temos, devemos aproveitá-lo, ser feliz e fazer com que todos que amamos, sejam felizes também. Esse trabalho é dedicado exclusivamente à ela que sempre acreditou em mim, suas palavras para mim, sempre foram de incentivo e confiança, infelizmente ela não o verá, mas vou deixar na história seu nome, pois é uma pessoa que merece, foi embora cedo demais, com certeza merecia mais tempo, merecia muito tempo, pessoa MARAVILHOSA! Para você tia que fez parte da minha vida e fará eternamente, até novamente eu virar poeira das estrelas! Então com muito orgulho dedico este trabalho à MARIA MARTA COELHO GUEDES, pessoa linda e maravilhosa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Ricardo Abalde Guede por toda a atenção dedicada, agradeço pela paciência e pelo grande comprometimento com este trabalho e comigo.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes que aceitou o convite para co-orientar.

A CAPES pela bolsa concedida, o qual me proporcionou dedicação e tempo exclusivo para este trabalho.

À Universidade do Vale do Paraíba e a todos os professores do Grupo de Física e Astronomia, em especial ao Prof. Dr. Valdir Gil Pillat, que sempre me auxiliou quando solicitado, sempre demonstrando boa vontade.

A meus pais Antônio e Ivone Coelho, pela educação que me deram, pelo caráter, agradeço à eles a pessoa que sou hoje.

Ao meu marido Alexandre Tardelli, que sem ele nada disso teria acontecido, ele é a minha luz, sempre, está ao meu lado em todos os momentos, seja de dificuldades ou de alegrias.

A minha filha Ana Flávia Tardelli, que sempre entendeu quando eu tinha que estudar, ela é e sempre será a razão de todo o meu esforço.

Aos meus irmãos Emerson e Lilian Coelho, pela confiança depositada em mim, e por perceberem que todos os dias aprendemos um com o outro a sermos pessoas melhores.

As minhas primas Vivian e Viviane Guedes, que juntas, principalmente nesses dois anos, passamos por muitos momentos difíceis e inesquecíveis, mas que nos ensinou muita coisa.

A Kátia Tardelli que nos incentiva a ir em frente todos os dias, acreditando sempre de que vamos conseguir.

A toda a minha família que me veêm com muito orgulho.

Aos amigos que conquistei durante estes dois anos de mestrado, e que com certeza vou leva-los pela vida inteira.

RESUMO

Nesta dissertação foram analisadas as velocidades de deriva zonal das irregularidades de plasma ionosférico de grande escala; essas irregularidades foram observadas utilizando técnicas ópticas de emissão OI 630,0 nm obtidas através de fotômetros imageadores instalados em duas localidades, no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos - SP designado por SJC e no Campus da ULBRA em Palmas - TO citado como PAL. Os dados analisados foram coletados no período de 4 anos, de 2006 a 2010, período de baixa atividade solar. Do total de 337 noites em SJC e 329 noites em PAL analisadas foram selecionadas 18 noites de ocorrências de bolhas de plasma significativas, 9 noites em SJC e 9 noites em PAL, e estudadas em duas condições: considerando altitude fixa de 280 km da camada de emissão OI 630,0 nm e com o cálculo da altitude desta camada variável ao longo de cada uma das noites analisadas. Para encontrar estas altitudes variáveis ao longo de cada noite fomos auxiliados com a análise de dados de ionossondas digitais CADI operando conjuntamente com o fotômetro imageador no respectivo observatório. Os dados de rádio disponíveis nas digissondas permitiram fazer a análise em altitudes variáveis de 12 das 18 noites estudadas para altitude fixa. Foram obtidas as médias das noites analisadas em cada observatório para ambos os métodos; em SJC a velocidade média de deriva zonal das bolhas de plasma em 9 noites analisadas no método de altitude fixa é de 84 ± 18 m/s e no caso de PAL a velocidade média encontrada é de 87 ± 12 m/s. No outro processo com altitude variável de emissão para as 8 noites analisadas em SJC, chegamos a um valor médio de 87 ± 12 m/s, e para PAL, para 4 das 9 noites selecionadas inicialmente, a velocidade média de deriva zonal das bolhas de plasma encontradas foram de 85 ± 10 m/s.

Palavras chave: Bolhas de Plasma, Deriva zonal, Emissão OI 630.0 nm, Imageador all-sky, Ionossonda Digital.

ABSTRACT

This dissertation analyzed the zonal drift velocities of large-scale ionospheric plasma density irregularities. These irregularities were observed using optical techniques of OI 630.0 nm emission obtained with photometer images from two localities: the Urbanova Campus of UNIVAP at São José dos Campos, SP (designated SJC) and Campus of ULBRA at Palmas, TO (designated PAL). The analyzed data were collected for five years, from 2006 to 2010, during a period of low solar activity. Out of the 337 nights analyzed in SJC and 329 nights in PAL, a total of 18 nights (9 nights in SJC and 9 in PAL) were selected with significant plasma bubbles. Two conditions were studied: fixed altitude of 280 km of the OI 630.0 nm emission layer and considering this altitude of emissions layer variable throughout each night. The variable altitude was obtained by analyzing height parameter data recorded from digital ionosonde measurements, along with the photometer images of the respective observatory. The digital ionosonde data for the analysis of altitude variations were available during 12 of the 18 nights studied. The average zonal velocities in both methods were analyzed for each observatory. In SJC, the average zonal drift velocities of the plasma bubbles using the method of the fixed altitude was 84 ± 18 m/s; in the case of PAL, the average velocity found was 89 ± 13 m/s. In the other process with emission at an altitude variable, the average value was 87 ± 13 m/s in SJC and 85 ± 10 m/s.

Keywords: Plasma Bubble, Zonal drift , OI 630.0 nm emission, all-sky Imager, Digital Ionosonde .

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Objetivos	30
1.2	Estrutura da Dissertação	31
2	A ATMOSFERA TERRESTRE	33
2.1	Estrutura da Atmosfera terrestre	35
3	ATMOSFERA IONIZADA	41
3.1	Ionosfera	41
3.2	As camadas da Ionosfera	45
3.2.1	Camada D	46
3.2.2	Região E	48
3.2.2.1	Camada E esporádica	48
3.2.3	Região F	49
3.2.3.1	Região F1	49
3.2.3.2	Região F2	50
3.2.3.3	Região F3	50

3.3	Processos de transporte na ionosfera	52
3.4	Luminescência da Atmosfera Terrestre	56
3.5	Emissão OI 630,0 nm (Linha vermelha do oxigênio atômico)	58
3.5.1	Mecanismo de Recombinação dissociativa	59
4	BOLHAS DE PLASMA E O PROCESSO DE INSTABILIDADE	
	RAYLEIGH-TAYLOR	63
4.1	Processo de geração das bolhas de plasma ionosférico	63
4.2	Teoria Rayleigh - Taylor	64
5	INSTRUMENTAÇÃO	69
5.1	Fotômetro Imageador All-Sky	69
5.2	Ionossonda Digital	74
6	METODOLOGIA E ANÁLISES DE DADOS	83
6.1	Metodologia	83
6.2	Análise de Dados	92
6.3	Dados Observacionais	95
6.3.1	Análise dos dados do fotômetro imageador de São José dos Campos	96
6.3.2	Análise dos dados do fotômetro imageador de Palmas	102
6.4	Resultados e Discussões	107
7	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Classificação da diferentes regiões da atmosfera terrestre, de 0 a 1000 km de altitude, dividida de acordo com seu perfil de tempertura.	33
2.2 Composição química da atmosfera nas diferentes altitudes.	34
3.1 Ilustração do processo de fotoionização	42
3.2 Ilustração clássica da formação de uma partícula neutra no processo de recombinação.	42
3.3 Perfil de temperatura da ionosfera para o ciclo de atividade solar máximo, dia e noite, e para o ciclo de atividade solar mínimo, também dia e noite.	43
3.4 Variação da concentração iônica de alguns componentes atmosféricos em função da altura, para atividade solar média.	46
3.5 Ilustração das diferentes camadas ionosféricas presentes durante o dia e a noite na atmosfera da Terra.	47
3.6 Ilustração de alguns caminhos possíveis quando a camada E esporádica está presente. - - - Onda eletromagnética parcialmente transmitida pela camada E esporádica e refletida pela camada F. — Ondas que passam através da E esporádica e são refratadas pela camada F.	49
3.7 Incidência da radiação solar na camada da atmosfera terrestre nas suas diferentes bandas de frequência.	52
3.8 Diagrama de níveis de energia do oxigênio atômico. Transições observadas nas auroras e na aeroluminescência são apresentadas com linhas tracejadas e números grandes. Potencial de ionização $IP = 13,61$ ev potencial de neutralização íon-íon $IINP = 12,149$ ev	60

4.1	Ilustração da geração e deslocamento de uma bolha de plasma ionosférico ao longo do equador magnético terrestre.	64
4.2	Ilustração didática da evolução de uma instabilidade ionosférica gerando as bolhas de plasma segundo a teoria Rayleigh-Taylor.	66
4.3	Esquema da geração e evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor em uma geometria equatorial dos campos magnéticos e elétricos.	67
5.1	Desenho esquemático do fotômetro imageador de alta resolução espacial tipo olho de peixe com roda de filtros e detector de coleta de imagens tipo CCD. . .	70
5.2	Vista interna da roda de filtros dos fotômetros imageadores da UNIVAP. . . .	73
5.3	Vista do fotômetro imageador aberto, utilizado pelo Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP.	73
5.4	Imagem obtida no observatório da UNIVAP no Campus do Urbanova no dia 23 de fevereiro de 2007 às 22:38:14 usando o filtro de interferência OI 630,0 nm. Tempo de aquisição 120 segundos. As estruturas escuras são as irregularidades ou depleções na intensidade da emissão. A imagem original ou crua apresenta o norte geográfico na parte superior direita e forte distorção, comprimida no seu centro e expandida nas bordas.	74
5.5	Mapa da América do Sul ilustrando a área de cobertura das imagens do fotômetro operando no Campus do Urbanova em São José dos Campos - SP (23,21°S; 45,86°O; dip latitude 18,95°S) e Palmas - TO (10,28°S; 48,33°O; dip latitude 6,65°S), para os ângulos zenitais de 90° e 75°	75
5.6	Esquema da transmissão e recepção de um pulso de rádio emitido e recebido pelo conjunto de antenas tipo delta de uma ionossonda digital tipo CADI. . .	77

5.7	Ionograma característico obtido pela ionossonda digital CADI operando no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos ($23, 21^{\circ}S, 45, 86^{\circ}O$) no dia 04 de abril de 2004 às 00:20:18 UT, 21:20:18 LT (hora local, $UT = LT + 3h$).	78
5.8	Perfis da densidade eletrônica ionosférica, ou ionogramas, com indicação da altura mínima virtual da camada (h'F), frequência máxima ou crítica (foF2) e a altura do pico da densidade da camada F (hpF2) para dois momentos, às 21:20:18 (a) e às 14:05:18 (b) hora local (LT) do dia 04 de abril de 2004 em São José dos Campos ($23, 21^{\circ}S, 45, 86^{\circ}O$).	79
5.9	Vista do Laboratório de Antenas 1 - Ionossonda no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos ($23, 21^{\circ}S, 45, 86^{\circ}O$) onde opera uma ionossonda digital CADI. Figura superior mastro de sustentação das antenas delta verticais de transmissão e recepção, figura inferior vista do container onde opera o equipamento da ionossonda digital e de um receptor de GPS.	80
5.10	Vista interna do Laboratório de antenas no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos com o módulo transmissor e receptor e o microcomputador dedicado gerenciador do equipamento CADI.	81
6.1	Tela do programa de linearização de imagem do UASDA, a esquerda uma imagem coletada original ou crua no filtro de interferência OI 630,0 nm e a direita ela já linearizada para uma altitude de 280 km e com uma área de cobertura de 1000 km x 1000 km. Imagem obtida pelo aparelho instalado no Campus do Urbanova em SJC no ano de 2009	85
6.2	Exemplo de uma vista da interface utilizada na etapa do cálculo dos parâmetros característicos da calibração da lente e linearização das imagens coletadas. . .	86

6.3	Vista da janela inicial da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma. Nela é possível selecionar a noite em análises e as duas imagens linearizadas obtidas em horários diferentes a partir das quais se calcula o valor do parâmetro. Na parte superior de cada uma delas temos os cortes selecionados e identificados na janela inferior. Os cortes em verde são da imagem com o primeiro horário seguido da imagem com cortes vermelhos do segundo horário.	87
6.4	Vista do perfil de intensidade para os quatro cortes selecionados na Figura 6.3. O perfil em cor verde é da imagem do primeiro horário e o perfil em corvermelho é da imagem do segundo horário, seu deslocamento indica o movimento que a bolha teve nesse intervalo de tempo.	88
6.5	Exemplo da interface gráfica utilizada no cálculo de velocidade de deslocamento da bolha de plasma a partir de um dos quatro cortes no perfil de intensidade de emissão selecionado, Figuras 6.3 e 6.4. Observa-se o traçado das “paredes” nas bordas da bolha construídas a partir dos dois pontos selecionados para cada uma delas.	89
6.6	Exemplo de um ionograma completo, arquivo md4, da ionossonda digital em SJC em uma noite do ano de 2007.	90
6.7	Interface da tela inicial do programa UDIDA, programa utilizado para análise dos dados coletados pelas ionossondas digitais CADI e em nosso caso para calcular o valor da altitude da base da camada F emissora do OI 630,0 nm. Este valor dinâmico ao longo da noite nos permite fazer uma correção mais real na linearização dos dados coletados dos fotômetros imageadores.	91

6.8	Tela com um ionograma onde se deduz os parâmetros característicos da camada F ionosférica, em nosso caso estamos interessados na altitude de base da camada, $h'F$, que aparece na janela respectiva com o valor de 225 km. Este valor será empregado na linearização das imagens do fotômetro imageador para esta noite e horário.	91
6.9	Imagens em OI 630,0 nm obtidas no fotômetro imageador em São José dos Campos no dia 23 de fevereiro de 2007; hora local 00:34:29 (painéis esquerdos) e 01:01:38 (painéis direitos). Painéis superiores imagens cruas, painéis centrais imagens linearizadas a uma altitude de 250 km e painéis inferiores imagens linearizadas a 280 km, ambas com áreas de 1000 km x 1000 km.	93
6.10	Imagens de OI 630,0 nm obtidas no fotômetro imageador em Palmas no dia 16 de agosto de 2009. Hora local 00:38:02 (painéis esquerdos) e 01:07:51 (painéis direitos). Painéis superiores imagens cruas, painéis centrais imagens linearizadas a uma altitude de 250 km e painéis inferiores imagens linearizadas a 280 km, ambas com áreas de 1000 km x 1000 km.	94
6.11	Mozaico com uma imagem linearizadas para cada evento analisado em São José dos Campos. Pode-se observar, em cada uma das imagens, a presença de bolhas de plasma e os respectivos quatro cortes (linhas na cor vermelha) para os cálculos da médis de velocidades de deriva zonal de plasma. Observatório situado na anomalia magnética equatorial sul.	98
6.12	Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de São José dos Campos - SP, para nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura fixa da base da camada ionosférica F de 280 km.	99

6.13	Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de São José dos Campos - SP, para oito das nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura variável acompanhando a dinâmica temporal da base da camada ionosférica F, a partir dos ionogramas coletados pela ionossonda CADI que opera nesse mesmo observatório	100
6.14	Mozaico com as imagens linearizadas para cada uma das nove noites analisadas em Palmas, observatório próximo ao equador magnético.	104
6.15	Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de Palmas - TO, para nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura fixa da base da camada ionosférica F de 280 km.	105
6.16	Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador, para quatro das nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura variável acompanhando a dinâmica temporal da base da camada ionosférica F, a partir dos ionogramas coletados pela ionossonda CADI em operação conjunta com o fotômetro no observatório de Palmas - TO	106

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Principais emissões do oxigênio atômico na região F noturna	58
5.1 Relação dos filtros de interferência presentes nas oito posições da roda de filtros dos fotômetros imageadores da UNIVAP	72
6.1 Evento, data, estação do ano, período de operação, número de imagens cap- turadas, horário inicial e final da ocorrência de bolhas de plasma registradas e número de bolhas diferentes analisadas pelo fotômetro imageador no Ob- servatório do Campus Urbanova da UNIVAP, na cidade de São José dos Cam- pos - SP, Hora local (HL)	96
6.2 Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma para as nove noites de São José dos Campos selecionadas, calculadas para uma altitude fixa de 280 km.	101
6.3 Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma e altitude média da base da camada ionosférica F considerada no cálculo com altitude variável, para as oito noites de São José dos Campos selecionadas. . .	101
6.4 Velocidades médias de deriva zonal das bolhas de plasma da camada ionosférica F para as nove noites de São José dos Campos, calculadas para altitudes fixa e variável.	102
6.5 Evento, data, estação do ano, período de operação, número de imagens cap- turadas, horários inicial e final das observações e a quantidade de diferentes ocorrências de bolhas de plasma registradas pelo fotômetro imageador no Ob- servatório do Campus da ULBRA, na cidade de Palmas-TO, Hora local (HL) .	103

6.6	Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma para as nove noites de Palmas selecionadas, para altura fixa.	105
6.7	Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma e altitude média da base da camada ionosférica F considerada no cálculo com altitude variável, para as quatro noites de Palmas selecionadas.	107
6.8	Velocidades médias de deriva zonal das bolhas de plasma da camada ionosférica no caso de nove noites calculadas para altitude fixa e quatro noites em altitude variável. Observatório de PAL, próximo ao equador magnético.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CADI	–	Canadian Advanced Digita Ionosonde
CCD	–	Charge Coupled Device
D/A	–	Digital Analogic
DDS	–	Direct Digital synthesis
EUV	–	Extremo Ultra-violeta
GPS	–	Global Positionning System (Sistema de Posicionamento Global)
H	–	Hidrogênio
HD	–	Hidrodinâmica
He ⁺	–	Íon de Hélio
LNA	–	Laboratório Nacional de Astrofísica
LT	–	Local Time
MHD	–	Magnetohidrodinâmica
N	–	Nitrôgeno
NO	–	óxido nítrico
OI	–	Oxigênio Ionizado
PAL-TO	–	Palmas - Tocantis
R-T	–	Rayleigh- Taylor
SJC-SP	–	São José dos Campos- São Paulo
Spread-F	–	Espalhamento do tipo range na região F
UASDA	–	Univap All Sky Data Analysis
UDIDA	–	Univap Digital Ionosonde Data
ULBRA	–	Universidade Luterana do Brasil
UNIVAP	–	Universidade do Vale do Paraíba
UT	–	Hora Universal
UV	–	Ultra violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

B	– Campo magnético
B _z	– Componente sul do CMI
c	– Velocidade da luz (3×10^8 m/s)
c _v	– - Calor específico à volume constante, J K ⁻¹ kg ⁻¹
e	– Carga do elétron, C
$\vec{E}$	– Vetor campo elétrico
F 10.7	– Fluxo eletromagnético solar com comprimento de onda de 10.7 cm
f _t	– Frequência da onda eletromagnetica transmitida pela ionossonda, MHz
f _p	– Frequência do plasma ionosferico, MHz
foF1	– Frequência critica no pico da camada F1, MHz
foF2	– Frequência critica no pico da camada F2, MHz
g	– Aceleração da gravidade terrestre, ms ⁻²
h	– Altura da camada
h'F	– Altura virtual da base da região F, km
hpF2	– Altura virtual do pico da camada F2, km
k	– Constante de Boltzmann, $1,381 \times 10^{-23}$ Joule.s
K _T	– coeficiente de condutividade de temperatura
L _i	– Taxa de perda iônica, m ⁻³ s ⁻¹
m _e	– Massa dos elétrons, Kg
m _i	– Massa dos íons, Kg
M _i	– taxa de variação da densidade de energia
n	– Densidade numérica dos constituintes atmosféricos, m ⁻³
n _e	– Densidade eletrônica, m ⁻³
n _i	– Densidade iônica, m ⁻³
q	– Carga das partículas, C
t	– Tempo de propagacao do pulso
T	– Temperatura atmosférica, K
U	– Velocidade do vento neutro
V	– Velocidade

Símbolos Especiais

∇	– Operador nabla
$\sum$	– Soma dos valores de uma variável
ψ	– Ângulo onde o raio é refratado
γ_{RT}	– Crescimento da taxa da instabilidade

1 INTRODUÇÃO

Na ionosfera terrestre acontecem diversos fenômenos de interesse tanto tecnológico como científico. No setor tecnológico, há pelo menos dois sistemas para qual a ionosfera desempenha um papel importante, são os sistemas de telecomunicações e os sistemas globais de navegação e posicionamento, como exemplo o GPS (*Global Positioning Systems*). Para a área científica a ionosfera é um ambiente natural, onde pode-se pesquisar diversos fenômenos físicos que ocorrem, por exemplo, correntes elétricas, campos elétricos e magnéticos.

Decorrente desses fenômenos que acontecem na ionosfera, nas últimas décadas ela vem sendo estudada por diversos pesquisadores, e através de diferentes instrumentos. Entre esses fenômenos que ocorrem, destacam-se para este trabalho, as irregularidades de plasma de grande escala, conhecidas como bolhas de plasma, que são originárias da região equatorial, o que difere essas irregularidades no plasma é o fato de serem grandes regiões em que a densidade do plasma é baixa, causam interferência nas ondas eletromagnéticas que as atravessam, levando a perda do sinal que foi transmitido. Os estudos feitos neste trabalho encontram-se na ionosfera em torno de 230 a 350 km de altitude.

Esses fenômenos tem origem de processos instáveis que surgem ao anoitecer quando a camada ionosférica sofre uma deriva vertical abrupta governada por processos eletrodinâmicos. Pela sua longa propagação em distâncias verticais, a medida em que vão evoluindo verticalmente as bolhas de plasma se propagam numa direção quase alinhada às linhas de campo geomagnético, isso devido a efeitos gravitacionais e difusivos (OSSAKOW et al., 1979), (FEJER et al., 1985). Também apresenta um deslocamento na direção zonal, devida a ação conjunta dos campos elétrico e magnético, $\vec{E} \times \vec{B}$.

Com o aprimoramento das técnicas de sondagem permitiram, no início dos anos 70, um avanço nos estudo das irregularidades, hoje podemos detecta-las através de técnicas de

rádio sondagem e óptica, foguetes e satélites artificiais. Os estudos já realizados, mostram que a ocorrência das bolhas ionosféricas dependem de alguns fatores como por exemplo, a deriva eletromagnética, a altura e a densidade eletrônica de pico da camada ionosférica, o gradiente de densidade eletrônica na região inferior da ionosfera noturna, os ventos neutros e a presença de perturbações externas, existem outros estudos que consideram a sazonalidade, hora local, a declinação magnética, a anomalia equatorial, os efeitos das tempestades magnéticas e as fases do ciclo solar.

Neste estudo foram analisados dados dos anos de 2006 até 2010, considerando um extremo mínimo do 24^o ciclo solar. O principal foco foi estudar as velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma durante este período de 4 anos de mínimo extremo. Para este trabalho foram utilizados dados de dois fotômetros imageadores e duas ionossondas digitais, as observações para coleta dos dados foram feitas em dois observatórios, um deles sendo região de baixa latitude e próxima do pico da anomalia magnética equatorial, São José dos Campos - SP (23,21°S; 45,86°O; dip latitude 18,95°S) e o outro na região equatorial magnética, Palmas - TO (10,28°S; 48,33°O; dip latitude 6,65°S). Em ambos os observatórios os fotômetros imageadores capturaram imagens com o filtro de interferência OI 630.0 nm, e contam com equipamento de ionossonda digital.

O estudo destes fenômenos ionosféricos, portanto, contribuem significativamente para o entendimento da dinâmica espaço temporal do plasma ionosférico nas regiões onde estas bolhas se propagam.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi o cálculo da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma nas regiões equatorial e de baixa latitude no setor brasileiro, para um período de extremo mínimo da atividade solar, 2006 a 2010, considerando uma altitude de emissão fixa de 280

km e para altitudes variáveis nas imagens coletadas com fotômetros imageadores no filtro de interferência. Foram coletadas imagens dos 05 anos em São José dos Campos - SJC, região de baixa latitude e próxima ao pico da anomalia; e imagens de 04 anos consecutivos (2007 a 2010), para Palmas - PAL, na região equatorial. Durante esses anos de estudo, o fotômetro imageador da região de baixa latitude, registrou um total de 337 noites, sendo 26 noites em 2006, 84 em 2007; 79 em 2008; 68 em 2009 e 80 em 2010 e para região equatorial o fotômetro operou em 332 noites, sendo 54 noites em 2007; 74 em 2008; 90 em 2009 e 114 em 2010. Desse total de noites, para ambos os observatórios, foram selecionadas 31 noites com a presença de bolhas de plasma com boa nitidez e tempo de duração acima de uma hora. Destas 31 noites, foram estudadas 18 noites de ocorrências, 09 noites para São José dos Campos e 09 noites para Palmas, no cálculo da variação da velocidade derivada zonal do plasma com altitude fixa em 280 km da base da camada ionosférica, e dessas 18 noites, foram analisadas 12 noites com altitudes variáveis da citada camada ao longo da noite: 08 noites em baixa latitude e 04 noites em região equatorial.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho exhibe a seguinte ordem:

No Capítulo 2 trata da atmosfera da Terra, uma breve citação de sua dinâmica, a sua classificação em camadas de acordo a seus respectivos perfis de temperatura.

No Capítulo 3 fala da ionosfera e sua sub-divisão em camadas de acordo à densidade eletrônica; a luminescência atmosférica ou airglow e em particular da emissão do oxigênio atômico OI 630.0 nm que foi utilizada na geração das imagens usadas em nosso estudo.

No Capítulo 4 expôs as bolhas de plasma, sua geração e o processo de instabilidade Rayleigh - Taylor, que é uma das principais teorias que se aplica na geração da perturbação inicial

na base da camada F para gerar as irregularidade de grande e média escala.

No Capítulo 5 apresenta a instrumentação utilizada obtenção dos dados, o fotômetro imageador e a ionossonda digital. Os programas desenvolvidos pelo grupo de pesquisa da UNIVAP, o UASDA, que é utilizado para linearizar as imagens e calcular as velocidades de derivas zonais das bolhas de plasma, e o UDIDA, utilizado para calcular o parâmetro da altitude da base da camada emissora para o cálculo da velocidade considerando altitudes variáveis ao longo da noite estudada com a presença de bolhas.

No Capítulo 6 mostra a metodologia empregada, cálculo e valores das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma com os dados dos fotômetros imageadores, a metodologia e cálculo da altitude variável da base da camada ionosférica com os ionogramas com as ionossondas digitais, as análises feitas para cada noite em altitude fixa e altitude variável e os valores médios finais obtidos.

No Capítulo 7 as conclusões do trabalho.

2 A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é uma fina camada de gases afixado à Terra pela força da gravidade, possui uma estrutura complexa, estendendo-se a cerca de 1000 km de altitude. Pode ser descrita conforme o seu perfil vertical de temperatura, de composição química ou em base nos processos físicos dominantes em cada faixa de altitude. A Figura 2.1 mostra o perfil vertical de temperatura da atmosfera terrestre e a sub-divisão em camadas de acordo com este perfil. A Figura 2.2 ilustra a composição química em diferentes altitudes da atmosfera.

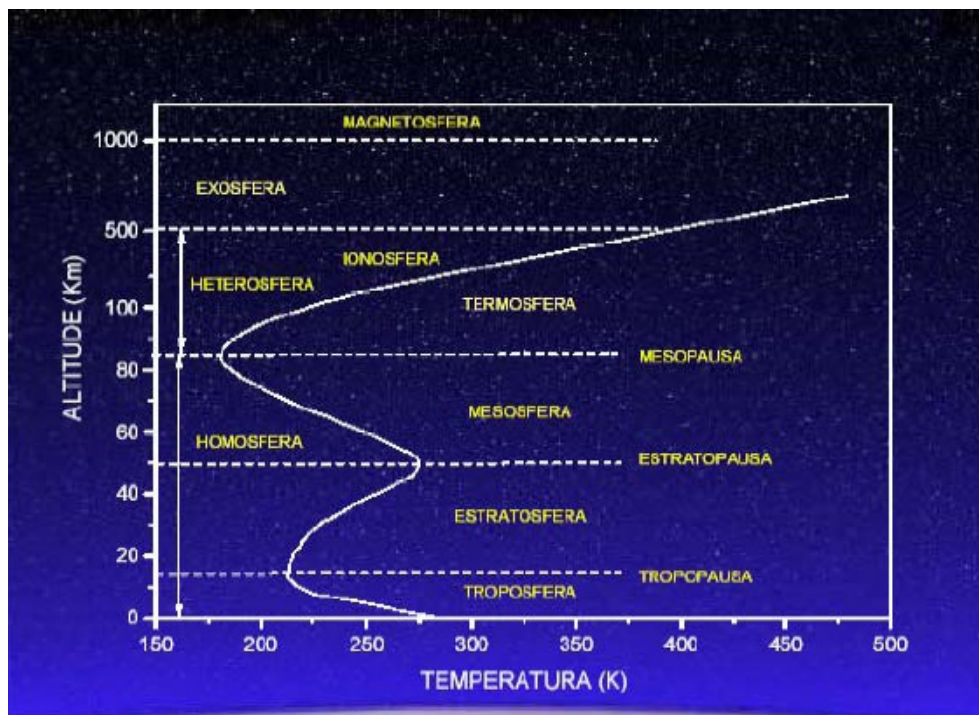
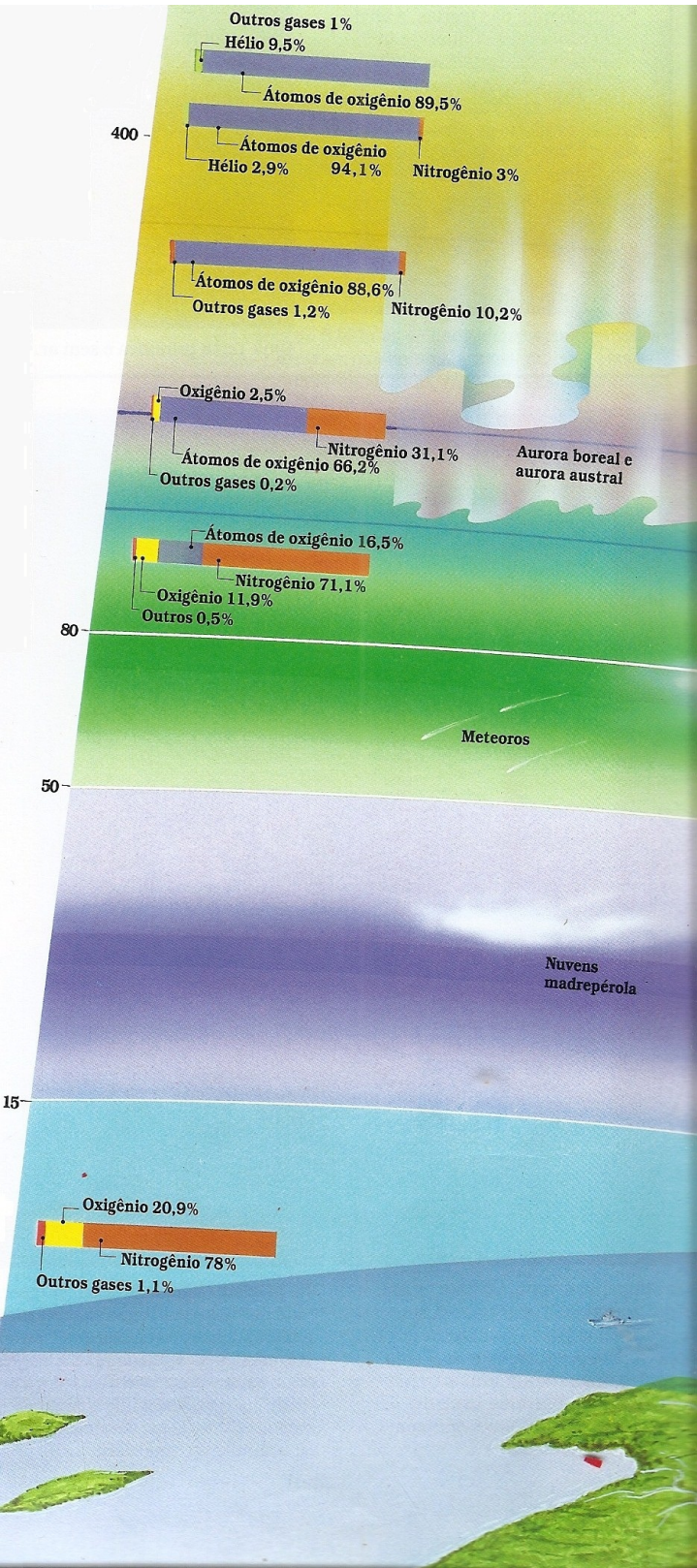


Figura 2.1 - Classificação das diferentes regiões da atmosfera terrestre, de 0 a 1000 km de altitude, dividida de acordo com seu perfil de temperatura.

Fonte Brasseur e Solomon, (1986 - p.33), modificada por (GRELLMANN, 2005)



Fonte: (ARANTES, 1995) Editora

2.1 Estrutura da Atmosfera terrestre

Para facilitar o estudo da atmosfera terrestre ela é usualmente subdividida em camadas. Uma classificação de acordo com o perfil vertical de temperatura, divide ela em cinco camadas e considera a inversão do gradiente de temperatura nesta distribuição.

Troposfera - é a primeira das camadas e estende-se da superfície até uma altitude de aproximadamente 15 km. Nela ocorrem a maioria dos fenômenos meteorológicos, contém aproximadamente 85% de toda a massa gasosa da atmosfera terrestre, além de quase todo o vapor d'água presente. Apresenta um perfil decrescente da temperatura com a altitude.

Estratosfera - é a segunda camada da atmosfera terrestre, nela aparece uma grande concentração de ozônio: formado por átomo de oxigênio (fórmula química O_3), conhecida como a camada de ozônio que funciona como um filtro solar. Ela absorve grande parte da radiação solar ultravioleta, protegendo assim a vida na Terra. Estende-se de aproximadamente entre 15 e 50 km, nela a temperatura cresce com a altitude em virtude da absorção da radiação solar na faixa do ultravioleta, na presença do ozônio e vapor d'água.

Mesosfera - é a terceira camada localizada acima da Estratopausa e abaixo da Mesopausa, está entre 50 a 90 km de altitude; a temperatura volta a decair com a altitude até alcançar o valor mínimo de toda a atmosfera terrestre, perto dos -80°C , numa altitude próxima dos 85 km. A principal fonte de calor dessa camada é a absorção da radiação ultravioleta solar pelo ozônio presente. A temperatura tende a diminuir devido ao relaxamento vibracional das moléculas de dióxido de carbono e também da emissão de fótons no infravermelho e no visível.

Termosfera - é a região da atmosfera neutra que está entre 90 e 500 km de altitude aproximadamente, contém a maior parte da ionosfera, parte essencial neste estudo da dinâmica

ionosférica. A temperatura desta camada cresce rapidamente conforme sua altitude como resultado da absorção de ondas muito curtas da radiação solar por átomos de oxigênio e nitrogênio. Temperaturas são definidas em termos da velocidade média das moléculas. Como as moléculas dos gases da termosfera se movem com velocidades muito alta, a temperatura é alta. A região ionosférica de maior concentração iônica está localizada aproximadamente entre os 250 e 300 km de altitude (região do pico da ionosfera), portanto parte da termosfera. A termosfera é composta por um fluido compressivo, na presença de campos magnéticos e elétricos, formado por moléculas e átomos neutros, íons e elétrons que são variáveis conforme o fluxo solar, sua principal fonte de geração, e movimentos de translação e rotação da Terra.

O movimento destas partículas ionizadas na Termosfera pode ser descrito através das quatro equações fundamentais: a equação da continuidade (2.1); a equação do movimento (2.3); a equação da conservação de energia (2.4) e a equação de estado(2.5).

A equação da continuidade (2.1) representa a lei da conservação de massa. Dado um volume V do fluido, limitado por uma superfície S . O número de partículas nesse volume é $\int_v n d^3r$, o número de partículas que sai do volume é $\oint_s n_i \vec{U}_i \cdot d\vec{s}$. Considerando que não existe perda nem produção de partículas no interior do volume V , podemos chegar usando o Teorema de Gauss a equação da continuidade nas suas expressões integral e diferencial, respectivamente:

$$\int_v \frac{\partial n}{\partial t} \vec{\nabla} \cdot (n_i + \vec{U}_i) d^3r = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) \quad (2.2)$$

sendo $\rho = \sum_i n_i m_i$

A equação do movimento (2.3) representada pela segunda lei de Newton, estabelece um balanço entre diferentes forças agindo sobre uma parcela de fluido. Considerando o intervalo de tempo entre as colisões e o caminho livre médio das partículas presentes na Termosfera são suficientemente pequenos se comparamos com as escalas de tempo e distância que caracterizam os fenômenos do sistemas de ventos nesta região podemos considerar, então, a Termosfera como um único fluido sujeito à Equação do Movimento da Hidrodinâmica (RISHBETH, 1972) para um gás neutro:

$$\frac{dV_G}{dt} = -2\omega \cdot V_G + g - \frac{1}{\rho} \nabla_p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot [(\mu_m + \mu_T) \nabla] \nabla_G - \nu_{ni}(V_G - U) \quad (2.3)$$

V_G é a velocidade macroscópica do gás neutro, U é a velocidade macroscópica dos íons, g é a aceleração da gravidade, ω é a velocidade angular da Terra, ρ é a densidade de massa do gás neutro, p é pressão do gás neutro, ν é a frequência de colisão entre os constituintes neutros e os íons, μ_m é o coeficiente de viscosidade molecular e μ_T é o coeficiente de viscosidade turbulenta.

O lado esquerdo da Equação (2.3) pode ser expandida da seguinte forma

$\frac{dV_G}{dt} = \frac{\partial V_G}{\partial t} + (V_G \cdot \nabla) V_G$, sendo que o termo da esquerda representa a variação temporal total da velocidade de uma parcela do fluido. O primeiro termo da direita representa a variação temporal da velocidade num ponto genérico e fixo e o segundo termo a variação espacial.

O primeiro termo da direita da Equação (2.3), representa a força de Coriolis, que é a unidade de massa associada à rotação da atmosfera em um referencial não inercial, como atua perpendicularmente à velocidade do fluido, mudando somente a velocidade e não

realizando trabalho.

O segundo termo, a força associada ao gradiente de pressão, $\frac{1}{\rho}\nabla_p$, é o responsável pelo movimento do fluido de uma região de alta pressão para uma de baixa pressão. Entretanto, essa força tende a remover os gradientes de pressão existente no fluido (PIMENTA, 2003).

O terceiro termo, a força devido a viscosidade, $\frac{1}{\rho}\nabla \cdot [(\mu_m + \mu T)\nabla]\nabla_G$, atua de forma a retirar os gradientes transversais de velocidade no fluido. Na Termosfera, o caminho livre médio das moléculas aumenta com a altitude e, portanto, a viscosidade torna-se muito importante.

O último termo de arraste iônico, $\nu_{ni}(V_G - U)$, é o que acopla as partes neutra e ionizada da atmosfera. Dependendo da direção relativa da velocidade dos íons, o acoplamento pode acelerar ou desacelerar o fluido (PIMENTA, 2003).

A Equação de conservação de Energia (2.4) é conhecida como a Primeira Lei da Termodinâmica, descreve a variação temporal de mudança da densidade de energia e é dada por

$$\frac{dT}{dt}C_p - \frac{1}{\rho}\frac{dP}{dt} = Q_{UV+EUUV} + Q_{IV} + Q_{K_M+K_T} \quad (2.4)$$

onde T é a temperatura do gás, C_p é o calor específico do gás, ρ é a densidade do gás, P é a pressão do gás, $Q_{UV+EUUV}$ é a deposição de energia pelo UV e EUV, Q_{IV} é a perda de energia pelo infravermelho e $Q_{K_M+K_T}$ é a energia devido ao transporte molecular e turbulento.

O primeiro termo do lado esquerdo da equação representa a taxa de variação da energia interna de um gás perfeito; o segundo termo é a taxa de trabalho realizado pelo gás,

por causa de sua expansão. Para conseguirmos calcular a distribuição de temperatura na termosfera é preciso incluir todas as formas de energia (energia potencial, cinética, interna, radiativa e elétrica) levar em consideração as fontes de energia, transporte vertical e horizontal, a condução, assim como a transformação da energia cinética em energia interna e energia potencial, e vice-versa.

A Equação de Estado (2.5) é uma relação matemática do tipo $F(P, \rho, T) = 0$ que existe para qualquer substância. Descreve o estado da matéria para um dado conjunto de condições físicas. No caso de um gás ideal, a Equação de Estado é dada pela expressão:

$$P = \frac{\rho RT}{M} = \rho g H \quad (2.5)$$

onde R é a constante universal dos gases, T é a temperatura, M é a massa molecular média do gás, H é a altura de escala ($H = RT/g$). Há de se considerar que os termos da equação variam com a altitude.

Exosfera - é a camada mais extensa da atmosfera, nesta região os átomos e moléculas movem-se em trajetórias balísticas e raramente colidem uns com os outros. Essa região começa a cerca de 500 km de altitude e estende-se até aproximadamente 1000 km de altitude, chegando a se confundir com o espaço sideral, possui densidade muito pequena, ar rarefeito, formada basicamente por gás hidrogênio e hélio. Sua temperatura crescente chega a aproximadamente 1000° C. É nesta camada que ficam os telescópios espaciais e os satélites de comunicações; nela há regiões formadas basicamente pela depreciação de partículas carregadas vindas do exterior e atraídas pelo campo magnético da Terra, que é o chamado “Cinturão de Van-Hallen”.

3 ATMOSFERA IONIZADA

3.1 Ionosfera

As primeiras idéias sobre a existência de uma camada eletricamente condutora na atmosfera foi devida a C. F. Gauss, no ano de 1839, quando, na ocasião de suas observações do valor do campo magnético, argumentou que pequenas variações diárias poderiam ser explicadas devido a um fluxo de corrente elétrica que circulava nesta camada. Anos mais tarde, por volta de 1882, Balfour Stewart sugeriu que as correntes aludidas por Gauss poderiam ser produzidas por ação de um dínamo atmosférico, devido a ventos agindo sobre o campo geomagnético. Teorias similares foram defendidas também por Schuster (1908), Chapman(1925), Chapman e Ferraro (1931, 1932, 1933) citados por (Booker, Green, 1974) (PILLAT, 2006).

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera superior da Terra, se estende aproximadamente entre 60 km a 1000 km de altitude, cuja formação é devida principalmente fontes ionizantes solares e cósmicas. As fontes ionizantes solares são a radiação solar de alta energia de ondas curtas, na faixa do extremo ultravioleta EUV (17 - 175 nm) e dos raios-X (0,1 - 16 nm), que são absorvidos pelos átomos e moléculas existentes na atmosfera terrestre. Os fótons provenientes destas faixas espectrais, são capazes de desprender os elétrons de moléculas e átomos de oxigênio, nitrogênio e outros, deixando os elétrons livres e íons positivos, como ilustra a Figura 3.1. Quando um fóton interage com um átomo neutro, sua energia é transferida para um elétron desse átomo, tornando-se um elétron livre, com energia suficiente para separar-se do átomo neutro, tornando-o um íon positivo. Isto denomina-se fotoionização que atinge um máximo em torno do meio-dia local.

Em um outro processo, chamado de processo corpuscular, as partículas ionizadas com alta energia cinética também causam ionização através de colisões com partículas neutras. Os

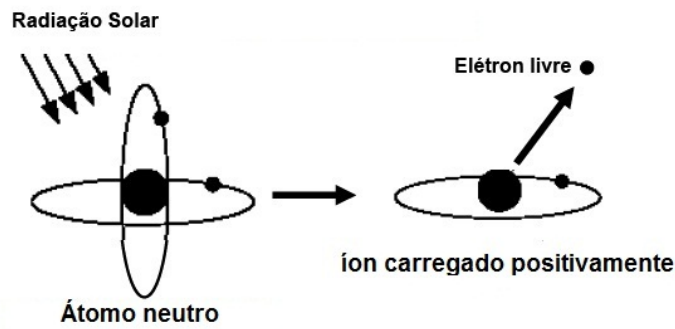


Figura 3.1 - Ilustração do processo de fotoionização

íons comumente produzidos são O^+ , N_2^+ e O_2^+ .

A recombinação eletrônica é um processo que acontece durante a noite na ionosfera, quando elétrons recombina-se com os íons positivos formando os átomos neutros, como mostra a Figura 3.2. Na parte inferior, acontece um processo de perda iônica chamado junção eletrônica, e é bem aceito para explicar a concentração de íons negativos na base da ionosfera. Esses processos de perda iônica não são suficientes o bastante para eliminar totalmente os elétrons do plasma ionosférico dado a ionização constante das fontes ionizantes cósmicas e dos processos corpusculares. O plasma ionosférico torna-se apenas mais rarefeito.

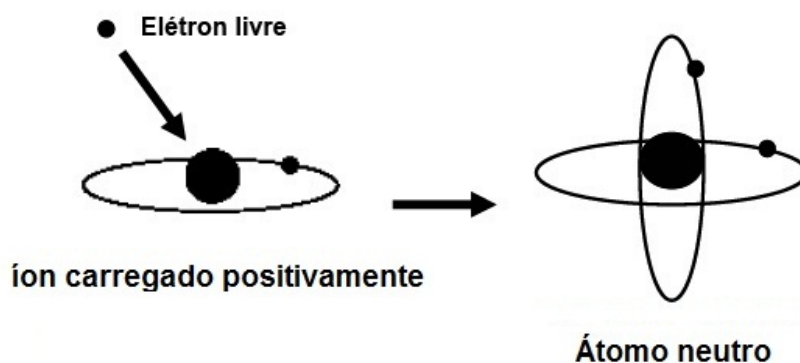


Figura 3.2 - Ilustração clássica da formação de uma partícula neutra no processo de recombinação.

Devido a esses processos de perda e produção iônicas junto com a dinâmica da ionosfera determina-se o perfil de densidade eletrônica desta região, ilustrado na Figura 3.3.

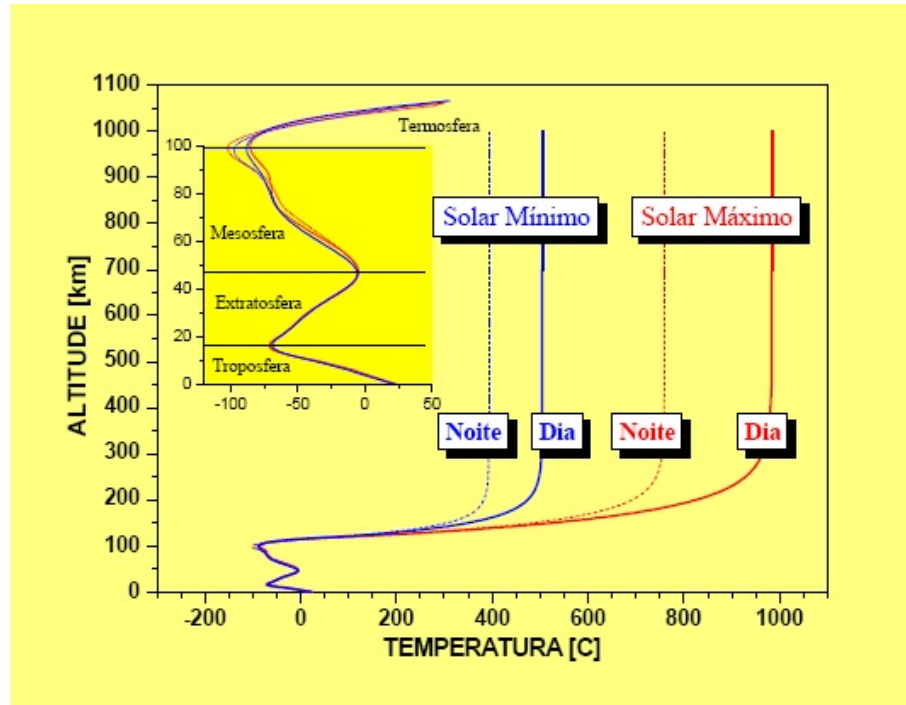


Figura 3.3 - Perfil de temperatura da ionosfera para o ciclo de atividade solar máximo, dia e noite, e para o ciclo de atividade solar mínimo, também dia e noite.

Fonte: (PILLAT, 2006)

A perda de ionização acontece por processos de recombinação de pares íons - elétrons, sendo que durante o dia o processo de fotoionização prevalece em relação ao processo de recombinação devido a presença da radiação solar.

Uma vez formada a ionosfera, os íons e elétrons na sua recombinação reagem com outros tipos de gases e produzem íons variados. Assim, há um equilíbrio dinâmico no qual a concentração líquida de elétrons livres ou densidade eletrônica, depende da taxa de produção e perda. A taxa de troca de densidade eletrônica é expressa pela equação da continuidade, Equação 2.1 (ARANHA, 2006):

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

sendo N é a densidade eletrônica, q é a taxa de produção, L é a taxa de perda e $\nabla \cdot (Nv)$ expressa a produção/perda de elétrons pelo transporte, sendo v a velocidade.

Esta região de interesse tanto científico como militar, é pesquisada por diversas técnicas de sensoriamento remoto, tais como: ionossonda, radares de espalhamento coerente e incoerente, fotômetros. Em 1931, Chapman formulou quantitativamente a teoria da formação das camadas ionosféricas que é a base teórica atualmente em uso para explicar a formação da região ionizada na atmosfera da Terra.

A radiação solar é a principal fonte de ionização das moléculas neutras e é representado por:

$$I(h) = I(\infty) \exp \left[-\sigma n_0 H_n \sec \chi \exp \left(-\frac{h - h_0}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{h_m - h}{H_n} \right) \right] \quad (3.2)$$

Sendo I é a intensidade de radiação solar, σ é a taxa de absorção do fóton e χ é o ângulo zenital formado entre a direção da radiação e a direção do plano vertical de incidência da radiação, H é a altura da escala ionosférica.

A taxa de produção iônica q é dada pela equação de Chapman (Kivelson e Russel, 1996)

$$q = q_n \exp \left[1 + \left(\frac{h_n - h}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{h_n - h}{H_n} \right) \right] \quad (3.3)$$

De acordo com seus níveis de densidade eletrônica, a ionosfera pode ser dividida em camadas, que são classificadas como D, E, F com altitudes e densidade crescentes. Como

a radiação solar é necessária para a produção de íon, sua concentração diminui do dia para a noite. A ionosfera não influencia muito no clima, mas tem grande influência sobre a transmissão de ondas de rádio na banda AM; durante o dia essas ondas tendem a ser absorvidas pelas duas camadas inferiores D e E e a camada F é refletora dessas ondas. Com o desaparecimento das camadas D e E durante a noite a reflexão da camada F é mais intensa o que explica por que os sinais de rádio atingem longas distância sobre a Terra à noite. Na ionosfera ocorrem diversos fenômenos físicos, entre eles podemos destacar: as auroras boreais, que são visíveis nas regiões polares e altas latitudes, e a desintegração dos meteoritos vindos do espaço, que são conhecidos como estrelas cadentes.

A composição iônica da ionosfera é mostrada na Figura 3.4. Os íons moleculares O_2^+ e NO^+ são predominantes na camada E, e o íon de oxigênio atômico, O^+ , na camada F. Na região D, temos os íons negativos, principalmente íons aglutinados, que envolvem moléculas de água. A região acima de 1000 km é conhecida como plasmasfera e o dominante nessa região é o íon H^+ .(FRANCISCO, 2003)

3.2 As camadas da Ionosfera

A presença ou ausência das camadas na ionosfera e a sua altitude varia com a incidência da radiação solar. Ao meio dia local, a radiação na ionosfera é máxima, enquanto à noite é mínima. Quando a radiação desaparece uma grande porção das partículas que estavam ionizadas recombina-se. No espaço de tempo entre estas duas condições, a posição e número de camadas ionizadas da ionosfera mudam, como mostra a Figura 3.5. Como a posição do Sol varia diária, mensal e anualmente relativamente a um determinado ponto na Terra, o número de camadas presentes é difícil de determinar. No entanto, podemos dizer que o aparecimento das camadas ionosféricas varia de acordo com a incidência da luz solar, fazendo com que durante o dia haja um maior número de camadas que durante

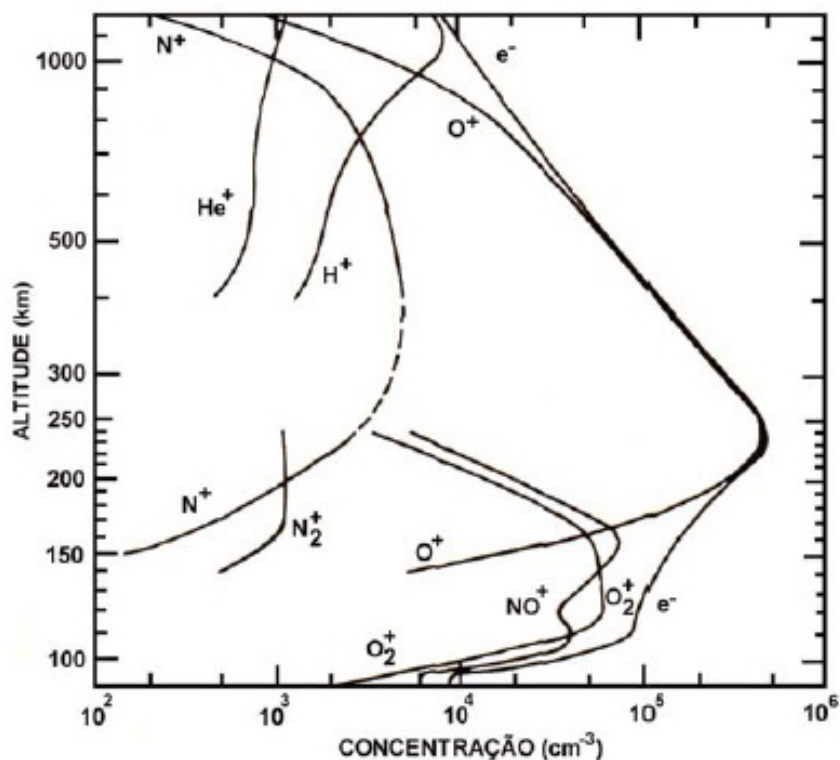


Figura 3.4 - Variação da concentração iônica de alguns componentes atmosféricos em função da altura, para atividade solar média.

Fonte: Banks e Kockarts (1973)

a noite, quando as partículas ionizadas ficam neutras, em função da absorção dos elétrons livres, a quantidade de camadas presente é menor como mostra a Figura 3.5. (ARANHA, 2006)

3.2.1 Camada D

A região D está localizada na parte inferior da ionosfera, entre 60 e 90 km de altitude. Seu comportamento é diurno, aparecendo no momento em que os átomos começam a adquirir energia vinda do Sol e permanecendo até por alguns instantes no início da noite. A maior parte da energia eletromagnética é absorvida nessa região. As interações mais importantes para ionização nessa região estão listadas a seguir: (JESUS, 2008)

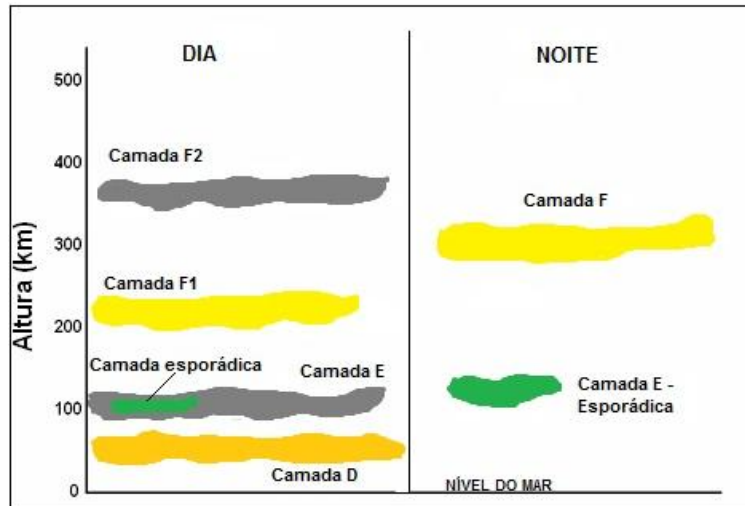


Figura 3.5 - Ilustração das diferentes camadas ionosféricas presentes durante o dia e a noite na atmosfera da Terra.

- 1) o óxido nítrico (NO) que se apresenta em minoria e ionizado pela linha Lyman α do espectro solar a $1216 \text{ \AA}$, a qual penetra abaixo de 95 km de altitude;
- 2) o oxigênio molecular (O_2) e alguns constituintes em menor quantidade são excitados pelo EUV na faixa espectral de 1027 e $1118 \text{ \AA}$;
- 3) todos os constituintes são ionizados pelo raio-X na faixa espectral de 2 a $8 \text{ \AA}$;
- 4) raios cósmicos são a maior fonte de ionização, abaixo de 95 km de altitude;
- 5) em altas latitudes a região D é ionizada por partículas energéticas do Sol ou de origem auroral; e
- 6) na região brasileira (região da anomalia do Atlântico Sul) a ionização também ocorre por causa das partículas energéticas do cinturão de radiação.

As ondas eletromagnéticas de alta frequência (MHz) atravessam a região D, enquanto que as ondas com baixa frequência (KHz) são refletidas pela região D.

3.2.2 Região E

Esta região presente somente durante o dia, entre ≈ 90 e 150 km de altitude, é a região da ionosfera de máxima condutividade elétrica, em torno de 110 km. Esta camada é importante por causa da sua interação com o campo magnético através de intensas correntes elétricas que nela fluem (MITRA, 1952).

Os ventos neutros que aí predominam transmitem movimento às “camadas condutoras” por colisões, o que, na presença do campo geomagnético, origina as correntes. Assim essa região é conhecida também como região do dínamo, pelo fato de seu processo de se assemelhar com o que acontece no gerador convencional de corrente elétrica ou dínamo (JESUS, 2008).

Na região E, em algumas ocasiões, a densidade eletrônica nem sempre varia suavemente com a altura, por isso podem se desenvolver estreitas camadas esporádica E que podem, em alguns casos, permanecer à noite (HARGREAVES, 1979).

A fonte primária de ionização é a emissão de raio-X do Sol, chegando a diferentes densidades eletrônicas de acordo com a atividade solar, as variações sazonais, as variações diárias e o ciclo solar. Nesta região a ionização ocorre principalmente pelas moléculas de O_2^+ através da fotoionização.

Uma troca rápida de energia ocorre para se obter uma ionização adicional de moléculas de N_2 através do raio X que produz O_2^+ e NO^+ (TASCIONE, 1988).

3.2.2.1 Camada E esporádica

Ela ocorre normalmente entre os 90 e 120 km podendo se espalhar por uma grande área ou ser confinada em uma pequena região, formando-se a qualquer momento. A camada E esporádica pode ter uma densidade eletrônica menor ou igual a região F, de maneira a ser considerada uma camada parcialmente transparente e, por esse motivo, as ondas de rádio

são refratadas às vezes pela região F e em outras ocasiões pela camada E esporádica, a qual neste último caso, obscurece totalmente a região F e o sinal emitido pode não alcançar o receptor, ver Figura 3.6 (HARGREAVES, 1979) (TASCIONE, 1988).

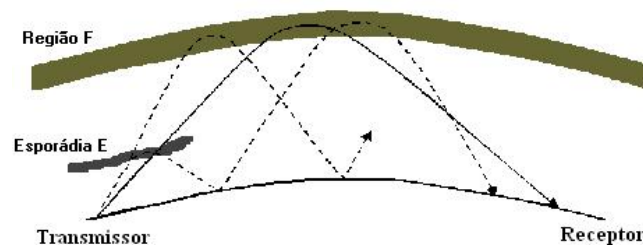


Figura 3.6 - Ilustração de alguns caminhos possíveis quando a camada E esporádica está presente. - - - Onda eletromagnética parcialmente transmitida pela camada E esporádica e refletida pela camada F. — Ondas que passam através da E esporádica e são refratadas pela camada F.

Fonte: Adaptado de (JESUS, 2008)

3.2.3 Região F

Situa-se acima da camada E, sendo subdividida nas camadas F1, F2 e F3. O nível de ionização nestas camadas é maior que os das camadas D e E, e igualmente apresenta uma variação diurna. Durante o dia o processo de fotoionização do oxigênio atômico (O^+) é a principal fonte de íons e elétrons. A região F é uma única região durante a noite e divide-se durante o dia nas citadas camadas F1, F2 e F3.

3.2.3.1 Região F1

A região F1 está acima da região E e abaixo da região F2, localizada entre 150 a 200 km de altitude aproximadamente. Sua principal fonte de ionização é a radiação EUV.

Essa região é definida pela aparição de um pequeno pico da densidade eletrônica ou apenas uma pequena inflexão do perfil ionosférico em torno de 180 km, estando presente apenas durante o período diurno acompanhando o comportamento da região E. Estudando as

reações químicas, observa-se que na região E os íons são quase todos moleculares (NO^+ , O_2^+), e às maiores altitudes quase todos os íons são dos átomos de oxigênio e elétrons (O^+ e e^-). A transição entre os íons moleculares e os íons atômicos ocorre aproximadamente a 170 km de altitude durante o dia, que corresponde à região onde se localiza a camada F1 (MITRA, 1952), (RISHBETH; GARRIOT, 1969), (KOHL et al., 1996). Nesta região a produção maioritária de íons é realizada pela transferência de carga do O^+ para NO e talvez para O_2 . A perda é realizada pela recombinação dissociativa.

A região F1 serve de refletora para as ondas de rádio AM, sendo que esta reflexão varia conforme a densidade do plasma presente gerado pela energia solar recebida. Normalmente o sinal de radiofrequência incidente que atravessa a região E também atravessa a camada F1 e, ao fazê-lo, refrata-se, alterando seu ângulo de incidência sobre a região F2, onde pode ocorrer a reflexão total da onda eletromagnética.

3.2.3.2 Região F2

A camada F2 estende-se de 200 a 1000 km de altitude, aproximadamente, e apresenta um pico na altitude entre 280 e 300 Km. Acima do pico da camada F2, a densidade diminui exponencialmente até chegar a magnetosfera e perder sua identidade. Ao contrário das outras regiões, esta é caracterizada pela ionização atômica que produz igual número de elétrons e íons atômicos positivos. Nesta região a produção é realizada através de fotoionização, como na camada F1, mas limitando este processo está a transferência de carga, com uma lei de recombinação do tipo “*attachment*”(PILLAT, 2006).

3.2.3.3 Região F3

A camada F3 está aproximadamente entre 450 a 700 km de altitude, o nascer do sol é uma das condições para o surgimento das camadas iônicas, F1 e F2 e F3. O plasma

ionosférico “energizado” pela radiação solar, causa uma elevação em altitude da camada F2, e esta não perde suas características, seu pico de ionização pode exceder em densidade de concentração máxima durante determinado tempo.

A inclinação magnética, a atividade solar e a sazonalidade, nos solstícios de dezembro e junho, e no verão em geral, a força eletromagnética, os ventos termosféricos e o campo magnético norte-sul, associado ao campo elétrico leste-oeste diurno, empurram o plasma ionosférico para cima na região do equador. Favorecem assim a “subida” de F2 e a formação de uma camada ionizada entre F2 que se elevou e F1, fenômenos este que tem ocorrido frequentemente em períodos de baixa atividade solar. A camada F2 ao subir, poderia ser chamada de camada “G”, porém os processos físicos químicos da região F, e estudos realizados (BATISTA et al., 2002), mostram que a dinâmica da camada F permanece. Assim a camada que subiu pode ser chamada F3.

A camada F3 pode ser dividida em dois tipos, dependendo da época, ou seja, tipo 1, mais comum nos meses de verão, e do tipo 2 nos meses de inverno. A esta dinâmica de formação de F3 se dá o nome de Anomalia Equatorial. A camada adicional, depois de sua ocorrência, continua a existir por mais de 10 horas próximo ao equador (BALAN et al., 1997).

No setor brasileiro equatorial, a frequência de ocorrência da camada F3 é alta durante o máximo solar, também é alta nos meses de dezembro a fevereiro (verão local), e de junho a agosto (inverno local), e baixa durante equinócios (FAGUNDES et al., 2011).

A figura 3.7 mostra a incidência de radiação solar nas camadas da atmosfera terrestre, com suas diferentes bandas de frequência.

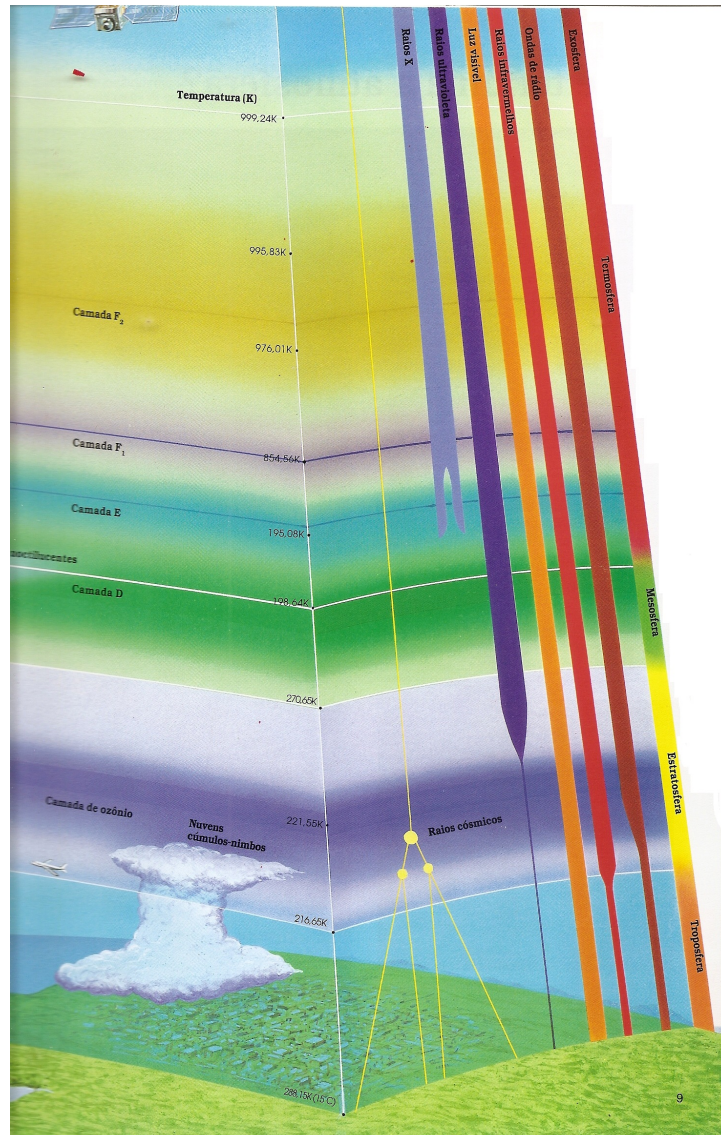


Figura 3.7 - Incidência da radiação solar na camada da atmosfera terrestre nas suas diferentes bandas de frequência.

Fonte: (ARANTES, 1995) Editora

3.3 Processos de transporte na ionosfera

Os processos físicos e químicos que governam o plasma ionosférico resultam em produção e perda da ionização, e em movimento ou transporte de ionização. Nas regiões baixas da ionosfera, camada D e E, os gases são densos o bastante para freiar os movimentos do plasma associados com gradientes de pressão e os efeitos de difusão são desprezíveis. Assim, uma vez que a escala temporal para o transporte de plasma é muito maior do que

para a produção e perda iônica, a concentração e composição iônica são determinadas pelos efeitos locais. Nas regiões da camada F, a escala temporal para o processo torna-se parecido com as das reações iônicas, tal que, a distribuição eletrônica é guiada por um sistema envolvendo difusão de íons das regiões de produção para as regiões de perda (MOOR, 2011). A distribuição em altitude de cada espécie iônica é expressada pela Equação da Continuidade. A Equação da Continuidade relaciona os efeitos dos diferentes processos que influenciam na densidade eletrônica n_e e iônica n_i . As Equações da Continuidade para os elétrons e para cada espécie de íons são:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N_e \vec{V}_e) = P_e - L_e \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i) = P_i - L_i \quad (3.5)$$

onde v demonstra a velocidade macroscópica total resultante dos processos de transporte e os símbolos P e L representam os termos de produção e perda.

A dinâmica do plasma ionosférico, é controlado por ventos neutros, campos elétricos, gradientes de pressão e efeitos gravitacionais. Os ventos neutros são formados pela maré atmosférica e surgem dos gradientes de pressão causados pelo aquecimento solar na atmosfera terrestre, que produzem forças de arraste proporcionais à diferença entre a velocidade do vento, U , e a velocidade das partículas carregadas, $\bar{v}_i$, e suas respectivas frequências s de colisão. Os campos elétricos são produzidos por ventos e são originados pelo dínamo na região E durante o dia e da região F durante a noite. Íons e elétrons são movidos por este campo elétrico, a deriva eletromagnética resultante da força $\vec{E} \times \vec{B}$ transporta o plasma perpendicularmente aos campos elétrico e magnético. Devido aos efeitos gravitacionais e

aos efeitos dos gradientes de pressão o plasma ionosférico tende a ter uma difusão ao longo das linhas de campo geomagnético (CHIAN; REUSCH, 1979).

A Equação do Movimento para íons e elétrons pode ser descrita (RISHBETH; GARRIOT, 1969):

$$\frac{\partial \vec{v}_{e,i}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{e,i}} \vec{\nabla} P + \vec{g} + \frac{q_{e,i}}{m_{e,i}} (\vec{E} \times \vec{V}_{e,i} \times \vec{B}) + \frac{\vec{A}_{e,i}}{\rho_{e,i}} \quad (3.6)$$

sendo: $\vec{V}$ é a velocidade das partículas; $P = nkT$ representa a pressão isotrópica; $\vec{E}$ é o campo elétrico; $\vec{B}$ é o campo magnético; q é a carga elétrica; n é a concentração; k é a constante de Boltzman; T é a temperatura absoluta; ρ é a densidade das partículas; m é a massa da partícula e os sub-índices e,i são representativos de elétrons e íons, respectivamente.

Nas regiões E e F, os movimentos das partículas carregadas são parcialmente controlados pelo campo magnético da Terra. O comportamento da região F2 é bem diferente das outras regiões da ionosfera, a distribuição da densidade eletrônica nesta região é descrita em termos de processos de ionização e recombinação, como também em termos de difusão e outros processos de transporte. Os processos de transporte na região F2 podem ser descritos da seguinte forma:

- Íons e elétrons são movidos por campos elétricos. Os movimentos das partículas e as correntes elétricas resultantes dependem do campo magnético e das frequências de colisão. A deriva eletromagnética do plasma ($\vec{E} \times \vec{B}$) transporta a ionização perpendicularmente aos campos elétrico e magnético, devido à presença de campos elétricos gerados por efeito dínamo nas regiões E e F, e de campos provenientes da magnetosfera.

- Transporte devido a ventos neutros na termosfera, que produz forças de arraste proporcionais à diferença entre a velocidade do vento neutro $\vec{U}$ e a velocidade das partículas carregadas ($\vec{v}_i$ e $\vec{v}_e$) e as respectivas frequências de colisão.
- O plasma tende a ter uma difusão ao longo das linhas do campo magnético, sob a ação da gravidade e de gradientes em sua própria pressão parcial. As forças elétricas entre íons e elétrons tendem a mantê-los juntos, de maneira que a difusão de ambas partículas seja na mesma velocidade (a menos que campos elétricos fortes, capazes de separá-los, sejam aplicados ao plasma). Este tipo de difusão de plasma ou difusão ambipolar é impedido por colisões das partículas carregadas com as partículas neutras e tende a ser confinado pelo campo magnético da Terra.

As Equações de Movimento para íons e elétrons na ionosfera podem ser escritas como:

$$m_i \left(\frac{d\vec{v}_i}{dt} \right) = m_i \vec{g} - \frac{1}{n_i} \vec{\nabla} p_i + e(\vec{E} + \vec{v}_i \times \vec{B}) - m_i \nu_{in}(\vec{v}_i - \vec{U}) - m_i \nu_{ie}(\vec{v}_i - \vec{v}_e) \quad (3.7)$$

$$m_e \left(\frac{d\vec{v}_e}{dt} \right) = m_e \vec{g} - \frac{1}{n_e} \vec{\nabla} p_e - e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) - m_e \nu_{en}(\vec{v}_e - \vec{U}) - m_e \nu_{ei}(\vec{v}_e - \vec{v}_i) \quad (3.8)$$

Nas equações de movimento, pode-se escrever as pressões parciais dos íons e elétrons como sendo, respectivamente, $p_i = n_i k T_i$ e $p_e = n_e k T_e$, onde n representam a densidade, T a temperatura, m a massa, $\vec{g}$ a aceleração da gravidade, $\vec{U}$ é a velocidade do gás neutro, ν é a frequência de colisões, $\vec{v}$ representa a velocidade, e é a carga do elétron, $\vec{E}$ é o campo elétrico e $\vec{B}$ é o campo magnético. Os subíndices e, i e n associam os termos das equações

aos elétrons, íons e partículas neutras, respectivamente ([PILLAT, 2006](#)).

3.4 Luminescência da Atmosfera Terrestre

É um fenômeno natural que ocorre na atmosfera superior em altitudes maiores de 80 km, através de emissão de fótons liberados por átomos e moléculas excitados. A geração desta luminescência é devida a diversos processos físico - químicos e ocorre através da emissão de linhas ou bandas espectrais. Através das observações de luminescência, pode-se medir a densidade das partículas excitadas, temperaturas cinéticas e verificar os diferentes processos dinâmicos que acontecem a diferentes altitudes da atmosfera superior.

Essas emissões possuem duas categorias na atmosfera superior, sendo denominadas aurora e de luminescência atmosférica ou aeroluminescência (airglow). A aurora é produzida quando partículas eletricamente carregadas provenientes do Sol colidem com átomos e moléculas da ionosfera, a uma altitude de 80 a 500 km, levando-os a emissões visíveis a olho nu, já a luminescência atmosférica é emissão de luz mais fraca causada por reações químicas, ou seja, excitação de átomos e moléculas acima de seu nível de energia que ao voltar ao estado fundamental emitem fótons. Ambas ocorrem a qualquer momento, tanto do lado diurno quanto do lado noturno e no crepúsculo.

Historicamente a aurora, devido ao seu alto brilho, principalmente durante tempestades geomagnéticas, foi a primeira a ser observada. Registros históricos datam da Grécia antiga nos séculos III, IV, V a.c.. Elias Loomis percebeu que logo após erupções solares apareciam no céu essas anomalias luminosas, foi como ele chamou. Já Halley foi o primeiro a perceber que estavam ligadas à atividade solar, as interações com o campo magnético e a elementos da alta atmosfera sensíveis a essas interações. Em 1621 Gassendi apresentou um trabalho sobre as primeiras observações sistemáticas de um fenômeno ocorrido no sul da França, que ele chamou de “aurora Boreal”. Anos depois em 1919 Slipher percebeu que

existiam emissões na atmosfera que não eram auroras e não estavam sendo vistas; foram denominadas por Dufay em 1933 como sendo auto-luminescência atmosférica e, portanto, distinto de auroras. Elvey em 1950, sob sugestão de Otto Struve, usou a palavra “airglow”, traduzida para o português, luminescência atmosférica. Esse nome é usado até os dias de hoje.

Entretanto, essa emissão chamada de luminescência é uma radiação eletromagnética, ténue, amorfo e constante, que se dá proveniente de átomos e moléculas excitadas presentes na atmosfera, pode ser observada em qualquer latitude e existe em diferentes comprimentos de onda. A luminescência pode ser denominada de acordo com o ângulo zenital da radiação solar, e dependendo da hora da observação diurna (“dayglow”), noturna (“nightglow”) e crepuscular (“twilight”). A medição noturna é mais comum, pois durante o dia a radiação solar mascara os efeitos do fenômeno

Os meios de detecção da luminescência dependem do propósito de estudo, as observações fornecem técnicas convenientes para medir as densidades de partículas excitadas e temperaturas cinéticas; sendo possível, também, estudar os processos dinâmicos em diferentes alturas na atmosfera superior, e são realizadas de três formas: em solo, a bordo de foguetes e com satélites. Com as observações da luminescência atmosférica podemos estudar (PI-MENTA, 2003):

- Os processos químicos, iônicos e dinâmicos que regem a distribuição vertical dos vários constituintes atmosféricos.
- Processos de excitação que geram emissões óticas.
- A geração e propagação de irregularidades no plasma na região F da ionosfera noturna.

- Os processos ligados à deposição de partículas neutras energéticas na alta atmosfera.
- O acoplamento entre a termosfera e ionosfera.
- As ondas atmosféricas.

A intensidade de emissão da luminescência é muito fraca, a unidade para medir sua intensidade, o Rayleigh, corresponde a intensidade de uma fonte isotrópica que emite 10^6 fótons por centímetro quadrado de coluna por segundo. As principais emissões de luminescência atmosférica noturna observada em solo para o oxigênio atômico excitado na região F são: OI 557,7 nm, OI 630,0 nm e OI 777,4 nm. A Tabela 3.1 mostra essas emissões do oxigênio atômico na região F noturna.

Tabela 3.1 - Principais emissões do oxigênio atômico na região F noturna

Emissão atmosférica	Comprimento de Onda (nm)	Intensidade Típica (R)	Altitude média(km)
OI 557,7	557,7	60-200	250-300
OI 630,0	630,0	300-600	250-300
OI 777,4	777,4	20-200	280-350

3.5 Emissão OI 630,0 nm (Linha vermelha do oxigênio atômico)

Em 1931, Sydney Chapman propôs um mecanismo que ainda hoje é aceito pela comunidade científica, no qual fótons são emitidos através da recombinação entre moléculas, átomos ionizados e elétrons nas diversas camadas da atmosfera. Essa emissão ocorre continuamente, com características distintas nos diversos períodos do dia.

A linha vermelha do OI é emitida pelo átomo de oxigênio no nível de energia 1D , é a mais utilizada no estudo da dinâmica da camada F noturna, vem de uma camada emissora de

aproximadamente 50 km de espessura localizada na parte inferior da região F com emissão entre 250 e 300 km de altitude, sendo resultado de uma transição proibida entre os níveis 1D e 3P . Sua intensidade diminui ou aumenta, quando o plasma ionosférico move-se para baixo, ou para cima.

A linha vermelha do OI é emitida pelo átomo do oxigênio no nível de energia $O(^1D)$, através da transição fotoemissiva $O(^1D) \rightarrow (^3P)$. A emissão de átomos excitado O^1D é gerado a partir do processo de recombinação dissociativa do íon molecular O_2^+ junto com elétrons da região F ionosférica.

A transição radiativa ou emissão de fótons é o mecanismo de perda de energia das partículas excitadas. A energia perdida é quantificada e o fóton emitido tem uma energia igual a $h\nu$, onde h é a constante de Plank $= 6,63 \times 10^{-34}$ Joules/s e ν é a frequência da emissão. Esta energia é equivalente à perda que sofre a partícula ao decair de um nível quântico para outro menor. A Figura 3.8 mostra o diagrama de níveis de energia do oxigênio atômico e as diversas transições dos termos singletos, tripletos e quintetos.

3.5.1 Mecanismo de Recombinação dissociativa

O processo de produção do oxigênio atômico excitado O^1D na região F, que gera a linha vermelha, é a recombinação dissociativa do íon oxigênio molecular com elétrons. Reação dissociativa:



uma parte da energia da reação é usada para dissociar o íon molecular XY^+ em átomos excitados. A recombinação dissociativa do O_{2+} produz os seguintes produtos:

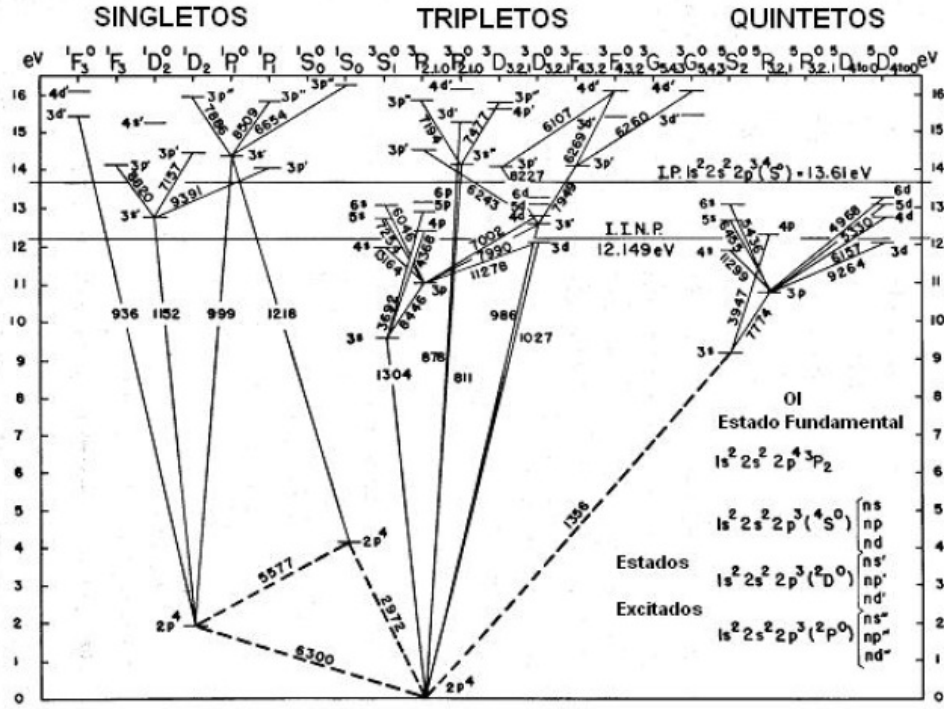


Figura 3.8 - Diagrama de níveis de energia do oxigênio atômico. Transições observadas nas auroras e na aeroluminescência são apresentadas com linhas tracejadas e números grandes. Potencial de ionização IP = 13,61 ev potencial de neutralização íon-íon IINP = 12,149 ev

Fonte: Tinsley et al. (1973)



$$O_2^+ + e \rightarrow O^*(^1D) + O^*(^1S) \quad (3.14)$$

onde $O(^1D)$ e $O(^1S)$ são estados excitados do oxigênio atômico e $O(^3P)$ é o estado fundamental, não excitado. Após a transição $O(^1D) \rightarrow O(^3P)$, o átomo de oxigênio $O(^1D)$ produz um fóton de comprimento de onda 630,0 nm.

$$O(^1D) \rightarrow O(^3P) + \text{foton } 630,0nm \quad (3.15)$$

Esta é a emissão do oxigênio atômico que foi selecionada para o estudo em questão, devido a intensidade, ao detectarmos as bolhas de plasma no período de baixa atividade solar, ela nos permite ter imagens bem mais nítidas do que em outros filtros de interferência.

4 BOLHAS DE PLASMA E O PROCESSO DE INSTABILIDADE RAYLEIGH-TAYLOR

4.1 Processo de geração das bolhas de plasma ionosférico

As bolhas de plasma ou irregularidades ionosféricas de grande escala, são regiões da ionosfera onde a densidade do plasma eletrônica é reduzida. Elas são geradas logo após o pôr-do-sol, quando acontece uma intensificação do campo elétrico zonal, momento em que a camada ionosférica F sofre uma rápida subida devido a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ que origina gradientes abruptos de densidade na base desta camada, devido a isso, originam-se condições físicas favoráveis para a geração da instabilidade do plasma ionosférico. As bolhas geradas deslocam-se geralmente no sentido oeste-leste, ascendo em altitudes e deslocando-se centenas a milhares de quilômetros na direção longitudinal; isto por causa da alta condutividade ao longo das linhas de campo magnético terrestre. A altitude atingida por estas bolhas vai determinar o alcance latitudinal que irão atingir.

A Figura 4.1 ilustra a geração no equador magnético e o deslocamento meridional de uma bolha de plasma, sentido oeste-leste, como também seu crescimento latitudinal, direção norte-sul, na medida em que ela ascende. Este fenômeno ionosférico pode ser observado por diversas técnicas dependendo do objetivo do estudo, por exemplo através de satélites, foguetes, receptores de sistema de posicionamento global (GPS), ionossondas e fotômetros.

A dinâmica do plasma ionosférico é influenciado pelo campo magnético da Terra, a gravidade, as colisões com os constituintes da atmosfera neutra e, principalmente, aos campos elétricos dessa região. Um dos principais mecanismo que explica a geração das irregularidades ionosféricas de grande escala é a Teoria de Instabilidade Rayleigh- Taylor (R-T).

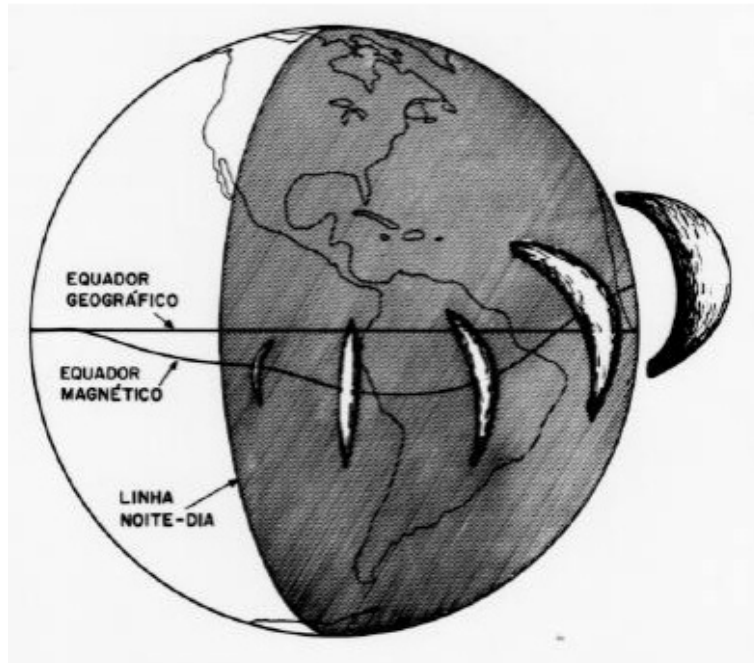


Figura 4.1 - Ilustração da geração e deslocamento de uma bolha de plasma ionosférico ao longo do equador magnético terrestre.

Fonte: (SOBRAL et al., 1999)

4.2 Teoria Rayleigh - Taylor

Dungey(1956) foi o primeiro a propor a instabilidade gravitacional tipo R-T como causador de irregularidades, a qual será descrita baseada em (KELLEY, 1989).

A teoria R-T explica como uma pequena perturbação na base da região F da ionosfera pode gerar irregularidades ionosféricas. Ela é um mecanismo capaz de explicar o espalhamento da região F (“Equatorial Spread F”), presença da variação do gradiente da densidade de plasma em pequena ou grande escala, pelo efeito da força gravitacional na presença de campos magnéticos e elétricos. Haerendel (1973), propondo que fortes gradientes de ionização proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento de processos de instabilidade de plasma.

Logo após o pôr-do-sol, a região E começa um processo rápido de recombinação entre íons, por haver cessado a fonte de energia que estava causando dissociação entre os consti-

tuíntes (radiação solar) e não há condutividade suficiente para curto-circuitar os campos elétricos da região F. Devido à recombinação e aos efeitos eletrodinâmicos (movimento vertical da região F devido a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$), o gradiente de ionização da parte inferior da camada F começa a aumentar. Quando a camada está suficientemente alta, ou o gradiente de ionização está suficientemente elevado para superar efeitos de recombinação, haverá o crescimento das flutuações na densidade, devido a instabilidade R-T. Essas flutuações dão origem as bolhas de plasma na parte inferior da camada, que sobem não-linearmente pelo movimento de polarização $\vec{E} \times \vec{B}$, acima do pico da região F, estendendo as irregularidades para a parte superior da camada (PIMENTA, 2003). Nesta instabilidade local da ionosfera equatorial os valores da densidade da região E e do vento neutro afetam a taxa de crescimento da instabilidade.

A Figura 4.2 é uma ilustração didática da geração e evolução de uma irregularidade de densidade ionosférica. Nesta situação temos um meio com maior densidade sendo sustentado por um meio de menor densidade. Esta configuração, sob a ação da gravidade, resulta em uma região de equilíbrio instável. Uma perturbação na base da região, como, por exemplo, a presença de ondas de gravidade, podem quebrar este equilíbrio, introduzindo uma pequena instabilidade que ao evoluir, geram irregularidades de plasma ionosférico que em grande escala se denominam bolhas de plasma ionosférico. A evolução ou dinâmica deste processo depende de uma série de condições ambientais, como a intensidade e configuração dos campos elétricos presentes, os distúrbios dos campos magnéticos, a altitude e os gradientes de densidade eletrônica na base da camada ionosférica.

A Figura 4.3 mostra, de forma ilustrativa, como se dá a geração e evolução de uma irregularidade através da instabilidade R-T no plano equatorial, a partir de uma perturbação inicial. A força gravitacional para baixo, ou seja, antiparalela ao gradiente de densidade, e o campo geomagnético horizontal, da região equatorial, geram uma deriva das partículas

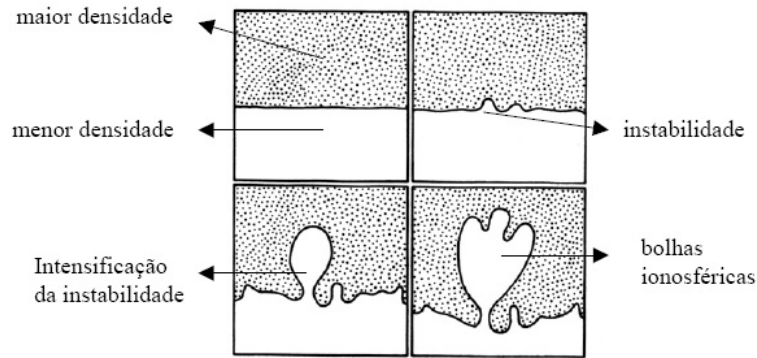


Figura 4.2 - Ilustração didática da evolução de uma instabilidade ionosférica gerando as bolhas de plasma segundo a teoria Rayleigh-Taylor.

Fonte: (KELLEY, 1989)

no plano horizontal. Esta deriva faz com que apareça uma corrente $J_x = nMg/B$ (direção de $\vec{g} \times \vec{B}$) no plano da folha.

Observando a Figura 4.3, percebe-se que esta corrente ou fluxo de partículas é gerado devido ao gradiente de densidade eletrônica. Por causa da proporcionalidade entre o termo gravitacional e a massa, induz-se a deriva $\vec{g} \times \vec{B}$ o que faz aumentar a velocidade com que os elétrons se movem, essa movimentação provoca uma divergência e um acúmulo de cargas ao redor do início da perturbação, resultando no desenvolvimento de campos elétricos de perturbação δE que provocam na região do plasma uma deriva $\delta \vec{E} \times \vec{B}$ de íons e elétrons; na região de alta densidade a deriva é para baixo. Contudo, o plasma de alta densidade é movimentado para baixo e o de baixa densidade é movimentado para cima, transformando o sistema em um meio instável devido ao fato da amplitude de perturbação estar aumentada. (KELLEY, 1989)

Para calcular a taxa de crescimento da instabilidade R-T podemos supor uma pequena perturbação na densidade de plasma e no campo elétrico. Com as equações básicas de fluido, Equação da Continuidade e do Momento, obtemos a taxa de crescimento γ da instabilidade dada por (4.1) (STEPHAN et al., 2002)

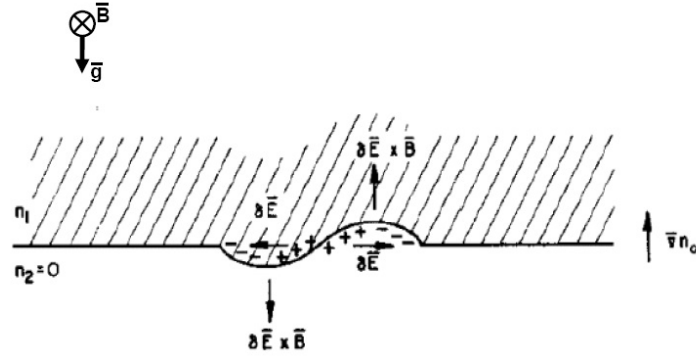


Figura 4.3 - Esquema da geração e evolução da instabilidade Rayleigh-Taylor em uma geometria equatorial dos campos magnéticos e elétricos.

Fonte: (KELLEY, 1989)

$$\gamma = \left(\vec{V}_P - \vec{U}_N - \frac{\vec{g}}{\nu_{in}} \right) \cdot \frac{\nabla n}{n} - R \quad (4.1)$$

sendo, $\vec{g}$ é a aceleração gravitacional, ν_{in} é a frequência de colisões das partículas, $\vec{V}_P = (\vec{E} \times \vec{B}/B^2)$ a velocidade de deriva das partículas, R a taxa de recombinação química e $\vec{U}_N$ a velocidade do vento neutro.

As bolhas de plasma tem crescimento proporcional à velocidade de deriva vertical da ionosfera ao anoitecer e ao gradiente de densidade eletrônica na base da ionosfera. Os parâmetros que contribuem para o desenvolvimento das irregularidades ionosféricas, são muitos, dificultando assim, a análise de sua causa e desenvolvimento (ABDU, 1999), (ABDU, 2001).

5 INSTRUMENTAÇÃO

Neste trabalho de dissertação foram utilizados dados de dois instrumentos científicos para estudar as características das irregularidades ionosféricas na camada F na região equatorial e de baixas latitudes brasileira: o fotômetro imageador tipo “all-sky” e a ionossonda digital do tipo CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde), instalados nos observatórios de São José dos Campos - SP, Campus Urbanova da UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba) e em Palmas - TO, Campus da ULBRA (Universidade Luterana do Brasil).

Na análises dos dados, linearização e cálculo do valor da velocidade de deriva do plasma ionosférico das imagens obtidas dos fotômetros imageadores foi utilizado o programa UASDA (Univap All-Sky Data Analysis) e nas análises dos dados obtidos com as ionossondas digitais, para a obtenção da altitude variável da camada F ionosférica noturna, o programa UDIDA (Univap Digital Ionosonde Data Analysis), ambos desenvolvidos pelo Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP.

5.1 Fotômetro Imageador All-Sky

O fotômetro imageador de alta resolução espacial é um telescópio que possui uma lente tipo “olho de peixe”, um sistema telecêntrico, uma roda de filtros de interferência, um sistema de re-imageamento, uma câmera CCD (do inglês (*“Charge Coupled Device”*)), um sistema de refrigeração da CCD e um microcomputador de gerenciamento da sua operação. A Figura 5.1 mostra o esquema do fotômetro imageador em operação que foi usado na observação e estudo das irregularidades ionosféricas. A lente “olho de peixe” permite uma visão de 180°, de horizonte a horizonte, na área considerada. Os raios divergentes que compõem as imagens captadas pela lente “olho de peixe” são colimadas para passar perpendicular e paralelamente entre si pelo filtro respectivo. No caso do oxigênio atômico o instrumento possui os filtros de interferência OI 557,7 nm; OI 630,0 nm e OI 777,4 nm. Além desses

há filtros para sódio, NaD 589,3 nm; hidroxila OH banda 9,4; oxigênio molecular $O_2(0,1)$ 864,5 nm e nitrogênio molecular N_2^+ 427,8 nm. Para assegurar que toda a imagem recolhida pela lente “olho de peixe” entre no colimador e conseqüentemente termos uma imagem maior possível e de boa resolução, uma lente de campo é colocada entre a lente “olho de peixe” e o colimador. A largura focal desta lente de campo deve ser de um comprimento tal que a imagem na abertura da lente se encontre no filtro, como se observa no esquema da Figura 5.1 (MENDILLO et al., 1982).

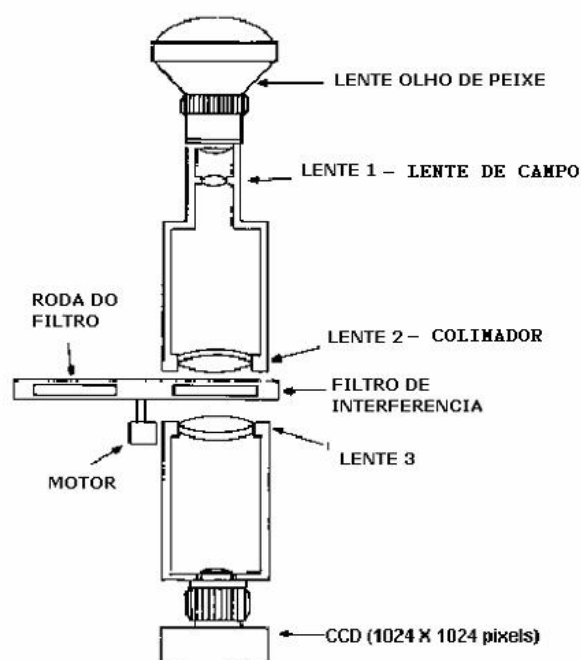


Figura 5.1 - Desenho esquemático do fotômetro imageador de alta resolução espacial tipo olho de peixe com roda de filtros e detector de coleta de imagens tipo CCD.

Fonte:(MENDILLO et al., 1982)

O valor do ângulo de incidência no filtro pode ser arbitrariamente pequeno, basta para isso afastar a uma distância suficiente o colimador da lente. Neste procedimento há a limitação de quanto mais afastado o colimador da lente, maior será o tamanho da imagem obtida e maior o tamanho do filtro a ser utilizado. Na prática o filtro é colocado tão

longe quanto seu tamanho comporte pegar a totalidade da imagem coletada. Leva-se em consideração também que este ângulo é minimizado inicialmente quando a lente “olho de peixe” produz imagens bem pequenas. O fotômetro possui filtros de interferência de 3 polegadas de diâmetro com 2,0 nm de largura de banda para as emissões em OI 630,0 nm.

Para a observação e coleta de imagens no fotômetro imageador é necessário um céu limpo, sem nuvem, sem neblina e sem o forte brilho proveniente da Lua. Assim, a operação do imageador fica restringida ao período lunar de quarto minguante, lua nova e até quarto crescente.

Um dos grandes avanços tecnológicos obtidos para a detecção de aeroluminescência atmosférica utilizando técnicas ópticas foi o desenvolvimento de novos detectores do tipo CCD. O sistema CCD usado nos detectores Photometric CH350 consiste em uma grade de $6,45\text{cm}^2$, de área, alta resolução e um dispositivo retro-iluminado de 1024×1024 pixels com uma profundidade de 14 bits. A alta eficiência quântica, o baixo ruído térmico (0,5 elétrons/pixel/s), o baixo ruído de leitura, e alta linearidade (0,05%) deste dispositivo fornece uma capacidade excelente para as medições quantitativas. O sistema de refrigeração diminui a temperatura interna da câmera CCD para -34°C de forma a minimizar o ruído térmico da própria câmera. O microcomputador é usado para a aquisição dos dados e no controle da roda de filtros. As imagens são re-amostradas para 512×512 pixels esta configuração permite imagens de alta relação sinal-ruído com taxas de integração do tempo de exposição de 120 s para emissões de OI 630,0 nm. As imagens são gravadas em intervalos de 6 a 12 minutos dependendo do ano a ser analisado (ABALDE et al., 2004) devido à sequência de filtros utilizados nessa época.

A Tabela 5.1 apresenta a posição e características detalhadas dos filtros de interferência utilizados. A Figura 5.2 mostra a parte interna da roda de filtros e a Figura 5.3 mostra

uma vista completa do sistema óptico (lente, colimador, roda de filtros, canhão e CCD) do fotômetro imageador instalado na UNIVAP em São José dos Campos - SP.

Tabela 5.1 - Relação dos filtros de interferência presentes nas oito posições da roda de filtros dos fotômetros imageadores da UNIVAP

Posição da roda de filtros	Emissão Atmosférica	Comprimento de Onda (nm)	Largura de banda da janela [nm]	Espessura física do filtro (nm)	Alt. méd. da camada de emissão (km)
1	OI 630,0	630,0	2,0	5,3	270
2	OI 777,4	777,4	1,5	5,3	340
3	OI 557,7	557,7	2,0	5,3	97-270
4	O ₂ (0,1)	864,5	12,0	5,3	94
5	NaD	589,3	2,5	5,3	91
6	OH	720-910(notch em 860,0)	1,5	—	—
7	N ₂ ⁺	427,8	1,5	11,0	150
8	livre	—	—	—	—

O estudo das imagens obtidas pelos fotômetros imageadores em diferentes emissões permite aprimorar nosso conhecimento da morfologia e da dinâmica da ionosfera em diferentes altitudes e numa vasta região do setor brasileiro, que vai da região equatorial a baixas latitudes, auxilia no entendimento e modelagem da dinâmica e acoplamento mesosfera/termosfera/ionosfera. A Figura 5.4 mostra um exemplo de imagem obtida pelo fotômetro imageador, com filtro de interferência OI 630,0 nm, operando em SJC. A área de abrangência das imagens depende do filtro utilizado e da altitude da base da camada a ser considerada para essa emissão. A Figura 5.5 mostra a área de cobertura das imagens obtidas nos observatórios da UNIVAP - Urbanova de São José dos Campos - SP, SJC, e da ULBRA em Palmas - TO, PAL, para o filtro de interferência na emissão de OI 630,0 nm, considerando o pico de emissão na altitude de 280 km.



Figura 5.2 - Vista interna da roda de filtros dos fotômetros imageadores da UNIVAP.



Figura 5.3 - Vista do fotômetro imageador aberto, utilizado pelo Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP.

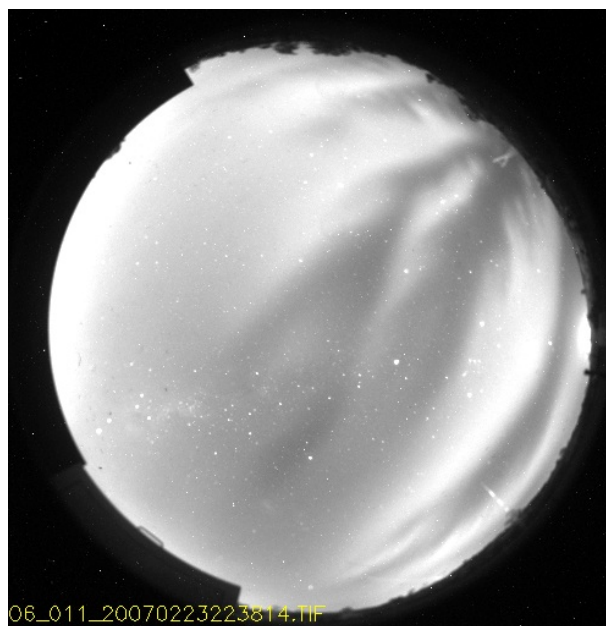


Figura 5.4 - Imagem obtida no observatório da UNIVAP no Campus do Urbanova no dia 23 de fevereiro de 2007 às 22:38:14 usando o filtro de interferência OI 630,0 nm. Tempo de aquisição 120 segundos. As estruturas escuras são as irregularidades ou depleções na intensidade da emissão. A imagem original ou crua apresenta o norte geográfico na parte superior direita e forte distorção, comprimida no seu centro e expandida nas bordas.

5.2 Ionossonda Digital

Dos diferentes métodos de rádio que têm sido desenvolvidos para estudar as regiões ionosféricas, aquele que é o mais utilizado e presente na CADI, é o chamado "método de pulso" introduzido primeiramente por Breit e Tuve ([MITRA, 1952](#)).

A digissonda mede o perfil de densidade eletrônica e deriva zonal de plasma, os parâmetros ionosféricos obtidos na operação de radio sondagem são os seguintes:

- 1) Tempo gasto pelo sinal de rádio na propagação e reflexão na ionosfera, obtemos a altura virtual de reflexão (h');
- 2) Intensidade do sinal refletido, deduzimos o coeficiente da reflexão ρ ;
- 3) Estado de polarização do sinal recebido, inferimos a rotação de fase do sinal.



Figura 5.5 - Mapa da América do Sul ilustrando a área de cobertura das imagens do fotômetro operando no Campus do Urbanova em São José dos Campos - SP ($23,21^{\circ}\text{S}$; $45,86^{\circ}\text{O}$; dip latitude $18,95^{\circ}\text{S}$) e Palmas - TO ($10,28^{\circ}\text{S}$; $48,33^{\circ}\text{O}$; dip latitude $6,65^{\circ}\text{S}$), para os ângulos zenitais de 90° e 75°

A ionossonda CADI é um sistema transmissor-receptor de pulsos eletromagnéticos de propagação vertical, operando na faixa de rádio frequência de 1-20 MHz e consequentemente abrange uma altitude entre 90 e 1000 km . A ionossonda digital, com potência de 600 W, emite trem de pulsos de saída de $13 \times 40 \mu\text{s}$ e codificados por fase $\pm 90^{\circ}$ espacial com uma resolução em altura de 6 km o que dá uma vantagem de potência efetiva de saída de $13 \times 600 \text{ W} = 7,8 \text{ kW}$.

O funcionamento baseia-se em princípios básicos da eletrodinâmica e física do plasma. Um pulso gerado pelo transmissor com uma determinada frequência (f_T) é transmitido para a atmosfera pela antena delta transmissora, este pulso de rádio frequência propaga-se na vertical pela atmosfera até encontrar uma região do plasma ionosférico que satisfaça a

condição de ressonância: $(f_p = ([n_e q^2]/[4\pi^2 \epsilon_0 m_e])^{1/2})$; onde n_e é a densidade de elétrons, q é a carga do elétron, ϵ_0 é a constante de permissibilidade no vácuo, m_e é a massa do elétron, onde sofre reflexão e passa a ser detectado pela antena dipolo receptora.

A Figura 5.6 mostra o esquema de transmissão e recepção de um pulso da ionossonda digital CADI descrito acima. O sistema ao fazer uma varredura em frequências na faixa de 1 MHz a 20 MHz obtém um espectro de frequência de ressonância e consequentemente de densidade eletrônica do plasma ionosférico em função da altitude vista a relação presente entre a frequência do plasma e a densidade eletrônica local apresentada na expressão matemática acima. Esta relação é denominada de ionograma.

A ionossonda utilizando o princípio do RADAR, detecção e telemetria pelo rádio (Radio Detection and Ranging), registrando o tempo transcorrido entre a transmissão e a recepção do pulso enviado em cada uma das frequências escolhidas. Em seguida ela converte esse tempo em distância utilizando a seguinte equação:

$$h = c \frac{\Delta t}{2} \quad (5.1)$$

onde h é a altura virtual, Δt é o tempo entre a transmissão e a recepção de um pulso na frequência específica; c é a velocidade da luz.

Calculando a altura virtual utilizando a Equação 5.1, porque a velocidade utilizada é a velocidade da luz e a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende da densidade do meio onde se propaga, isto é, uma função da densidade do plasma local, ou seja, a velocidade real da onda (V_R) é uma função do índice de refração do meio, o pulso percorre o espaço no interior do plasma a uma velocidade inferior à velocidade da luz ($V_R < c$) que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo.

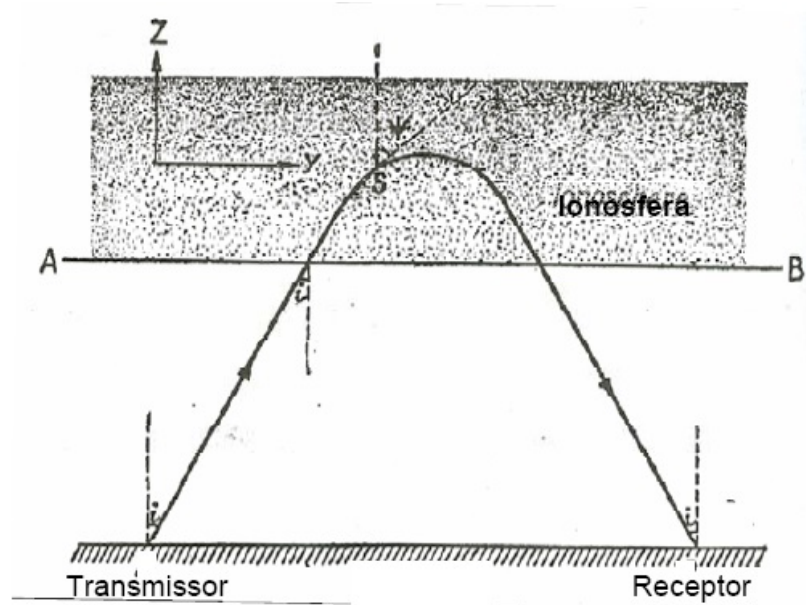


Figura 5.6 - Esquema da transmissão e recepção de um pulso de rádio emitido e recebido pelo conjunto de antenas tipo delta de uma ionossonda digital tipo CADI.

Fonte: (MITRA, 1952) adaptado por (JESUS, 2008)

O cartão Síntese Direta Digital (DDS Card) produz as formas de onda de saída do oscilador local e a frequência RF como um número de 10 bits. Estes são convertidos em tensão por dois conversores D/A. A placa DDS também produz uma frequência de referência 781 kHz (sinal "I" com fase 0° e sinal "Q" com fase 90°) e a amplificação de potência dos sinais de RF. O receptor, que amplifica e demodula os sinais de retorno, tem um amplificador RF padrão de banda larga, um misturador, e um amplificador de banda estreita IF em 781 kHz. O sinal é então dividido e misturado com os sinais "I" e "Q" de referência 781 kHz, obtendo um sinal misturado DC desde que IF é a frequência de referência. As saídas são tensões DC e elas são amostrados e digitalizados pelo conversor A/D. As amostras digitalizadas estão correlacionados com a sequência de Barker, sendo a codificação Barker usada e transferida para o computador. Os pulsos recebidos podem ser coerentemente amostrados para dar um aumento adicional na razão sinal/ruído proporcional ao número de pulsos médios recebidos. O processamento FFT pode ser usado para remover a porção linear da fase de deriva, quando a ionosfera é suficientemente não-estacionária, caso contrário, a

coerência de fase seria perdida durante um período médio de amostragem (ABALDE et al., 2004).

Os dados obtidos na operação da ionossonda digital são apresentados na forma de gráficos denominados ionogramas, a Figura 5.7 apresenta um exemplo deste ionograma noturno para SJC na noite de 04 de abril 2004.

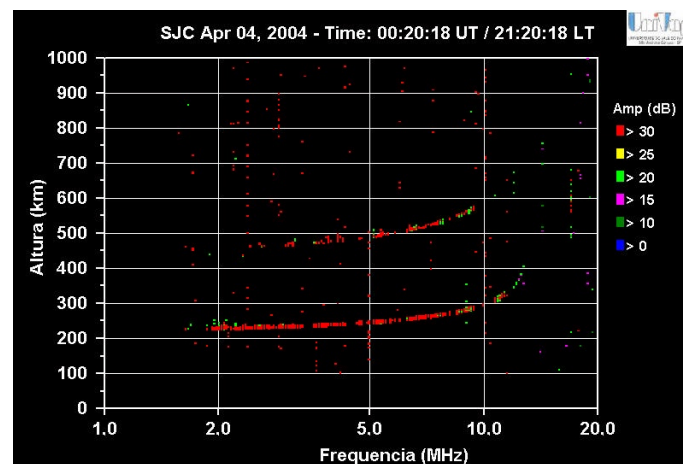


Figura 5.7 - Ionograma característico obtido pela ionossonda digital CADI operando no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos ($23, 21^{\circ}S, 45, 86^{\circ}O$) no dia 04 de abril de 2004 às 00:20:18 UT, 21:20:18 LT (hora local, $UT = LT + 3h$).

Dos dados fornecidos na operação das ionossondas digitais obtemos a altura mínima em que ocorreu a primeira reflexão na camada F, altura da base da camada, conhecida como altura mínima virtual ou $h'F$; frequência máxima em que houve a reflexão do traço ordinário denominada frequência crítica ou $foF2$. Destes parâmetros podem ser deduzidos outros, como por exemplo, uma correção da altura real do pico da densidade da camada F ou $hpF2$. Este último parâmetro é obtido como sendo a altura virtual do traço ordinário da onda e é dado pela expressão $0,834 \times foF2$. Os ionogramas mostrados na Figura 5.8, telas do programa UDIDA (Univap Digital Ionosonde Data Analysis, (PILLAT; FAGUNDES, 2004)) apresenta o cálculo e análises destes e outros parâmetros.

Em base nos dados obtidos pela ionossonda digital, Figuras 5.7 e 5.8 é possível parametrizar as camadas D, E e a parte inferior da camada F ionosférica, ou seja, da base da camada ionosférica até o pico da densidade na camada F.

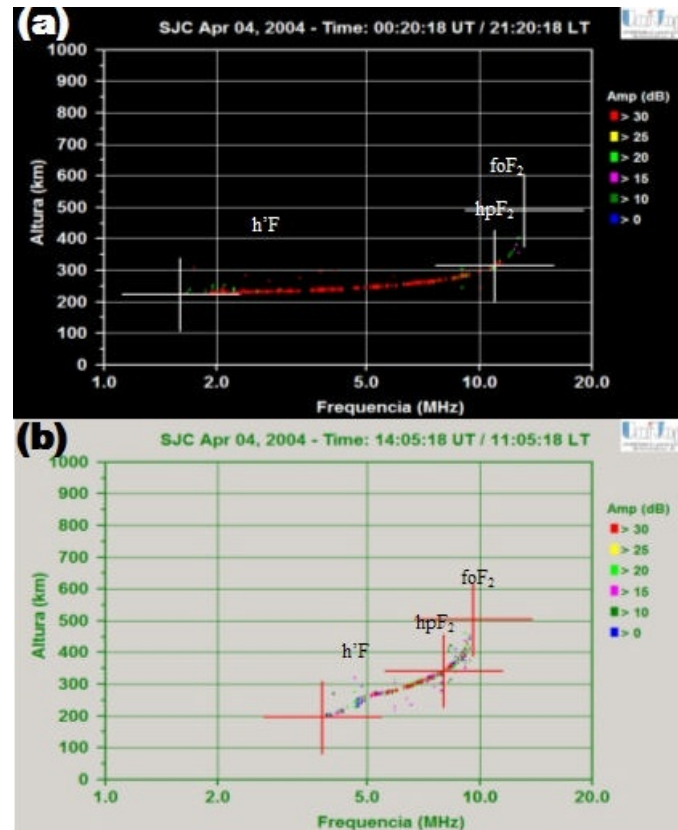


Figura 5.8 - Perfis da densidade eletrônica ionosférica, ou ionogramas, com indicação da altura mínima virtual da camada ($h'F$), frequência máxima ou crítica (foF_2) e a altura do pico da densidade da camada F (hpF_2) para dois momentos, às 21:20:18 (a) e às 14:05:18 (b) hora local (LT) do dia 04 de abril de 2004 em São José dos Campos ($23,21^\circ S, 45,86^\circ O$).

A Figura 5.9 apresenta o mastro das antenas dipolo delta transmissora e receptora (Figura superior) e container, laboratório de antenas (Figura inferior), onde encontra-se o equipamento da ionossonda digital operando em São José dos Campos.

A Figura 5.10 mostra uma vista interna do container com o módulo do equipamento da ionossonda digital CADI e seu microcomputador gerenciador.



Figura 5.9 - Vista do Laboratório de Antenas 1 - Ionossonda no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos ($23,21^{\circ}S, 45,86^{\circ}O$) onde opera uma ionossonda digital CADI. Figura superior mastro de sustentação das antenas delta verticais de transmissão e recepção, figura inferior vista do container onde opera o equipamento da ionossonda digital e de um receptor de GPS.



Figura 5.10 - Vista interna do Laboratório de antenas no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos com o módulo transmissor e receptor e o microcomputador dedicado gerenciador do equipamento CADI.

Fonte: (FREITAS, 2007)

6 METOLOGIA E ANÁLISES DE DADOS

6.1 Metodologia

O Grupo de Física Espacial da UNIVAP, Para as pesquisas com técnicas ópticas, conta com três fotômetros imageadores de alta resolução operativos e localizados: no Campus Urbanova da UNIVAP em São José dos Campos - SP, no Campus da Universidade Luterana do Brasil - ULBRA em Palmas - TO e no Observatório Pico dos Dias no Laboratório Nacional de Astrofísica - LNA em Brasópolis - MG.

Para armazenar, tratar e analisar os dados desses equipamentos contamos com o programa UASDA - Univap All Sky Data Analysis. O programa é uma ferramenta essencial para a análise de dados obtidos pelo fotômetro imageador de alta resolução. Ele permite através da análise das imagens coletadas conhecer os fenômenos físicos e químicos presentes na região da atmosfera terrestre em estudo: cálculo das dimensões das irregularidades do plasma, suas velocidades de deriva, altura da camada F ionosférica, variação espaço temporal da densidade eletrônica e o pico da camada F.

Este programa emprega o IDL para carregar e visualizar as imagens e o Visual Basic como interface para o usuário. Ele analisa as imagens selecionadas dos fotômetros imageadores, imagens cruas para obter valores quantitativos e pode linearizar as mesmas para obter valores qualitativos dos diferentes parâmetros que caracterizam os fenômenos ionosféricos presentes nas imagens: bolhas de plasma, ondas de gravidade e planetárias, estratificação das camadas ionosféricas observadas, e outros.

Para obter valores numéricos dos parâmetros primeiramente é necessário obter as características não linear da lente “olho de peixe” do aparelho; este processo é importante na linearização das imagens e pode ser dividido em três etapas:

- 1) cálculo do centro real da imagem, ou ponto zenital da observação;
- 2) cálculo do ângulo de rotação do eixo da imagem, para ficar orientado com as coordenadas geográficas, posicionando o Norte geográfico na parte superior centrado na tela;
- 3) geração da função de transferência (os cinco coeficientes de um polinômio de quarta ordem), para linearização das imagens. Pelo efeito óptico da lente “olho de peixe” as imagens guardadas apresentam-se distorcidas.

A linearização, o cálculo dos parâmetros das três etapas enumeradas acima, é feito a partir de uma sub-rotina própria do programa UASDA que emprega as imagens cruas coletadas pelo instrumento, as coordenadas geográficas do observatório, os horários das imagens e o mapa do céu obtido de outros aplicativos, por exemplo o SKYMAP.

Após a obtenção dos parâmetros de linearização, próprios para cada observatório e período em que o aparelho ficou fixo, sem movimentação, é possível realizar a linearização de qualquer das imagens coletadas nesse período; para isso primeiro, em sub-rotina própria engrossa-se as coordenadas geográficas do observatório, a altitude da emissão para as imagens selecionadas no respectivo filtro de interferência e a área de cobertura em análise. O programa carrega automaticamente os valores que caracterizam a lente: centro real, ângulo de rotação e coeficientes do polinômio característico da não linearidade. Nesta etapa é possível visualizar a imagem crua e área selecionada linearizada da bolha de plasma ou qualquer outra região a partir do centro zenital da imagem, como mostra a Figura 6.1. Neste processo de linearização o programa converte a dimensão em pixels da imagem original para uma imagem em coordenadas geográficas, parametrizada em graus ou quilômetros. A conversão em quilômetros é mais simples e emprega a regra de proporção, diferente da conversão em graus onde é preciso utilizar relações que introduzem

as coordenadas do ponto de observação, o raio da Terra e a altitude da camada ionosférica da imagem a linearizar, (PILLAT et al., 2009).

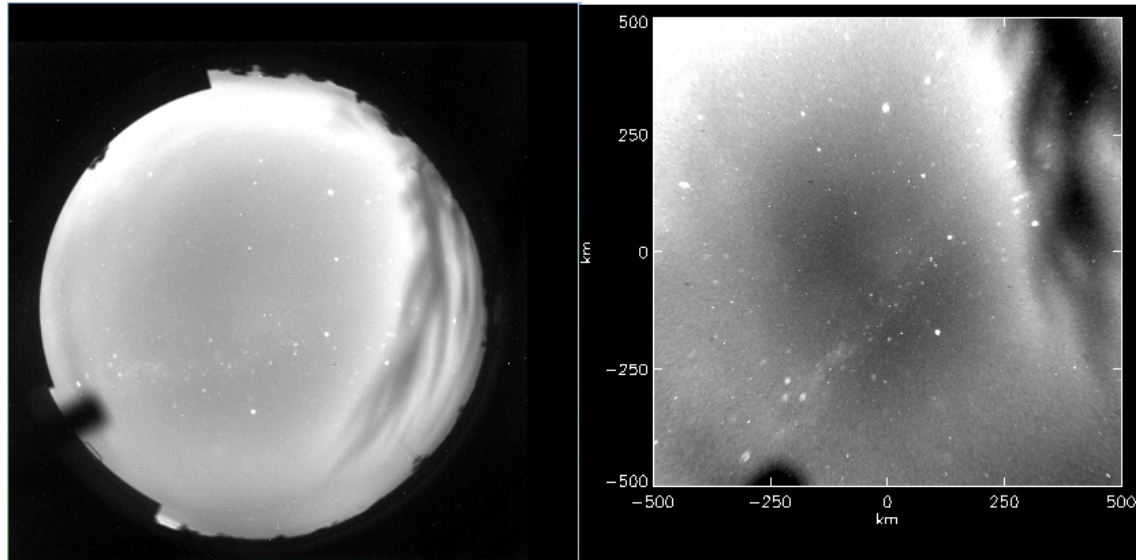


Figura 6.1 - Tela do programa de linearização de imagem do UASDA, a esquerda uma imagem coletada original ou crua no filtro de interferência OI 630,0 nm e a direita ela já linearizada para uma altitude de 280 km e com uma área de cobertura de 1000 km x 1000 km. Imagem obtida pelo aparelho instalado no Campus do Urbanova em SJC no ano de 2009

Nesta etapa de linearização utilizamos uma interface gráfica similar à apresentada na Figura 6.2, onde são disponibilizadas ao operador opções para: gerar uma sequência animada de imagens ou vídeo, ampliar uma região específica da imagem para um melhor estudo detalhado do fenômeno, espelhar e rotar a imagem em estudo, visualizar os valores dos parâmetros calculados no seu centro e rotação, inserir as coordenadas (azimute e elevação) das estrelas que nos auxiliam no processo, carregar e salvar as informações geradas.

Uma outra sub-rotina do programa UASDA permite o cálculo dos valores das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma, realizado a partir de uma sequência de imagens linearizadas, onde se seleciona as diferentes alturas dos cortes a serem feitos nos perfis de intensidade das imagens, escolhidas conforme o estudo desejado. A interface gráfica

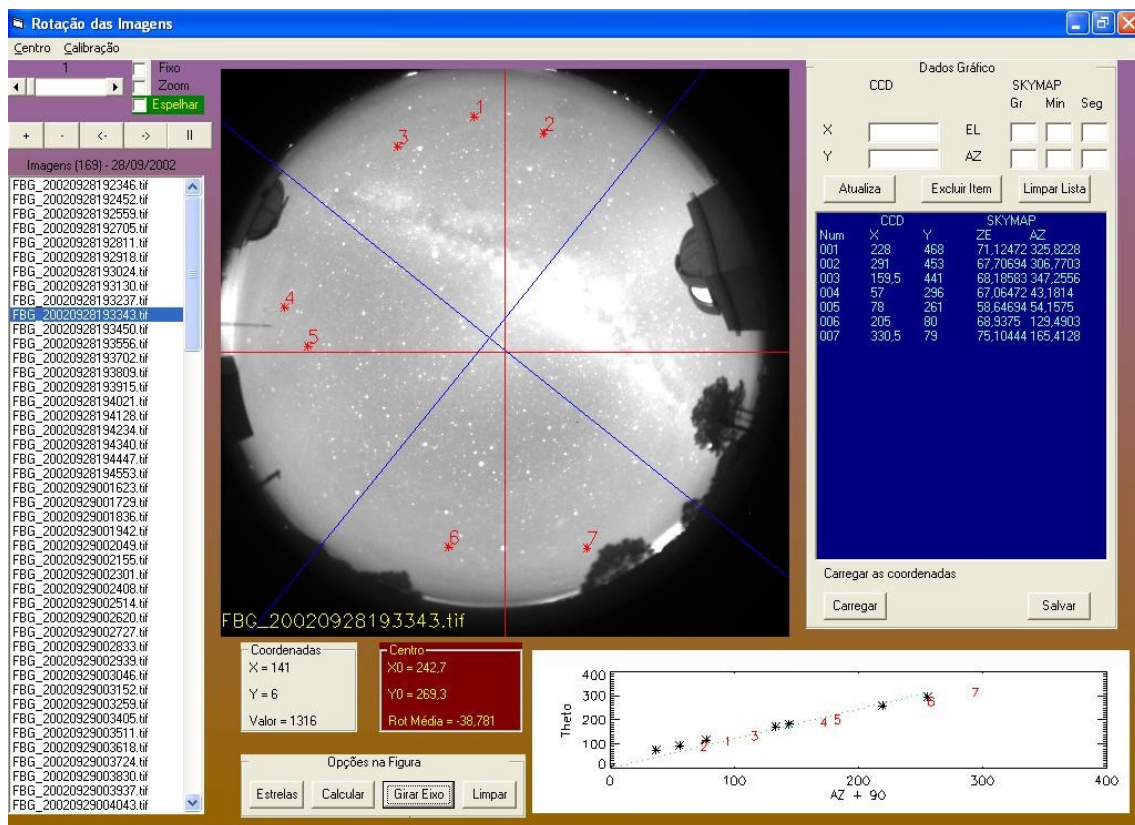


Figura 6.2 - Exemplo de uma vista da interface utilizada na etapa do cálculo dos parâmetros característicos da calibração da lente e linearização das imagens coletadas.

da Figura 6.3 mostra um exemplo deste trabalho com imagens obtidas pelo fotômetro imageador em operação em SJC, na noite de 08 de fevereiro de 2010, linearizado a uma altitude de 280 km (filtro de interferência na emissão OI 630,0 nm) e área de 1000km x 1000 km. Pode ser observado quatro cortes em 350 km, 400 km, 440 km e 480 km.

Na Figura 6.4 visualizamos quatro gráficos com os cortes no perfil de intensidade para cada um dos níveis selecionados citados anteriormente. Esta Figura ilustra a sequência de cortes utilizada no cálculo do valor da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma através do deslocamento das paredes (gradiente na intensidade da densidade de plasma eletrônico) da bolha em análise. Em cada gráfico temos dois perfis ou gradientes de densidade correspondente a duas imagens com horários consecutivos onde se selecionam os dois pontos que definem as retas das duas paredes para cada uma das bolhas. Assim conheci-

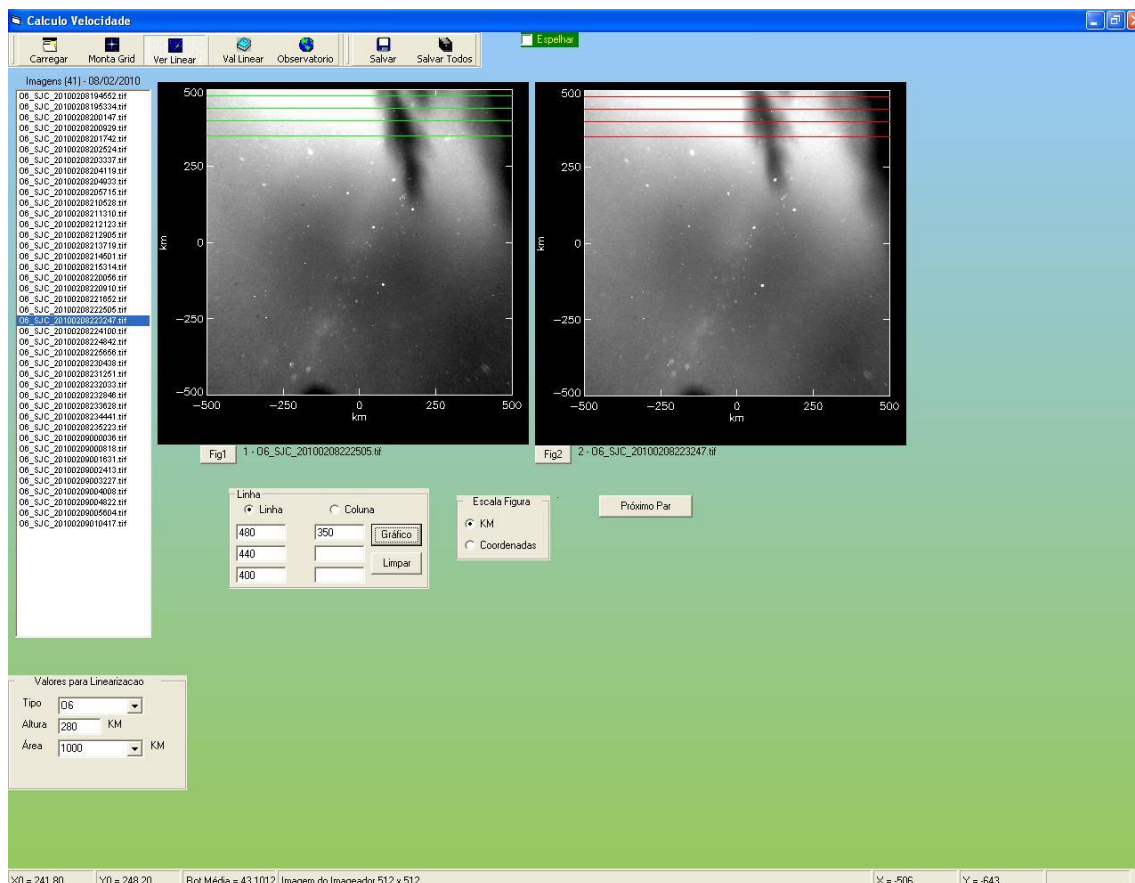


Figura 6.3 - Vista da janela inicial da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma. Nela é possível selecionar a noite em análises e as duas imagens linearizadas obtidas em horários diferentes a partir das quais se calcula o valor do parâmetro. Na parte superior de cada uma delas temos os cortes selecionados e identificados na janela inferior. Os cortes em verde são da imagem com o primeiro horário seguido da imagem com cortes vermelhos do segundo horário.

dos os horários em que esses perfis/imagem foram obtidos (informação que cada imagem registra e o programa acessa) se calcula o valor da velocidade a partir do deslocamento apresentado por essas retas. O programa calcula o valor da velocidade para cada um dos cortes selecionados nesse horário e guarda estes valores e seu valor médio. Nesta interface também é possível fazer uma ampliação em regiões determinadas do gráfico e salvar um arquivo com os dados obtidos para o cálculo da velocidade (valores dos cortes, velocidades parciais ou individuais de cada corte e cada parede da esquerda ou da direita da depleção ou bolha) (PILLAT et al., 2009). O programa permite fazer até seis cortes, mas em nosso

trabalho de dissertação foram utilizados quatro cortes para cada período calculado ao longo de todas as noites analisadas nos dois observatórios considerados.

A Figura 6.5 apresenta um exemplo da tela com o cálculo da velocidade para cada um dos quatro cortes realizado em cada horário ao longo de cada uma das noites, com a presença de bolhas de plasma, analisadas.

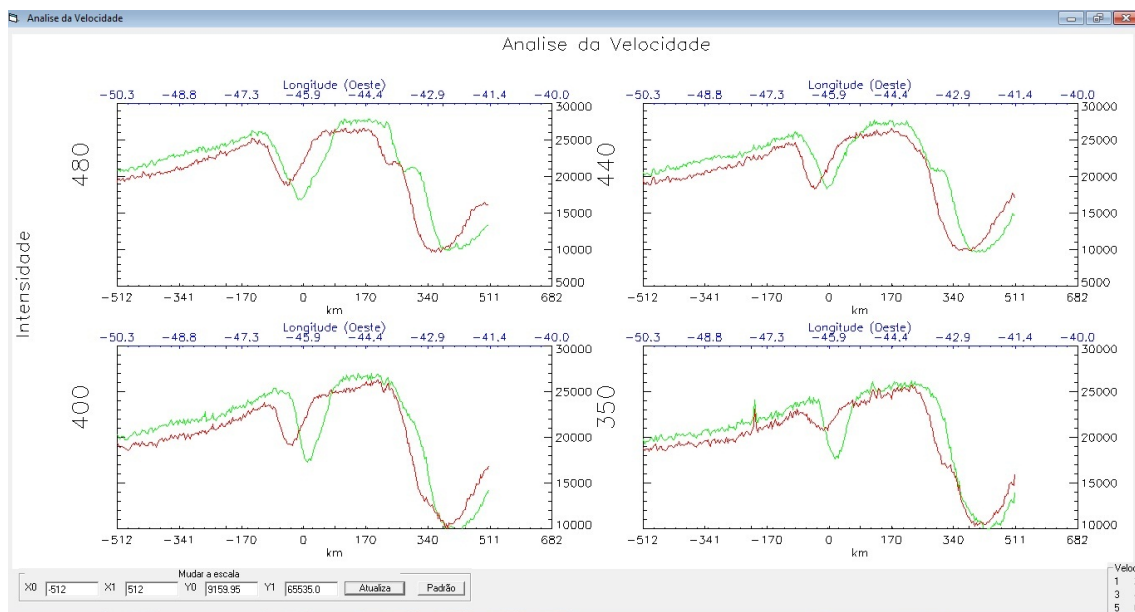


Figura 6.4 - Vista do perfil de intensidade para os quatro cortes selecionados na Figura 6.3. O perfil em cor verde é da imagem do primeiro horário e o perfil em cor vermelho é da imagem do segundo horário, seu deslocamento indica o movimento que a bolha teve nesse intervalo de tempo.

Nosso trabalho calcula a velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma em duas situações para ambos observatórios: inicialmente consideramos uma altitude fixa de 280 km na emissão ionosférica do OI 630,0 nm nas imagens empregadas; logo repetimos a análise considerando altitudes da camada ionosférica variáveis ao longo da noite. O valor dessa altitude variável foi obtida a partir dos dados simultâneos coletados pelas ionossondas digitais, que operam junto com os fotômetros imageadores, e permitem, quando não há espalhamentos na emissão, poder determinar com relativa facilidade e precisão a altura

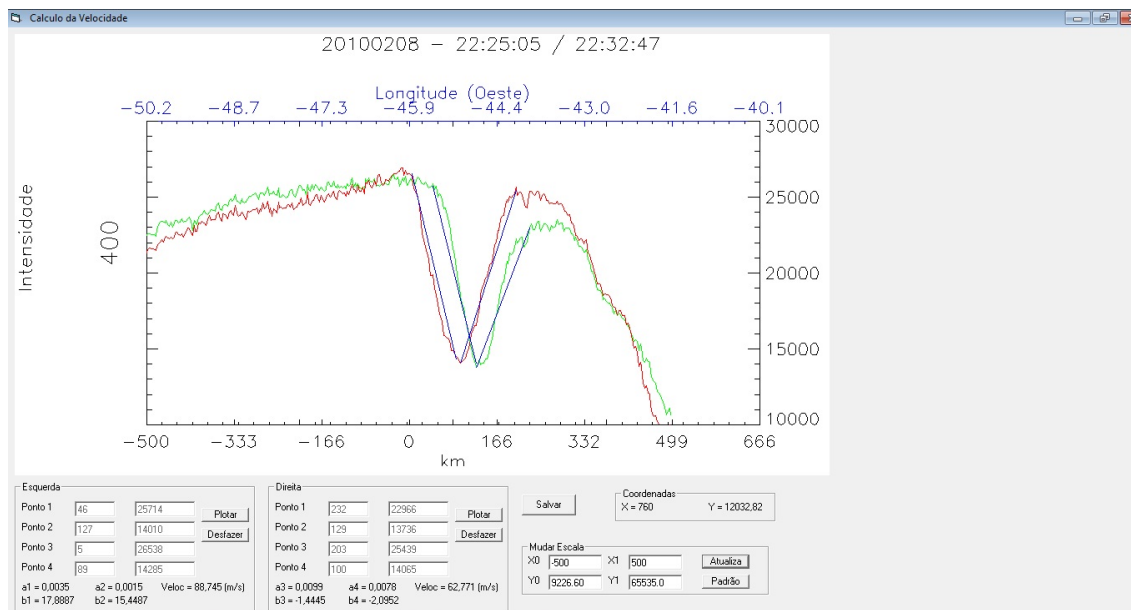


Figura 6.5 - Exemplo da interface gráfica utilizada no cálculo de velocidade de deslocamento da bolha de plasma a partir de um dos quatro cortes no perfil de intensidade de emissão selecionado, Figuras 6.3 e 6.4. Observa-se o traçado das “paredes” nas bordas da bolha construídas a partir dos dois pontos selecionados para cada uma delas.

do pico da emissão selecionada.

Assim para fazer esta segunda parte do trabalho utilizou-se de dados de rádio coletados pelas ionossondas digitais em São José dos Campos - SP e Palmas - TO nas mesmas noites e horários dos dados selecionados nos fotômetros imageadores. Devido a que escolhemos noites com a presença de bolhas de plasma nem sempre foi possível obter valores precisos nos parâmetros dos ionogramas estudados.

As ionossondas digitais CADI que operam em ambos os observatórios de SJC e PAL estão ajustadas para realizar uma varredura de frequências (180 frequências) ou um ionograma a cada 5 minutos, 2 arquivos por hora e 48 arquivos por dia. São registrados dois tipos diferentes de arquivos, metade com a extensão md4 que correspondem a 12 ionogramas completos (dados com as 180 frequências), e a outra metade com a extensão md3, 12 ionogramas com dados de somente 6 frequências previamente selecionadas.

A Figura 6.6 mostra um exemplo de ionogramas típicos do arquivo md4, que foram os utilizados para este trabalho.

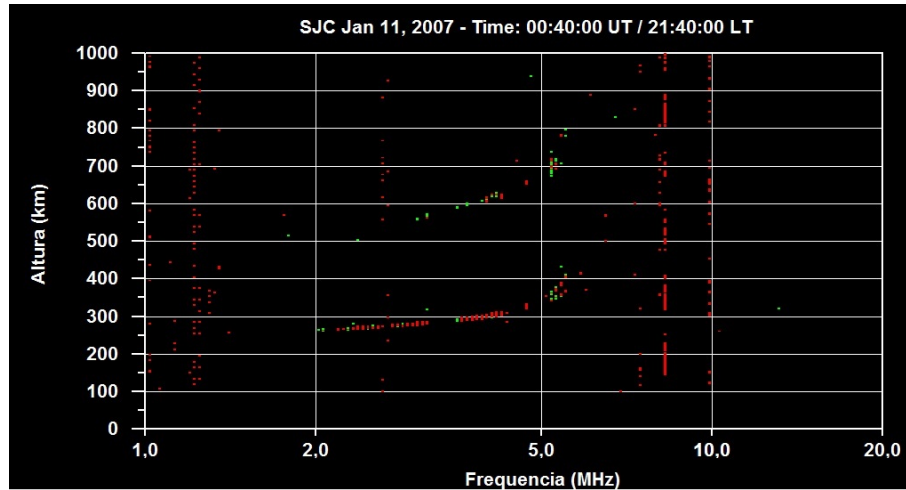


Figura 6.6 - Exemplo de um ionograma completo, arquivo md4, da ionossonda digital em SJC em uma noite do ano de 2007.

Para visualizar, tratar e analisar os dados obtidos nas ionossondas, utiliza-se o programa UDIDA - Univap Digital Ionosonde Data Analysis, Figura 6.7. A partir dos ionogramas e reduzindo, nomenclatura utilizada para a análise dos dados, encontrou-se os valores da altitude da base e do pico da camada F. Com eles pode-se deduzir a altitude da emissão OI 630,0 nm para cada local de observação e para cada horário ao longo do período noturno estudado. Este valor é o utilizado na segunda parte de nosso trabalho para realizar a linearização das imagens dos foômetros imageadores e obtermos um segundo valor da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma e comparar este com o primeiro obtido em condições de altitude da camada com valor fixo.

Na Figura 6.8 apresenta-se a tela do programa UDIDA onde usou-se a opção “Redução de dados”, para entrar na sub-rotina onde escolhidos os dados registrados desse dia/noite procedemos a determinar os valores da altitude da base e do pico da camada F, frequência de cortes, e outros. Em nosso caso estamos interessados em obter o valor e variação da

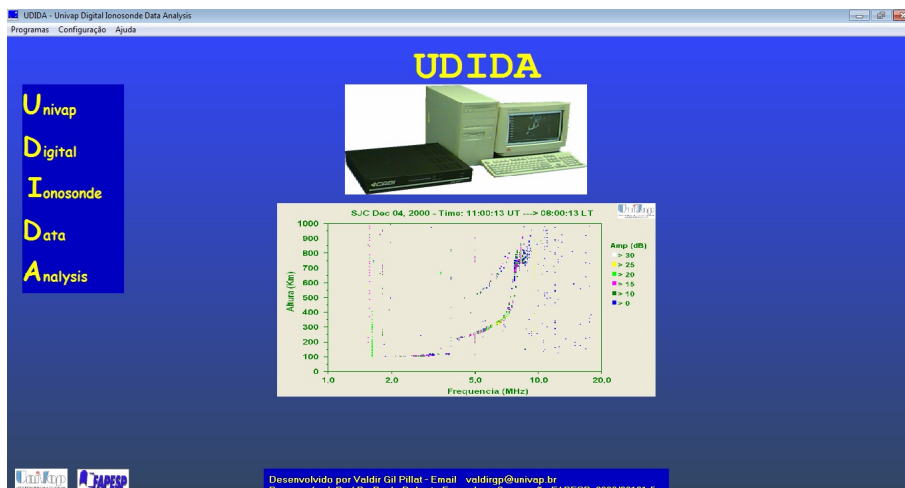


Figura 6.7 - Interface da tela inicial do programa UDIDA, programa utilizado para análise dos dados coletados pelas ionossondas digitais CADI e em nosso caso para calcular o valor da altitude da base da camada F emissora do OI 630,0 nm. Este valor dinâmico ao longo da noite nos permite fazer uma correção mais real na linearização dos dados coletados dos fotômetros imageadores.

altitude da base da camada F para fazer a linearização das imagens obtidas no fotômetro imageador ao longo da noite em estudo e assim termos valores mais precisos e reais da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma dessa noite.

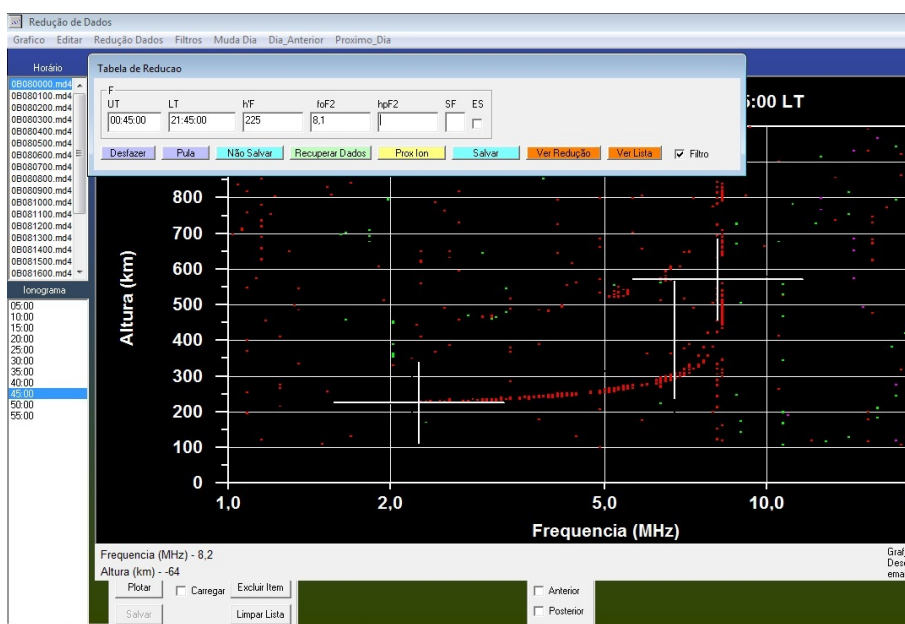


Figura 6.8 - Tela com um ionograma onde se deduz os parâmetros característicos da camada F ionosférica, em nosso caso estamos interessados na altitude de base da camada, $h'F$, que aparece na janela respectiva com o valor de 225 km. Este valor será empregado na linearização das imagens do fotômetro imageador para esta noite e horário.

Os campos ou janelas que aparecem na Figura 6.8 e são referentes aos valores dos parâmetros ionosféricos obtidos na sub-rotina do programa UDIDA são:

UT - Universal Time, Hora Universal de Greenwich; **LT** - Local Time, Hora Local, em nosso caso $UT = LT + 3 \text{ h}$; **h'F** - altura da base da camada ionosférica F; **FoF2** - frequência crítica ou máxima na camada ionosférica F; **hpF2** - altura de pico na camada ionosférica F; **SF** - spread F, espalhamento ionosférico.

6.2 Análise de Dados

No trabalho foi monitorado o aparecimento de bolhas de plasma ionosféricas no período de 2006 a 2010, período de extrema baixa atividade solar, a fim de obter e caracterizar a velocidade de deriva zonal com que elas se propagam.

Identificou-se as noites de ocorrência de bolhas através das imagens obtidas com os fotômetros imageadores localizados em São José dos Campos - SJC (23,21°S, 45,86°O, dip latitude 18,95°S) região de baixa latitude e Palmas - PAL (10,28°S, 48,33°O, dip latitude 6,65°S), região equatorial. A Figura 6.9 mostra duas imagens no filtro de interferência OI 630,0 nm obtidas às 23:37:10 e 23:43:30 da noite de 23 de fevereiro de 2007 em SJC, na qual verifica-se claramente a presença de bolhas de plasma ionosférico através das regiões obscuras da imagem em bandas com alinhamento aproximado na direção norte-sul propagando-se no sentido oeste-leste. A Figura 6.10 reproduz situação similar para a noite de 16 de agosto de 2009 em PAL, com aproximadamente 29 minutos de intervalo, 00:38:02 e 01:07:51, e a presença de irregularidades de plasma ionosférico de grande escala, bolhas (estruturas escuras) e alinhamento na direção quase norte-sul com o campo magnético.

As duas imagens em PAL apresentam nas suas estruturas de depleções de plasma ionos-

férico um aspecto ligeiramente diferente do que em SJC. Em SJC (Figura 6.9 - painéis superiores) mostra um padrão de estrutura fina e única na região equatorial que abre e desenvolve-se em ramificações na medida em que propaga-se para baixas latitudes, em quanto que as estruturas espaciais das irregularidades em PAL (Figura 6.10 - painéis superiores) exibem padrões lineares sem ramificações que, a partir do equador, (próximo ao centro da figura), desenvolvem-se para as baixas latitudes de ambos os hemisférios. Isto é característico das observações em baixas latitudes, SJC onde as bolhas já tem se desenvolvido, e na região equatorial, PAL onde elas são geradas.

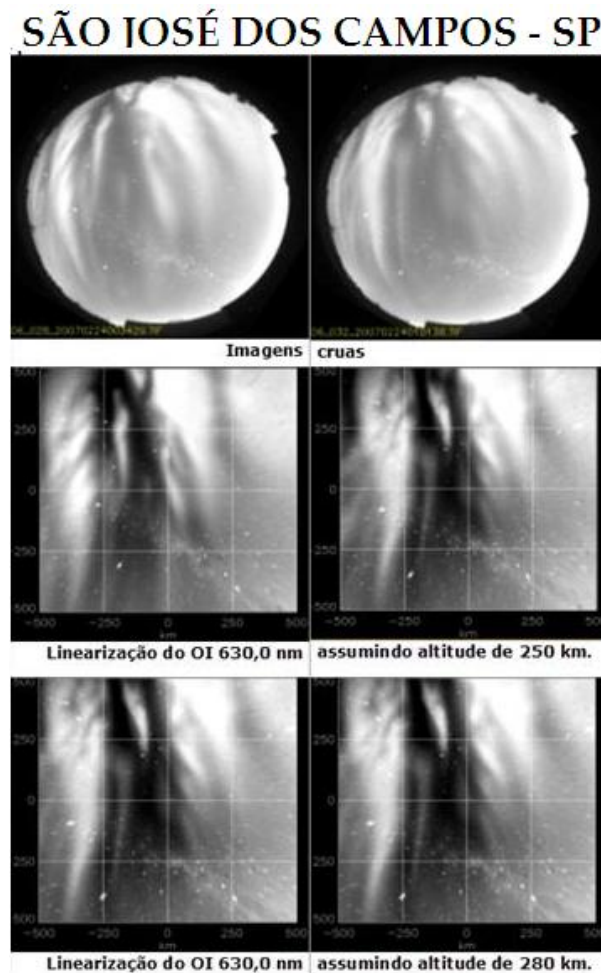


Figura 6.9 - Imagens em OI 630,0 nm obtidas no fotômetro imageador em São José dos Campos no dia 23 de fevereiro de 2007; hora local 00:34:29 (painéis esquerdos) e 01:01:38 (painéis direitos). Painéis superiores imagens cruas, painéis centrais imagens linearizadas a uma altitude de 250 km e painéis inferiores imagens linearizadas a 280 km, ambas com áreas de 1000 km x 1000 km.

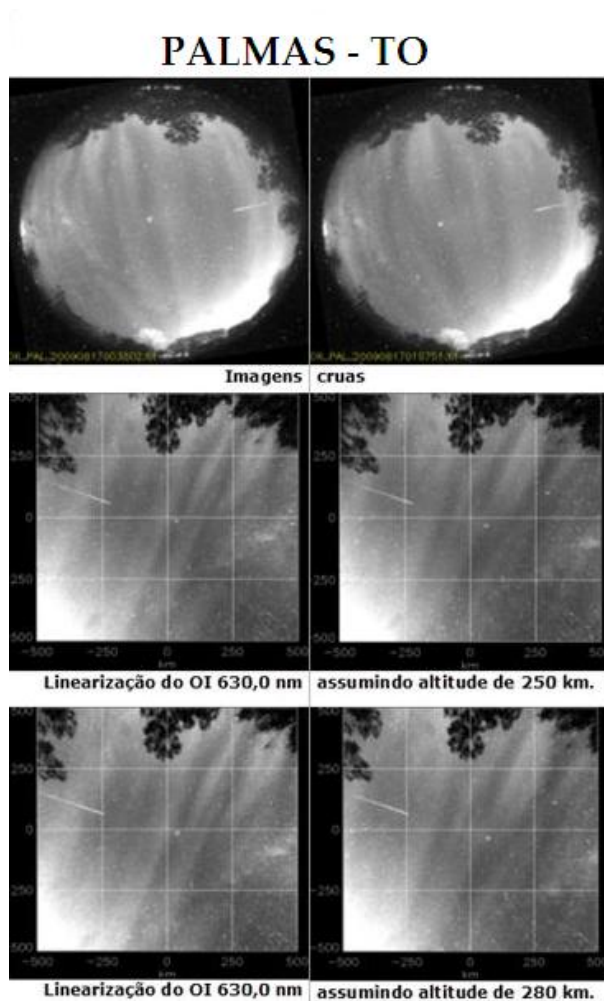


Figura 6.10 - Imagens de OI 630,0 nm obtidas no fotômetro imageador em Palmas no dia 16 de agosto de 2009. Hora local 00:38:02 (painéis esquerdos) e 01:07:51 (painéis direitos). Painéis superiores imagens cruas, painéis centrais imagens linearizadas a uma altitude de 250 km e painéis inferiores imagens linearizadas a 280 km, ambas com áreas de 1000 km x 1000 km.

As imagens cruas ou primárias vistas nos painéis superiores são por definição distorcidas, curvadas e comprimidas nas suas bordas (região onde o ângulo de elevação é baixo), e insufladas no centro ou zênite (ângulo de elevação 90°), devido ao efeito não linear da lente olho de peixe do fotômetro imageador (GARCIA et al., 1997). Portanto, para qualquer análise quantitativa, estas imagens devem ser primeiramente linearizadas para remover estas distorções. Para calcular os valores das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma (direção oeste-leste) nas diferentes noites selecionadas e em função da hora local, temos que definir uma altitude onde esta emissão e as bolhas de plasma acontecem e

transformar as imagens cruas em imagens com uma grade linear, utilizando o método de linearização próprio do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP, baseado e descrito em (GARCIA et al., 1997); (PIMENTA et al., 2001); (PIMENTA, 2003); (ABALDE et al., 2004); (SOUBHIA et al., 2004); (FREITAS, 2007) e (ABALDE et al., 2009). A escolha desta altitude de emissão é importante, pois ela define o tamanho e posição das irregularidades linearizadas e conseqüentemente afeta o valor das velocidades que estaremos calculando. Os painéis centrais e inferiores das Figuras 6.9 e 6.10 mostram exemplos das imagens linearizadas (1000 km x 1000 km de área), extraída a partir dos campos de observação primários mostrados na parte superior das respectivas figuras, assumindo duas altitudes diferentes de pico de emissão do OI 630,0 nm em 250 km e 280 km.

6.3 Dados Observacionais

Para o cálculo da velocidade zonal das bolhas de plasma da região F, foram analisados dados disponíveis das observações com fotômetro imageador em SJC e PAL. As imagens obtidas por este instrumento óptico, apresentam uma intensidade relativa que é proporcional ao número de fótons emitidos neste comprimento de onda por unidade de volume e num tempo de integração fixado em 120 segundos (FREITAS, 2007) e conseqüentemente diretamente relacionado com a densidade eletrônica de plasma.

Os dados analisados entre os anos de 2006 a 2010, correspondentes a um período de extrema baixa atividade solar, permitiram selecionar 9 noites com períodos em que a presença de bolhas de plasma foram claras e nítidas para cada um dos observatórios. Este dados foram analisados e realizado os cálculos das velocidades de deriva zonal para duas metodologias: altitude fixa e altitudes variáveis.

6.3.1 Análise dos dados do fotômetro imageador de São José dos Campos

Para as observações feitas em SJC, a Tabela 6.1 enumera as nove noites selecionadas, a data das noites escolhidas, a estação do ano, o período de operação, o número de imagens capturadas, a hora inicial e final das bolhas observadas e o número de bolhas diferentes analisadas no intervalo. A citada Tabela 6.1 indica a noite analisada através do período que estende-se do entardecer à madrugada do dia seguinte.

Tabela 6.1 - Evento, data, estação do ano, período de operação, número de imagens capturadas, horário inicial e final da ocorrência de bolhas de plasma registradas e número de bolhas diferentes analisadas pelo fotômetro imageador no Observatório do Campus Urbanova da UNIVAP, na cidade de São José dos Campos - SP, Hora local (HL)

Evento	Data	Estação	Per. Oper.	Nº ima- gens	Per. Analis.	Nº bo- lhas
1	23-24/11/2006	Primavera	21:00-03:46	60	22:35-00:38	1
2	11-12/01/2007	Verão	19:55-04:00	72	23:47-00:21	1
3	23-24/02/2007	Verão	21:30-04:53	66	22:31-00:06	3
4	01-02/04/2008	Equinócio	18:45-01:34	53	00:47-01:34	2
5	20-21/12/2009	Verão	21:55-04:25	50	22:03-22:43	1
6	07-08/02/2010	Verão	19:45-00:14	35	21:36-00:14	5
7	08-09/02/2010	Verão	19:45-01:04	41	21:45-00:40	3
8	09-10/03/2010	Equinócio	19:24-00:34	40	20:52-00:34	4
9	11-12/03/2010	Equinócio	19:23-02:16	46	20:18-23:53	4

O mozaico, Figura 6.11 mostra a primeira imagem com bolhas de plasma para cada um dos nove eventos ou nove noites analisadas em SJC. Cada imagem é um horário diferente o primeiro em que nessa noite observamos claramente e com nitidez os contornos das bolhas de plasma que acompanhamos no campo de visão do fotômetro imageador. Cada uma das imagens tem as quatro linhas vermelhas correspondentes aos cortes de linearização realizados para obter o valor da velocidade de deriva zonal no cálculo a cada intervalo de aproximadamente oito minutos ao longo da noite com a presença das bolhas. O método

calcula a velocidade para cada um dos cortes e registra estes valores e sua média; este valor médio final é utilizado para gerar o gráfico da Figura 6.12.

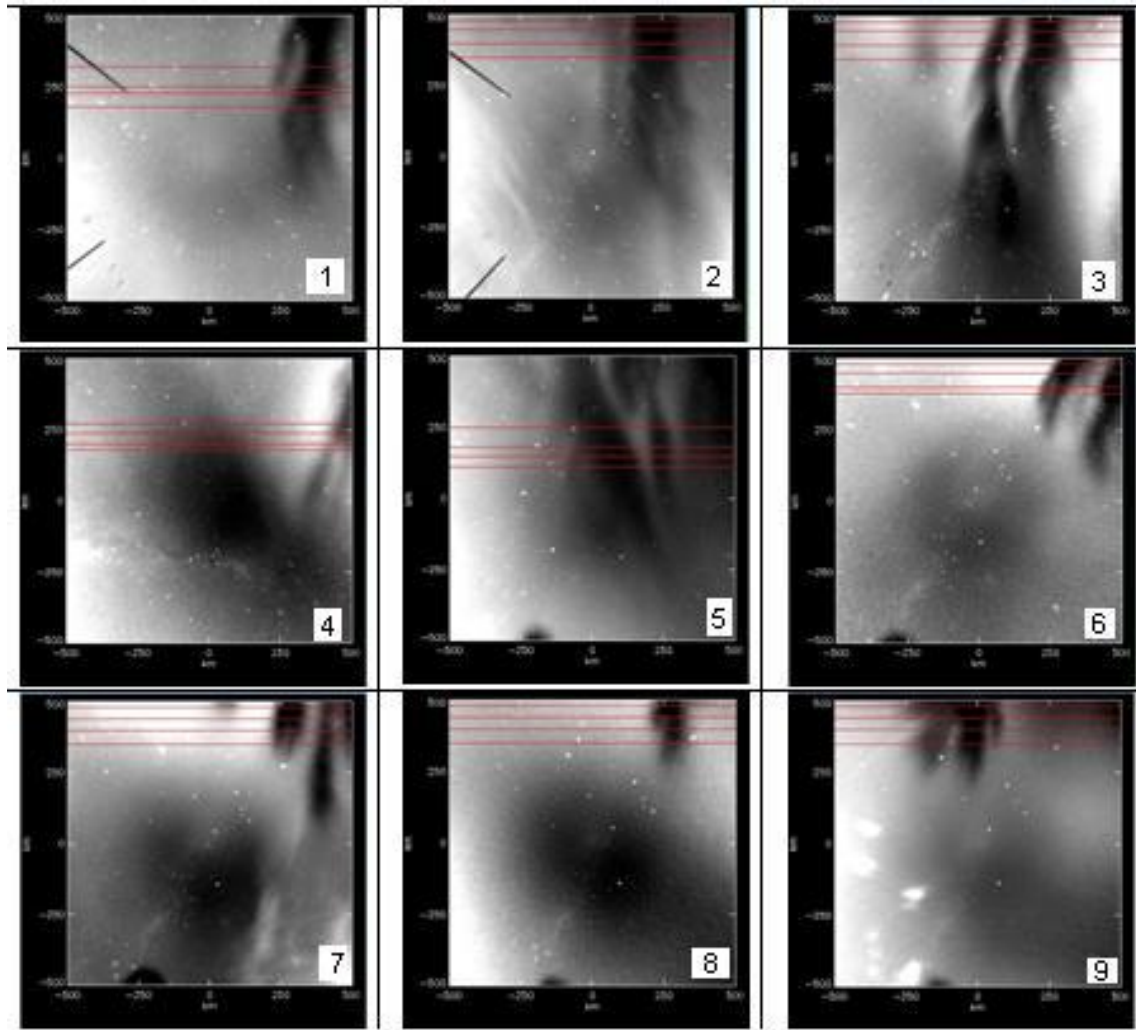


Figura 6.11 - Mozaico com uma imagem linearizadas para cada evento analisado em São José dos Campos. Pode-se observar, em cada uma das imagens, a presença de bolhas de plasma e os respectivos quatro cortes (linhas na cor vermelha) para os cálculos da médias de velocidades de deriva zonal de plasma. Observatório situado na anomalia magnética equatorial sul.

A Figura 6.12 mostra graficamente os valores das velocidades de deriva zonal calculados nos períodos em que observamos a presença de bolhas de plasma nas nove noites escolhidas em SJC e considerando uma altitude de emissão fixa em 280 km. Em cada noite e a interrupção na linha do gráfico representa a troca da bolha em análise; os períodos em branco e a falta de bolhas ou o ocultamento das mesmas por nuvens.

A Figura 6.13 traz os gráficos das velocidades de deriva zonal para oito noites analisadas em SJC na metodologia de altitude variável. No caso do Evento 5 não foi possível o cál-

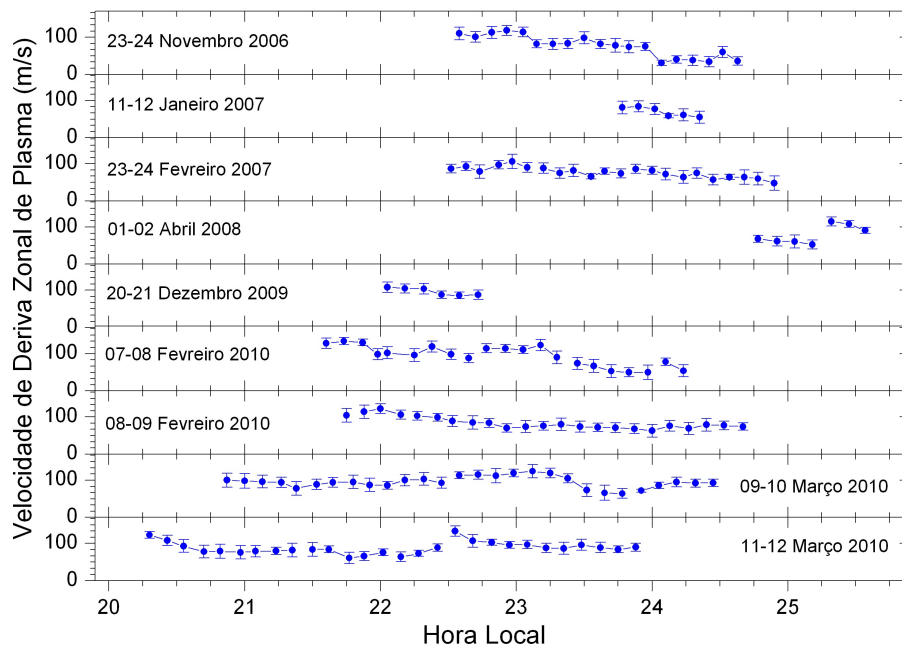


Figura 6.12 - Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de São José dos Campos - SP, para nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura fixa da base da camada ionosférica F de 280 km.

culo dos valores nesta modalidade devido a que os ionogramas para essa noite e período apresentam-se com espalhamentos persistentes, o que dificulta o cálculo do valor da altitude da camada ionosférica.

Nos Eventos 1, 2 e 5 considera a trajetória de uma única bolha de plasma no decorrer da noite. A bolha analisada apresenta-se sempre a mais de uma hora do início das observações e período de operação do imageador. O cálculo em altitude fixa mostrou-se com velocidade de deriva decrescente, e com a metodologia de altitude variável o comportamento foi similar, ou seja decrescente, com valores ligeiramente superiores para dois dos três eventos citados. No Evento 5 não foi possível fazer a análises com altitude variável, houve problemas para extrair o parâmetro da altitude por causa da presença de espalhamentos nos ionogramas

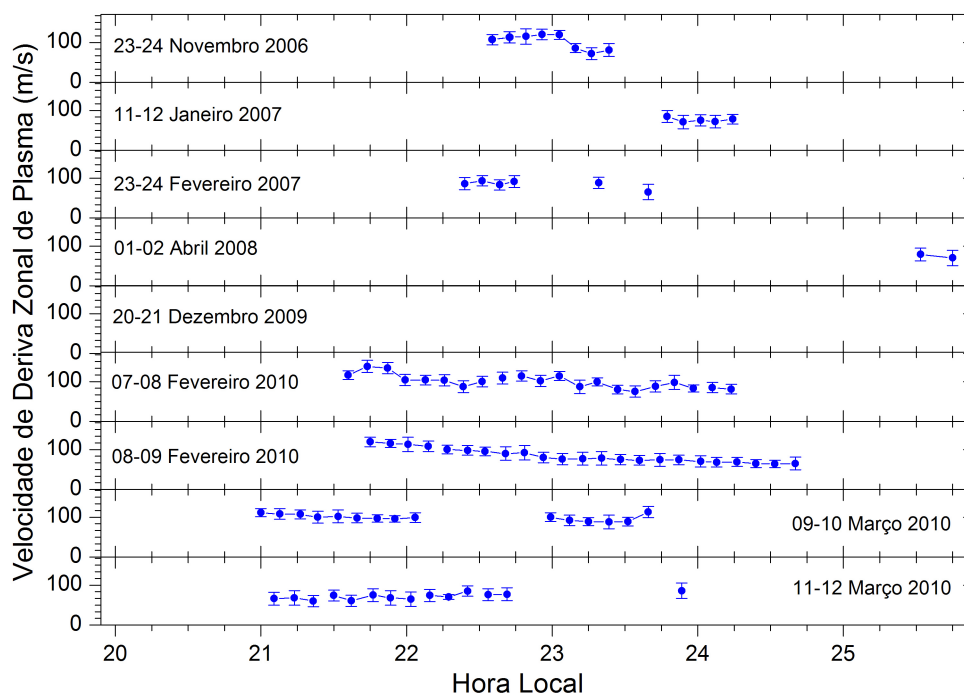


Figura 6.13 - Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de São José dos Campos - SP, para oito das nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura variável acompanhando a dinâmica temporal da base da camada ionosférica F, a partir dos ionogramas coletados pela ionossonda CADI que opera nesse mesmo observatório

analisados para essa noite. As bolhas presentes encontravam-se no zenite de observação e afetaram a qualidade dos dados registrados pela ionossonda digital que operava em conjunto com o fotômetro imageador em SJC.

Os Eventos 3 e 7, com três bolhas diferentes analisadas no período, os Eventos 8 e 9 com quatro bolhas o Evento 4 com duas bolhas e o Evento 6 com 5 bolhas apresentam comportamento semelhantes.

As Tabelas 6.2 e 6.3 apresentam os valores das velocidades de deriva zonal com altitude fixa e variável respectivamente para cada um dos nove eventos analisados. No caso da Tabela 6.3 temos uma sétima coluna indicando os valores médios da altitude variável con-

siderada, este valor é obtido a partir dos ionogramas da ionossonda digital que opera simultaneamente com o fotômetro imageador no observatório.

Tabela 6.2 - Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma para as nove noites de São José dos Campos selecionadas, calculadas para uma altitude fixa de 280 km.

Evento	Data	Estação	Mín. [m/s]	Máx. [m/s]	Média [m/s]
1	23-24/11/2006	Verão	31	118	75
2	11-12/01/2007	Verão	55	84	70
3	23-24/02/2007	Verão	48	106	77
4	01-02/04/2008	Equinócio	53	115	80
5	20-21/12/2009	Verão	86	108	97
6	07-08/02/2010	Verão	50	134	92
7	08-09/02/2010	Verão	63	114	83
8	09-10/03/2010	Equinócio	64	124	95
9	11-12/03/2010	Equinócio	61	133	88
-	Médias	-	31	134	84

Tabela 6.3 - Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma e altitude média da base da camada ionosférica F considerada no cálculo com altitude variável, para as oito noites de São José dos Campos selecionadas.

Evento	Data	Estação	Mín. [m/s]	Máx. [m/s]	Méd. [m/s]	Alt. Méd. [km]
1	23-24/11/2006	Verão	72	120	99	281
2	11-12/01/2007	Verão	71	85	76	285
3	23-24/02/2007	Verão	65	93	84	255
4	01-02/04/2008	Equinócio	70	79	75	216
5	20-21/12/2009	Verão	-	-	-	-
6	07-08/02/2010	Verão	75	138	100	251
7	08-09/02/2010	Verão	64	119	84	221
8	09-10/03/2010	Equinócio	88	115	100	255
9	11-12/03/2010	Equinócio	60	86	72	230
-	Médias	-	60	138	86	249

Na Tabela 6.4 apresentamos as médias das deriva de velocidades zonal do plasma para ambas as metodologias (atitude fixa e variável) e, como já foi dito, observa-se que os valores calculados para altitude variável são ligeiramente maiores em seis das oito noites; nos

Eventos 4 e 9 a tendência se inverte.

Tabela 6.4 - Velocidades médias de deriva zonal das bolhas de plasma da camada ionosférica F para as nove noites de São José dos Campos, calculadas para altitudes fixa e variável.

Evento	Data	Estação	Média fixa [m/s]	Média var. [m/s]
1	23-24 Nov. 2006	Verão	75	99
2	11-12 Jan. 2007	Verão	70	76
3	23-24 Fev. 2007	Verão	77	84
4	01-02 Abr. 2008	Equinócio	80	75
5	20-21 Dez. 2009	Verão	97	-
6	07-08 Fev. 2010	Verão	92	100
7	08-09 Fev. 2010	Verão	83	84
8	09-10 Mar. 2010	Equinócio	95	100
9	11-12 Mar. 2010	Equinócio	88	72
-	Médias	-	84	86

6.3.2 Análise dos dados do fotômetro imageador de Palmas

A Tabela 6.5 define as características dos nove eventos enumerados, observados em PAL, noites, estação do ano, período em que o fotômetro operou nessa noite, número de imagens que ele coletou, hora inicial e final das observações e número de bolhas analisadas em cada uma das noites. O período da noite analisada abrange do entardecer à madrugada do dia seguinte.

O mozaico, Figura 6.14, contém um exemplo das imagens linearizadas e seus respectivos cortes de linearização para o cálculo da velocidade deriva zonal (linhas na cor vermelha), para cada uma das nove noites que foram analisadas em Palmas; as imagens corresponde ao primeiro horário de cada noite analisada.

A Figura 6.15, ilustra os gráficos com o cálculo das velocidades de deriva zonal de plasma, com altitude fixa, a cada oito minutos aproximadamente para cada um dos períodos nas nove noites analisadas em Palmas.

Tabela 6.5 - Evento, data, estação do ano, período de operação, número de imagens capturadas, horários inicial e final das observações e a quantidade de diferentes ocorrências de bolhas de plasma registradas pelo fotômetro imageador no Observatório do Campus da ULBRA, na cidade de Palmas-TO, Hora local (HL)

Evento	Data	Estação	Per. Oper.	Nº ima- gens	Per. Analís.	Nº bo- lhas
1	09-10/10/2007	Equinócio	18:55-04:42	68	21:06-22:24	3
2	15-16/12/2007	Verão	23:15-04:55	40	23:23-02:18	3
3	11-12/01/2008	Verão	21:15-05:02	54	23:54-01:22	1
4	12-13/02/2008	Verão	22:50-05:23	46	22:58-00:34	1
5	04-05/03/2008	Equinócio	19:00-03:24	56	23:25-00:44	2
6	13-14/03/2008	Verão	23:35-05:33	42	23:52-31:39	3
7	24-25/12/2008	Verão	19:31-03:19	63	23:55-01:03	1
8	16-17/08/2009	Equinócio	19:02-02:30	61	23:53-02:23	3
9	17-18/11/2009	Verão	23:02-04:13	42	23:10-00:10	2

Abaixo temos os graficos das variações da velocidade de deriva zonal de plasma durante os períodos de observação para as quatro noites analisadas em Palmas, calculadas a partir de altitudes variáveis, Figura 6.16. Em cinco das nove noites originalmente selecionadas, Eventos 4 a 8, não foi possível o cálculo nesta metodologia pela presença de espalhamentos em frequência e em altitude nos ionogramas do período.

Nos Eventos 1, 2, 6 e 8 considera a trajetória de três bolhas de plasma no decorrer da noite; nos Eventos 3, 4 e 7 uma única bolha; e nos Eventos 5 e 9 duas bolhas. Para cada uma das bolhas analisadas, em altitude fixa, a velocidade de deriva zonal mostrou-se, em geral, decrescente. Uma primeira excessão foi na terceira bolha do Evento 1 em que o valor calculado apresenta-se oscilante no cálculo com altitude fixa, nesse período não foi possível obter valores na metodologia de altitude variável. Também, no Evento 3 a velocidade de deriva zonal da única bolha analisada é ligeiramente crescente no final do período em ambos os cálculos (altitude fixa e variável).

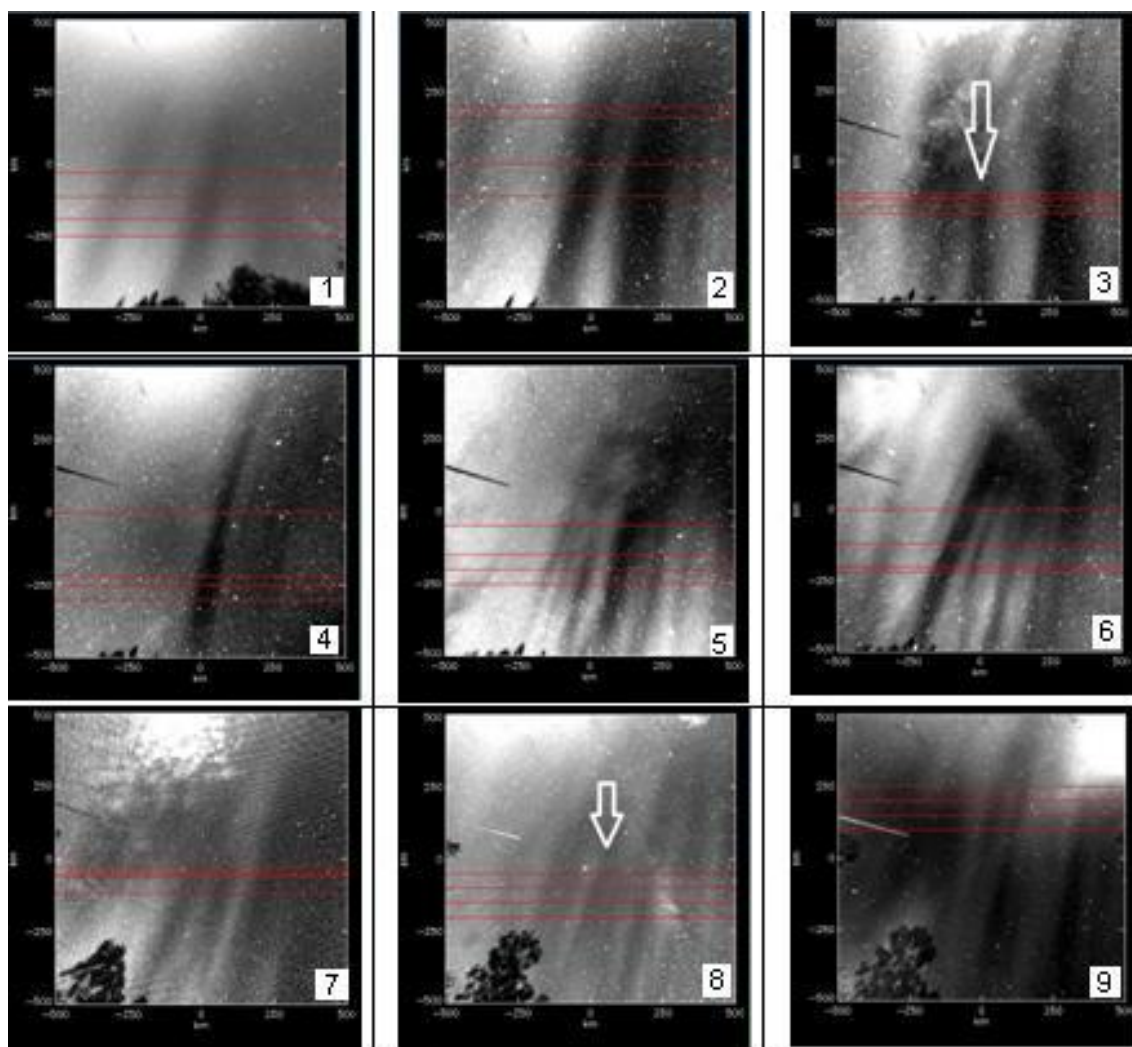


Figura 6.14 - Mozaico com as imagens linearizadas para cada uma das nove noites analisadas em Palmas, observatório próximo ao equador magnético.

A Tabela 6.6, contém os valores calculados das velocidades de deriva zonal: máxima, mínima e média, para cada uma das nove noites analisadas em PAL, com altitude fixa de 280 km. São calculadas o valor de quatro velocidades (quatro cortes no perfil de densidade das bolhas de plasma) para cada intervalo ou período de aproximadamente oito minutos ao longo da noite selecionada. Foram calculados as velocidades médias para cada intervalo e os valores mínimo, máximo e médio para cada noite.

A Tabela 6.7, mostra os valores das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma e as altitudes médias da camada ionosférica calculadas para quatro das nove noites em que

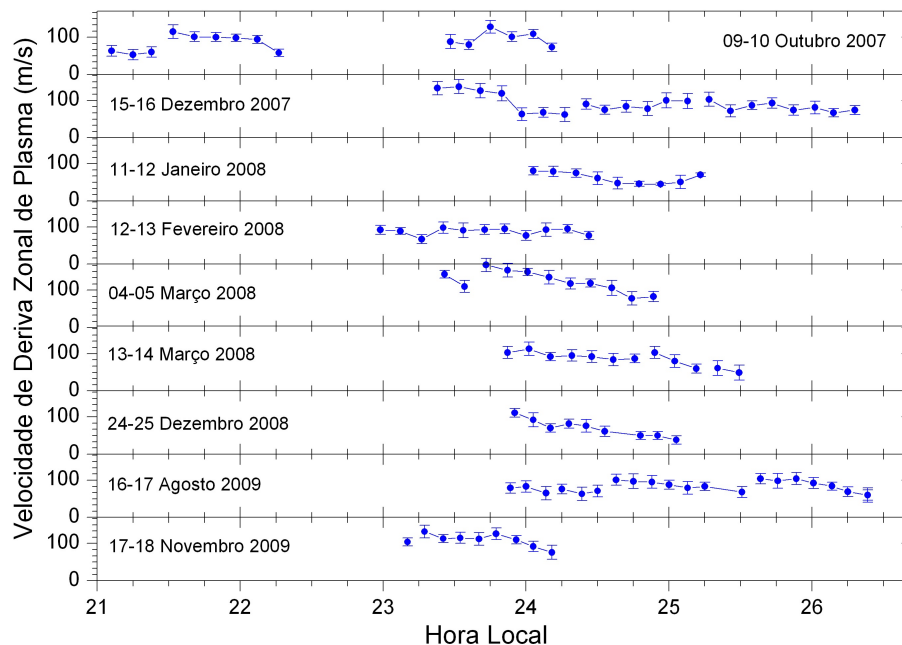


Figura 6.15 - Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador no observatório de Palmas - TO, para nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura fixa da base da camada ionosférica F de 280 km.

Tabela 6.6 - Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma para as nove noites de Palmas selecionadas, para altura fixa.

Evento	Data	Estação	Mín. [m/s]	Máx. [m/s]	Média [m/s]
1	09-10/10/2007	Equinócio	53	128	89
2	15-16/12/2007	Verão	62	137	90
3	11-12/01/2008	Verão	45	81	62
4	12-13/02/2008	Verão	67	98	88
5	04-05/03/2008	Equinócio	78	168	124
6	13-14/03/2008	Equinócio	49	113	85
7	24-25/12/2008	Verão	48	111	71
8	16-17/08/2009	Equinócio	60	104	83
9	17-18/11/2009	Verão	76	132	109
-	Média	-	45	168	89

foi possível fazer a análises com altitude variável para os dados obtidos no observatório em PAL.

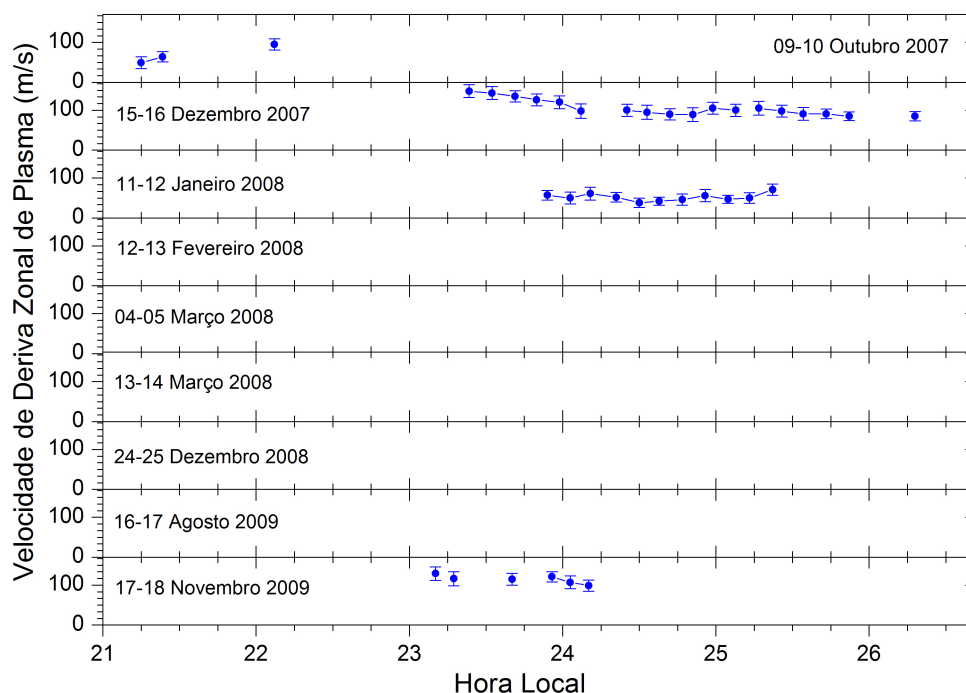


Figura 6.16 - Velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma ionosférico obtido com os dados do fotômetro imageador, para quatro das nove noites de céu limpo selecionadas no período de 2006 a 2010, extrema baixa atividade solar. Valores calculados para uma altura variável acompanhando a dinâmica temporal da base da camada ionosférica F, a partir dos ionogramas coletados pela ionossonda CADI em operação conjunta com o fotômetro no observatório de Palmas - TO

A Tabela 6.8, contém as médias do cálculos das velocidades de deriva zonal realizados com altitude fixa e variável. Das quatro noites com ambos os valores, duas tem velocidades em altitude fixa maior do que em altitude variável, Eventos 1 e 3; nos outros dois casos, Eventos 2 e 9, os resultados são opostos.

Tabela 6.7 - Velocidade mínimas, máximas e médias de deriva zonal das bolhas de plasma e altitude média da base da camada ionosférica F considerada no cálculo com altitude variável, para as quatro noites de Palmas selecionadas.

Evento	Data	Estação	Mín. [m/s]	Máx. [m/s]	Méd. [m/s]	Alt. Méd. [km]
1	09-10/10/2007	Equinócio	49	95	70	245
2	15-16/12/2007	Verão	85	148	106	214
3	11-12/01/2008	Verão	38	71	52	219
4	12-13/02/2008	Verão	-	-	-	-
5	04-05/03/2008	Equinócio	-	-	-	-
6	13-14/03/2008	Equinócio	-	-	-	-
7	24-25/12/2008	Verão	-	-	-	-
8	16-17/08/2009	Equinócio	-	-	-	-
9	17-18/11/2009	Verão	99	129	115	207
-	Médias	-	38	148	85	221

Tabela 6.8 - Velocidades médias de deriva zonal das bolhas de plasma da camada ionosférica no caso de nove noites calculadas para altitude fixa e quatro noites em altitude variável. Observatório de PAL, próximo ao equador magnético.

Evento	Data	Estação	Média fixa [m/s]	Média var. [m/s]
1	09-10 Out. 2007	Equinócio	89	70
2	15-16 Dez. 2007	Verão	90	106
3	11-12 Jan. 2008	Verão	62	52
4	12-13 Fev. 2008	Verão	88	-
5	04-05 Mar. 2008	Equinócio	124	-
6	13-14 Mar. 2008	Equinócio	85	-
7	24-25 Dez. 2008	Verão	71	-
8	16-17 Ago. 2009	Equinócio	83	-
9	17-18 Nov. 2009	Verão	109	115
-	Médias	-	89	85

6.4 Resultados e Discussões

Na análise das 09 noites selecionadas em São José dos Campos, para altura fixa de 280 km, as médias mínima e máxima das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma estudadas foram de 57 ± 15 m/s e 116 ± 7 m/s respectivamente, e a média das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma foi de 84 ± 18 m/s, Tabela 6.2 . No cálculo com altura variável foi possível fazer em 08 das nove noites e os valores das velocidades de

deriva zonal foram: mínima 70 ± 11 m/s, máxima 105 ± 7 m/s e a velocidade média 87 ± 12 m/s, Tabela 6.3. Na análise dos ionogramas das 08 das nove noites em que foi possível definir o valor da altura de base da camada ionosférica F os valores obtidos entre 212 km e 313 km, com um valor médio da altura de 249 ± 12 km, sempre inferior ao adotado para o cálculo da primeira parte, com altura fixa, que foi adotado o valor de 280 km, Tabela 6.3.

Em Palmas e para um grupo de também de 09 noites com a presença de bolhas ionosféricas escolhidas com dados de boa qualidade, possível de fazer a análise adequada de definição das bordas das bolhas e posterior cálculo da velocidade de deslocamento transversal ou zonal, direção oeste-leste, os valores mínimo e máximo, em iguais condições, foram 58 ± 10 m/s, e 119 ± 6 m/s respectivamente, e a velocidade média de deriva zonal de 89 ± 13 m/s, Tabela 6.6. No cálculo da segunda parte do análise para PAL, cálculo com altura variável da base da camada ionosférica, foi possível em 04 das nove noites, os valores da velocidade de deriva foram: mínima 68 ± 9 m/s, máxima 111 ± 5 m/s e valor médio da velocidade de 85 ± 10 m/s, Tabela 6.7. Neste caso os valores da altura variável, calculados a partir da análise dos ionogramas da ionossonda operando em Palmas, variaram entre um mínimo de 202 km e um máximo de 249 km, valor médio da altura da camada ionosférica F para Palmas nessas quatro noites analisadas de $221 \text{ km} \pm 6 \text{ km}$. O valor da altura fixa adotado para os dados de PAL também foi de 280 km, Tabela 6.7.

As médias máxima e mínima nas velocidades de deriva zonal obtidas neste estudo que abrange os anos de 2006 até 2010, período de extrema baixa atividade solar, são similares para ambos os pontos de observação, São José dos Campos - SP e Palmas - TO, considerando altura fixa de 280 km ou quando auxiliados pelos dados de ionossonda re-fazendo estes para altura variável da camada ionosférica, acompanhando sua dinâmica temporal de modo a ter um valor mais real, ver Tabela 6.4 para SJC e Tabela 6.8 para

PAL.

Os valores obtidos neste trabalho para a velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma em SJC são claramente inferiores aos calculados durante os anos 2000 e 2001, um período de alta atividade solar, por (ABALDE et al., 2004). Em (ABALDE et al., 2004) as velocidades de deriva zonal média máxima e mínima em SJC para emissão de OI 630,0 nm é de 185 ± 10 m/s, e 104 ± 18 m/s, respectivamente, para uma altitude de pico de emissão fixa em 300 km, e média máxima e mínima de 172 ± 2 m/s, e 89 ± 15 m/s, respectivamente, para uma altitude da base de emissão variável entre 250 km e 300 km; ajuste este obtido com dados de ionossonda digital da altura virtual mínima, $h'F$, e uma correção de 0,834 da altitude virtual de $foF2$, $hpF2$.

A diferença nos valores calculados e apresentados em neste trabalho e os de (ABALDE et al., 2004) pode ser justificada pela diferente altitude de pico de emissão escolhida em ambos trabalho; no estudo do período de 2006 a 2010 foi de 280 km e no período de 2000 e 2001 foi de 300 km. O aumento no valor deste parâmetro pode levar a obter maiores valores na velocidade de deriva de plasma, mais não justifica totalmente o alto incremento dos valores encontrados. Assim, podemos deduzir que o valor da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma na média é menor no período de extrema baixa atividade solar, apresentado neste trabalho, respeito ao período de alta atividade solar para o setor brasileiro estudado.

Uma leitura atenta dos valores das velocidades de deriva zonal do plasma para o estudo com altura da base da camada ionosférica F fixa, gráficos nas Figuras 6.12 para SJC e 6.15 para PAL, ou no estudo com altura variável, gráficos nas Figura

(PAULINO et al., 2011) mostraram que as velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma observadas, em São João do Cariri-PB($7,4^\circ$ S, $36,5^\circ$ O; dip. lat. - 11° S), durante o período de alta atividade solar, setembro de 2000 a dezembro de 2002, são maiores do

que as observadas durante o período de baixa atividade solar, janeiro de 2006 a abril de 2007. Os valores apresentados neste trabalho são inferiores aos obtidos para SJC e PAL. Os valores médios de (PAULINO et al., 2011) são menores que 80 m/s, poucas noites as velocidades de deriva apresentam-se maiores que 100 m/s e a maioria delas valores de 15 m/s a 60 m/s entre as 22:00 as 23:00 horas. Diferente deste trabalho (PAULINO et al., 2011) afirmam que em São João do Cariri a velocidade de deriva das bolhas de plasma no sentido leste incrementa das 18:00 às 22:00 horas para logo desacelerar e parar próximo à meia noite.

No trabalho de (ARRUDA et al., 2006) relatam o cálculo teórico e experimental da velocidade de deriva zonal de plasma ionosférico na região brasileira, estação de Cachoeira Paulista (22,5° S, 45,0° O; Dip. lat. 31,5° S), “localizada perto da região central da Anomalia do Atlântico Sul”. Em 138 noites observadas, 29 com a presença de bolhas, no período de outubro de 1998 a agosto de 2000 e uma altitude considerada de 250 km, as velocidades de deriva são da ordem de 150 m/s. As velocidades encontradas apresentam o mesmo comportamento decrescente ao longo da noite, do entardecer à meia noite; comportamento este também encontrado com o modelo teórico HWM-93 empregado no cálculo do vento zonal. “A velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma foi, em geral, menor durante as noites de primavera do que as do verão, porque durante esta última estação o gradiente de pressão produzido pelo aquecimento das ondas EUV solares é maior, consequentemente, os ventos neutros podem ser mais intensos resultando em velocidades zonais maiores”. Os valores obtidos são próximos de (ABALDE et al., 2004) e confirmam o comportamento de a velocidade de deriva ser maior em alta atividade solar em respeito a baixa atividade solar.

Das noites analisadas para ambos os observatórios e dos valores obtidos as velocidades de deriva zonal de plasma, no estudo com altitude fixa e variável, houve resultados semelhantes em ambas às condições, equinócios de primavera e verão. As velocidades de deriva

zonal de plasma na emissão OI 630,0 nm observadas na região brasileira de baixas latitudes são significativamente menores das reportadas por (MENDILLO et al., 1982), (SOBRAL; ABDU, 1990), (SOBRAL; ABDU, 1991), (SOBRAL et al., 1999), e inferiores às apresentadas por (TAYLOR; JAHN, 1997), (SANTANA D. C.; TAYLOR, 2001), (OTSUKA et al., 2002), e (PIMENTA, 2003). Isto pode ser justificado, e como já exposto, pela escolha da altitude de emissão para OI 630,0 nm assumida no trabalho, tanto para altitude fixa em 280 km e para os valores calculados com altitude variável, que são inferiores aos escolhidos nos trabalhos citados. (PIMENTA, 2003) relataram que “se a altitude emissão OI 630,0 nm é considerada como 300 km, em vez de 250 km, as velocidades de deriva de plasma aumentará cerca de 20%”, ou seja, as velocidades de deriva de plasma aumentará cerca de 20% para cada 50 km no aumento em altura na altitude de pico de emissão assumida. Além disso, esta diferença pode ser atribuída, em alguns casos, para as diferentes latitudes magnéticas dos locais de observação. Resultados recentes têm mostrado que o plasma, na vizinhança da anomalia equatorial ionosférico, podem ter uma maior velocidade de deriva zonal do que seria de esperar para a referida à vizinhança da região equatorial (KIL et al., 2000), (IMMEL et al., 2003), (MARTINIS et al., 2003).

Outro fator a considerar e que já foi citado é o período de observação apresentado. As variações noturnas observadas das velocidades de deriva zonal de plasma inferidas a partir da emissão OI 630,0nm, isto é, diminuição dos valores nas primeiras horas do anoitecer para a meia-noite e madrugada, são semelhantes às descritas por (WOODMAN, 1972), (MALCOLM et al., 1984), (FEJER et al., 1985), (SOBRAL; ABDU, 1991), (TAYLOR; JAHN, 1997), (SOBRAL et al., 1999), (OTSUKA et al., 2002) e (PIMENTA, 2003). Além disso, as variações noturnas observadas são ligeiramente inferiores às velocidades dos ventos neutros zonal relatados por (SAHAI et al., 1992) da região de baixa latitude no Brasil, para essas épocas embora com uma década de diferença. Para o nosso caso e comparado com (ABALDE et

al., 2004), do qual temos os períodos das noites observadas na média nossos horários são mais tardios e conseqüentemente as velocidades obtidas devem ser menores, considerando seu comportamento decrescente ao longo da noite.

7 CONCLUSÃO

Tendo por base de estudo dados da detecção das bolhas de plasma ionosféricas por meio de um fotômetro imageador operando com filtro de interferência na linha vermelha do oxigênio atômico OI 630 nm em São José dos Campos-SP (23,21°S; 45,86°O; dip latitude 18,95°S) e Palmas-TO (10,28°S; 48,33°O; dip latitude 6,65°S), e perfis da base da camada ionosférica obtidos a partir de ionossondas digitais CADI, localizadas nos mesmos observatórios, calculou-se as velocidades de deriva zonal das bolhas em duas condições: altitude fixa de emissão e altitude variável. Os dados analisados foram as noites dos anos de 2006 a 2010, período de extrema baixa atividade solar (F10.7 média = 73); das 31 noites com bolhas encontradas foram analisadas 18, 9 noites em SJC-SP e 9 noites em PAL-TO, não coincidentes.

Para deduzir o valor da altitude da camada ionosférica ao longo da noite em estudo, para o cálculo da velocidade de deriva zonal com altitude variável, utilizou-se de dados coletados pelas ionossondas digitais, instaladas em ambos os observatórios. Não foi possível esta análise para as 18 noites, feitas em altitude fixa, pois devido a presença das bolhas de plasma no zênite no momento de observação, ocorre espalhamentos nos ionogramas, como já comentado no Capítulo 6. Extraímos as altitudes variáveis para 12 noites, 8 noites em SJC-SP e 4 noites em PAL-TO, com semelhanças nos resultados obtidos, sendo que, para altitude variável na maioria das noites, tivemos velocidades de deriva zonal ligeiramente menores quando comparadas as encontradas em altitude fixa.

Através dos dados obtidos observou-se que, o valor da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma são similares para ambos os observatórios e regiões; percebeu-se um pequeno aumento no valor da velocidade calculada quando à altitude variável estava sendo considerada, para SJC; em PAL as velocidades foram similares para ambos os

casos, mas nas duas condições o valor da velocidade sempre tinha um comportamento decrescente no decorrer da noite, valores congruentes com os apresentados na literatura. As velocidades maiores no início da noite, momento da sua geração na base da camada ionosférica, diminuem conforme a bolha se eleva na altitude na região equatorial e se espalha ao longo das linhas do campo magnético para regiões de baixa e média latitude.

Os principais resultados são apresentados a seguir:

- 1) A velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma em altitudes de emissão fixa, 280 km, os valores mínimo, máximo e médio, para as nove noites observadas de céu limpo em São José dos Campos, são 57 ± 15 m/s, 116 ± 7 m/s e 84 ± 18 m/s respectivamente.
- 2) Para o cálculo com altitude variável, oito das nove noites de SJC analisadas, os valores mínimo, máximo e médio 70 ± 11 m/s, 105 ± 7 m/s e 87 ± 12 m/s, respectivamente.
- 3) Para altitude fixa, 280 km, as velocidades de deriva zonal mínimo, máximo e médio nas nove noites de céu limpo observadas em Palmas, foram de 58 ± 10 m/s, 119 ± 6 m/s e 89 ± 13 m/s respectivamente.
- 4) Para emissão de altitude variável as velocidades de deriva zonal médias máxima e mínima, para as quatro noites analisadas em Palmas, são de 68 ± 9 m/s e 111 ± 5 m/s e valor médio da velocidade de 85 ± 10 m/s.
- 5) As velocidades médias da deriva zonal das bolhas de plasma neste período de extrema baixa atividade solar, anos 2006 a 2010, são inferiores aos observados no período de alta atividade solar, anos de 2000 e 2001 ([ABALDE et al., 2004](#)), para SJC; anos 2006 e 2007 ([PAULINO et al., 2011](#)), para São João do Cariri; anos

1998 a 2000 (ARRUDA et al., 2006), em Cachoeira Paulista.

- 6) Os valores menores da velocidade de deriva zonal no período de extrema baixa atividade solar podem ser parcialmente explicados devido a que, as bolhas aparecem em horas mais tardias que as observadas nas noites de alta atividade solar e seu comportamento decrescente ao longo da noite.

Sendo um dos primeiros trabalhos na análise das velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma se faz necessário outros estudos com um número maior de eventos e em outras regiões de baixa e média latitude para confirmar a tendência dos valores encontrados.

Trabalhos complementares para o estudo dos fatores geradores das irregularidades ionosféricas de grande escala se fazem necessários para uma correta compreensão e enumeração dos mesmos e assim podermos entender melhor a dinâmica aqui apresentada.

Observações ópticas com fotômetros imageadores e de rádio com ionossondas digitais, equipamentos de GPS, riômetros e radares estão se tornando cada vez mais acessíveis e importantes para uma melhor compreensão da dinâmica da ionosfera e do acoplamento termosfera-ionosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALDE, J.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.; BECKER, F. G.; BITTENCOURT, J.; PILLAT, V.; LIMA, W.; CANDIDO, C.; FREITAS, T. de. Day-to-day variability in the development of plasma bubbles associated with geomagnetic disturbances. **J. Geophys. Res.**, **114(A4)**, A04304, 2009, 2009. [95](#)

ABALDE, J. R.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; PILLAT, V. G. Height-resolved ionospheric drifts at low latitudes from simultaneous *oi* 777,4 nm and *oi* 630,0 nm imaging observations. **Journal of Geophysics research**, vol. **109**, A11308, doi:10.1029/2004JA010560, 2004, 2004. [71](#), [78](#), [95](#), [109](#), [110](#), [112](#), [114](#)

ABDU, M. A. Coupling and energetics of the equatorial ionosphere-thermosphere system: advances during step period. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.61, p. 153-165, 1999. [67](#)

_____. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamic relevant to spread f. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 63, p.869-884, 2001. [67](#)

ARANHA, S. L. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia), **ESTUDO DE ONDAS PLANETÁRIAS NA IONOSFERA EM BAIXAS LATITUDES E REGIÃO EQUATORIAL**. São José dos Campos: [s.n.], 2006. [43](#), [46](#)

ARANTES, E. **Ciência Natureza-Tempo e Clima**. Rio de Janeiro, RJ: Time Life, Abril Livros Ltda, 1995. [34](#), [52](#)

ARRUDA, D. C. S.; SOBRAL, J. A.; ABDU, M. A.; CASTILHO, V. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A. Theoretical and experimental zonal drift

velocities of the ionospheric plasma bubbles over the brazilian region. **Advanced in Space Research (a COSPAR publication)**, 2006. 110, 115

BALAN, N.; BAILEY, G. J.; ABDU, M. A.; OYAMA, K. I.; RICHARDS, P. G.; MCDUGALL J. BATISTA, I. S. Equatorial plasma fountain and its effects over three location: evidence for additional layer, the f3 layer. **Journal of Geophysical Research**, v.102, no. A2, p.2047-2056, 1997. 51

BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**. New York, Academic Press: Parte A, 1973. 46

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the f3 layer over fortaleza, brazil. **J. Atmosf. Phys.**, v.64, n. 12, p.1409-1412, 2002. 51

CHIAN, S. C.-L.; REUSCH, M. F. **Física de Plasma**. Niterói- RJ, Universidade Federal Fluminense: vol 3, ed. Preliminar, 1979. 54

FAGUNDES, P. R.; KLAUSNER, V.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; ABALDE, J. R. Seasonal and solar cycle dependence of f3 - layer near the southern crest of the equatorial ionospheric anomaly. **Advances in Space Research**, 48, 472-477, 2011. 51

FEJER, B. G.; KUDEKI, E.; FARLEY, D. T. Equatorial f region zonal plasma drifts. **J. Geophys. Res.**, 90(A12), 12249-12255, 1985. 29, 111

FRANCISCO, R. G. Mestrado em Física e Astronomia, **Estudo estatístico da ocorrência do Spread-F na região brasileira em função do ciclo solar**. 2003. 45

FREITAS, T. de. Dissertação de Mestrado em Física e Astronomia, **Determinação da densidade eletrônica no pico da camada F ionosferica utilizando as imagens na Emissão do OI 777,4 nm**. 2007. 106 p. 81, 95

GARCIA, F. J.; TAYLOR, M. J.; KELLEY, M. C. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. **Applied optics/ vol. 36, No. 29/ 10 October 1997**, 1997. [94](#), [95](#)

GRELLMANN, E. A. Relatório final de projeto de iniciação científica (PIBIC/CNPq/INPE, **Estudos da emissões óticas da alta atmosfera na região anomalia magnética do atlântico sul**. INPE: [s.n.], 2005. [33](#)

HARGREAVES, J. K. **The upper atmosphere and solar- Terrestrial Relations**. Berkshire: Van Nostrand Reinhold Company, 1979. [48](#), [49](#)

IMMEL, T. J.; MENDE, S. B.; FREY, H. U.; PETICOLAS, L. M. Determination of low latitude plasma drift speeds from fuv images. **Geophy. Res. Let.**, **30(18)**, 1945, [doi:10.1029/2003GL017573](#), 2003. [111](#)

JESUS, R. d. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia), **Estudos de eventos do tempo espacial (“Space Weather”) e a ocorrência de bolhas de plasma ionosféricos no setor brasileiro e japonês usando sondagem ionosférica**. São José dos Campos: [s.n.], 2008. 84 p. [46](#), [48](#), [49](#), [77](#)

KELLEY, M. C. **The Earth’s Ionosphere - Plasma Physics Eletrodynamics**. School of Electrical Engineering Cornell University, Ithaca, New York: International Geophisics Series, vol 43, 1989. [64](#), [66](#), [67](#)

KIL, H.; KINTNER, P. M.; DEPAULA, E. R.; KANTOR, I. J. Global positioning system measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at cachoeira paulista in brazil. **J. Geophys. Res.**, **105(A3)**, **5317-5327**, 2000. [111](#)

KOHL, H.; RUSTER, R.; SCHLEGEL, K. Modern ionospheric science. **European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau, FRG**, 1996. [50](#)

MALCOLM, R.; MILES, C.; TINSLEY, B. A. Field-aligned observation of trans-equatorial bubbles from rarotonga in 1969-70. **Geophys. Res. Lett.**, **11**, 665-668, 1984. [111](#)

MARTINIS, C.; ECCLES, J. V.; BAUMGARDNER, J.; MANZANO, J.; MENDILLO, M. Latitude dependence of zonal plasma drifts obtained from dual-site airglow observations. **J. Geophys. Res.**, **108(A3)**, 1129, doi:10.1029/2002JA009462, 2003. [111](#)

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; SPENCE, H. Airglow imaging studies of natural and artificially induced ionospheric disturbances. **AFGL - TR -82-0075**, Hanscom AFB, Boston, 1982. [70](#), [111](#)

MITRA, S. K. **The upper atmosphere of radio. Physics and Eletronics.** Calcutta: University College of Science, 1952. [48](#), [50](#), [74](#), [77](#)

MOOR, L. P. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia), **ESTUDO DAS IRREGULARIDADES IONSFÉRICAS DA REGIÃO F DURANTE UM PERÍODO DE ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA.** São José dos Campos: [s.n.], 2011. 158 p. [53](#)

OSSAKOW, S. L.; ZALESK, S. T.; MCDONALD, B. E.; CHATURVEDI, P. K. Nonlinear equatorial spread f: Dependence on altitude of the f peak and bottomside background electron density gradient scale lenght. **Journal of Geophysical Research**, **v.84, no. A1, p.17-29**, 1979. [29](#)

OTSUKA, Y.; K., S.; OGAWA, T. Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions. **Geophy. Res. Let.**, **29(15)**, 10.1029/2002GL015347, 2002. [111](#)

PAULINO, I.; FRAGOSO, A. M. d.; F., A.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; GOBBI, D. Plasma bubble zonal drift characteristcs observed by

airglow images over brazilian tropical region. **Brasilian Journal Geophysics** **29(2):239-246**), 2011. [109](#), [110](#), [114](#)

PILLAT, V.; ABALDE, J. R.; FAGUNDES, P. R. Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p 1691 - 1698, **Programa para análise de imagens dos fotômetros imageadores: UASDA - Univap All Sky Data Analysis**. São José dos Campos: [s.n.], 2009. [85](#), [87](#)

PILLAT, V. G. Dissertação de Mestrado em Física e Astronomia, **Estudo da Ionosfera em Baixas Latitudes Através do Modelo Computacional Lion e Comparação com Parâmetros Ionosféricos Observados**. 2006. [41](#), [43](#), [50](#), [56](#)

PILLAT, V. G.; FAGUNDES, P. R. Univap digital ionosonde analisys. **Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 8.**, São José dos Campos, Out. 2004 - INIC 2004, Univap, 2004. [78](#)

PIMENTA, A. A. Doutorado em Geofísica, **Estudos da deriva zonal e dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical**. 2003. [38](#), [57](#), [65](#), [95](#), [111](#)

PIMENTA, A. A.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; GOBBI, D.; MEDEIROS, A. F.; TAYLOR, M. J.; TAKAHASHI, H. Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using oi 630 nm all-sky imaging systems. **Adv. Space Res.**, **27(6/7)**, 1219-1224, 2001, 2001. [95](#)

RISHBETH, H. Thermospheric winds and the f-regions: A review. **Journal of Thermospheric and Terrestrial Physics**, v.34, p-1-47, 1972. [37](#)

RISHBETH, H.; GARRIOT, O. K. Introduction to ionospheric physics. **International Geophysics Series**, v.14, Academic Press, New York, 1969. [50](#), [54](#)

SAHAI, Y.; TAKAHASHI, H.; FAGUNDES, P. R.; CLEMESHA, B. R.; TEIXEIRA, N. R.; BITTENCOURT, J. A. Observations of thermospheric neutral winds at 230 s. **Planet. Space Sci.**, **40(6)**, 767-773, 1992. [111](#)

SANTANA D. C., S. J. H. A. T. H.; TAYLOR, M. J. Optical studies of the ionospheric irregularities over the brazilian region by nocturnal images of the oi 630 nm emission. **Adv. Space Res.**, **27(6/7)**, 1207-1212, 2001. [111](#)

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A. Latitudinal gradient in the plasma bubble zonal velocities as observed by scanning 630-nm airglow measurements. **J. Geophys. Res.**, **95(A6)**, 8253-8257, 1990. [111](#)

_____. Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by airglow scanning photometers. **J. Atmos. Terr. Phys.**, **53(8)**, 729-742, 1991. [111](#)

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; SAWANT, H.; ZAMLUTTI, C. J.; BORDA, G. L. Solar geomagnetic activity effects on nocturnal zonal velocities of ionospheric plasma depletions. **Adv. Space Res.**, **24(11)**, 1507-1510, 1999. [64](#), [111](#)

SOUBHIA, B.; ABALDE, J.; FAGUNDES, P. Determinação do campo elétrico vertical associado à deriva zonal do plasma ionosférico. 2004. [95](#)

STEPHAN, W.; COLERICO, M.; MENDILLO, M.; REINISCH, B.; ANDERSON, D. Suppression of equatorial spread f by sporadic e. **J. Geophys. Res.**, v. **107**, n. **A2**, p.1021, 2002. [66](#)

TASCIONE, T. **Introduction to the space environment**. Flórida: Malabar, 1988. [48](#), [49](#)

TAYLOR, M. J.; JAHN, J. M. S. fukao and a. saito, possible evidence of gravity wave coupling into the mid-latitude f region ionosphere during the seek campaign. **J.**

Geophys. Res., **24(13)**, **1699-1702**, 1997. [111](#)

TINSLEY, B. A.; CHRISTENSEN, A. B.; BITTENCOURT, J.; GOUVEIA, H.;
ANGREJI, P. D.; TAKAHASHI, H. Excitation of oxygen permitted line emissions in
the tropical nightglow. **J. Geophys. Res.**, **vol. 78, NO. 7**, 1973. [60](#)

WOODMAN, R. F. East-west ionospheric drifts at the magnetic equator. **Space
Research XII**, **969-974**, 1972. [111](#)