



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DE ASSINATURAS DE OSCILAÇÕES DE ESCALA  
PLANETÁRIA NA TERMOSFERA-IONOSFERA EQUATORIAL

DIEGO BARROS SILVA

CAMPINA GRANDE – PB  
AGOSTO/2013

DIEGO BARROS SILVA

ESTUDO DE ASSINATURAS DE OSCILAÇÕES DE ESCALA  
PLANETÁRIA NA TERMOSFERA-IONOSFERA EQUATORIAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física, em cumprimento ao requisito exigido para a obtenção do título de Mestre em Física.

Orientadores:

Dr. Amauri Fragoso de Medeiros

Dr. Ricardo Arlen Buriti da Costa

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO/2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586e

Silva, Diego Barros.

Estudo de assinaturas de oscilações de escala planetária na termosfera-ionosfera equatorial / Diego Barros Silva. – Campina Grande, 2013.

164 f. : Color.

Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

"Orientação: Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros, Prof. Dr. Ricardo Buriti da Costa".

Referências.

1. Ondas Planetárias. 2. Termosfera. 3. Região F. 4. Ionosfera. I. Medeiros, Amauri Fragoso de. II. Costa, Ricardo Buriti da. III. Título.

CDU 551.513.11(043)

**DIEGO BARROS SILVA**

**ESTUDO DE ASSINATURAS DE OSCILAÇÕES DE ESCALA PLANETÁRIA NA  
TERMOSEFERA-IONOSFERA EQUATORIAL**

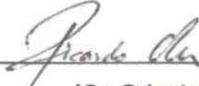
Dissertação aprovada em 19/08/2013

**BANCA EXAMINADORA**



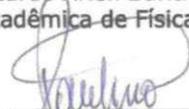
---

(Presidente)  
Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros  
Unidade Acadêmica de Física - UFCG



---

(Co-Orientador)  
Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti da Costa  
Unidade Acadêmica de Física - UFCG



---

(Membro Externo)  
Prof. Dr. Igo Paulino da Silva  
Unidade Acadêmica de Física - UFCG



---

(Membro Externo)  
Prof. Dr. Fábio do Egito Gomes  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

# AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Aos Professores Dr. Amauri Fragoso de Medeiros e Dr. Ricardo Arlen Buriti da Costa pela orientação na realização deste trabalho, bem como em toda a minha iniciação científica.

Ao Professor Dr. Igo Paulino da Silva da Unidade Acadêmica de Física – UFCG pela colaboração científica.

Às instituições de fomento CNPq e CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização do trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), em especial a Dra. Inez Staciarini Batista pelos dados coletados pela ionossonda do INPE - Fortaleza.

Aos Professores Dr. John W. Meriwether da Universidade de Clemson e Dr. Jonathan J. Makela da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign pelos dados coletados pelo interferômetro de Fabry-Perot.

Em geral, a todos familiares, amigos, professores e funcionários que contribuíram (ou não) e/ou atrapalharam, direta e/ou indiretamente, dentro e/ou fora da universidade, na estrada até aqui.

## RESUMO

Utilizando dados de dois Interferômetros Fabry-Perot localizados em Cajazeiras ( $6^{\circ} 53' 25''$  S;  $38^{\circ} 33' 19''$  O) e em São João do Cariri ( $7^{\circ} 23' 27''$  S;  $36^{\circ} 31' 58''$  O), foi possível observar a ocorrência de oscilações com períodos de dias na termosfera equatorial para o período de outubro a dezembro de 2010 e 2011. Para verificar a existência destas oscilações foram escolhidos horários fixos numa noite de observação, os dados utilizados de vento zonal e meridional são das 20 h (Hora Local – HL) às 26 h (HL), com uma resolução temporal de uma hora. Em paralelo, foram analisados dados de temperatura e de parâmetros ionosféricos hmF2 e FoF2 observados através de medidas da ionossonda localizada no INPE-Fortaleza, bem como dados de atividade magnética para os mesmo período dos dados de vento. As principais características encontradas nos campos de vento em 2010 e 2011 foram: Amplitude entre 19,76-38,78 m/s e 14,33-20,04 m/s, para dados de vento zonal e meridional, respectivamente, para o ano de 2010. Enquanto que, foram encontradas amplitude de 20,02-27,52 m/s e 17,68-23,51 m/s, para dados de vento zonal e meridional, respectivamente, para o ano de 2011. A análise dos parâmetros ionosféricos e de atividade magnética apresentou a mesma característica espectral observada nos dados de vento zonal e meridional, o que sugere um mecanismo de causa-efeito.

## ABSTRACT

Using data from Fabry-Perot interferometers located at Cajazeiras ( $6^{\circ} 53' 25''$  S;  $38^{\circ} 33' 19''$  W) and São João do Cariri ( $7^{\circ} 23' 27''$  S;  $36^{\circ} 31' 58''$  W), was possible to observe the occurrence of oscillations with periods of days in the equatorial thermosphere for the period of October, November and December from 2010 to 2011. To verify the existence of these oscillations, we have chosen two fixed hours in a night of observation, we used zonal and meridional wind data from 20 h (Local Time - LT) to 26 h (LT), with a temporal resolution of one hour. In parallel, we analyzed temperature data and ionospheric parameters of FoF2 and hmF2 observed through measurements from a ionosonde located at INPE-Fortaleza and magnetic activity for the same period of zonal and meridional wind data. The main features found for 2010 and 2011 were: Amplitude found were between 19.76-38.78 m/s and 14.33-20.04 m/s, for zonal and meridional wind data, respectively, for the year 2010. While that were found a range of 20.02-27.52 m/s 17.68-23.51 m/s, for zonal and meridional wind data, respectively, for the year 2011. The data analysis of ionospheric parameter FoF2 and magnetic activity data showed the same spectral characteristic observed in the meridional wind, which suggests a mechanism of cause and effect.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Foto da luminescência atmosférica, camada verde incandescente, tirada pela tripulação da Estação Espacial Internacional.....	18
Figura 2.2 - Espectro da luminescência atmosférica noturna.....	22
Figura 2.3 - Camadas de emissão da aeroluminescência representadas junto com o perfil vertical de temperatura.....	22
Figura 2.4 - Níveis de energia do oxigênio atômico.....	23
Figura 2.5 - Perfil vertical da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm para a cidade de São João do Cariri (07°23'27" S, 36°31'58" O) a 0 h do dia 01 de dezembro de 2010 e dia 01 de dezembro de 2011. O perfil foi gerado a partir da Equação 2.32 e os dados foram obtidos através dos modelos MSIS-E-90 e IRI-2012.....	30
Figura 3.1 - Representação do sistema de coordenadas esféricas utilizado na solução das equações do movimento da atmosfera neutra.....	35
Figura 3.2 - Dependência longitudinal do vetor $\hat{i}$ .....	37
Figura 3.3 - Representação do vetor $\vec{a}$ .....	39
Figura 3.4 - Autovalores $\gamma_n^{(\sigma,s)}$ , em função da frequência normalizada $\sigma/\Omega$ , para o número de onda zonal $s=1$ .....	48
Figura 3.5 - Modos de Hough correspondentes aos três primeiros modos para $s = 1$ .....	50
Figura 4.1 - Foto do OLAP localizado em São João do Cariri.....	51
Figura 4.2 - Ilustração esquemática dos componentes básicos de um IFP, onde pode ser visto: o <i>Sky Scanner</i> , o <i>Etalon</i> , o sistema ótico e a <i>CCD</i> .....	53
Figura 4.3 - Foto do <i>Sky Scanner</i> do IFP localizado em São João do Cariri.....	54
Figura 4.4 - Foto das Placas planas transparentes com uma superfície refletora com 77% de refletividade de um IFP.....	56

Figura 4.5 - Ilustração das múltiplas reflexões sofridas por um feixe de luz incidente no <i>Etalon</i> até ser convergido para o chip da <i>CCD</i> . Sendo $E_0$ é a amplitude da onda incidente antes de sofrer a primeira reflexão e transmissão. Conseqüentemente $E_0t^2$ , $E_0t^2r^2$ , $E_0t^2r^4$ ,... representam a amplitude dos sucessivos feixes transmitidos até a lente convergente.....	58
Figura 4.6 - Gráfico da Função de Airy fornecendo a fração da luz transmitida em função do caminho ótico $nd$ para $R=0,9$ , $R=0,5$ e $R=0,2$ .....	63
Figura 4.7 - Típica imagem capturada por um IFP.....	64
Figura 4.8 - Interferograma de uma medição do laser. Ainda da figura pode ser visto dois gráficos, um a esquerda e outro abaixo da imagem gerada pela <i>CCD</i> que mostram a integração do sinal através das linhas verticais e horizontais, respectivamente, que cortam a imagem.....	70
Figura 4.9 - Representação do vetor vento na linha de visada.....	76
Figura 4.10 - Ilustração de uma medição para uma direção do interferômetro (no topo de um <i>container</i> ) em torno do pico de emissão (250 km) do OI 630,00 nm.....	80
Figura 4.11 - Ilustração dos Setores de observação Norte, Sul e central. Onde as linhas amarelas representam as linhas de visada dos interferômetros e as linhas pretas representam as projeções das linhas amarelas no solo.....	81
Figura 4.12 - Fotografias das antenas de transmissão e recepção da ionossonda pertencentes à unidade de Fortaleza do INPE.....	90
Figura 4.13 - Série temporal dos dados de vento zonal e meridional para o ano de 2011. Foram utilizados dados de vento a) zonal e b) meridional medidos tanto no modo cardeal, como no modo volume comum na geração do gráfico.....	93
Figura 4.14 - Série temporal dos dados de: a) hmF2 (altura média da camada F2), b) h'F (altura virtual da camada F), e c) FoF2 (frequência de reflexão da camada F2) para o ano de 2011, obtidos através da ionossonda localizada no INPE - Fortaleza.....	94
Figura 4.15 - Oscilação gerada com períodos de 2, 5 e 10 dias.....	96

Figura 4.16 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....97

Figura 4.17 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. Foi retirado dados a cada 3 dia para verificar a resposta do método. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....98

Figura 4.18 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. Foram retiradas grandes quantidades de dados e de forma aleatória. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....99

Figura 5.1 - Dados de vento zonal observado entre os dias 310-330 (06-26/11) de 2010 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica volume comum.....101

Figura 5.2 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano – 2010. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....102

Figura 5.3 – Dados de vento meridional observados entre os dias 302-320 (29/10-16/11) de 2010 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica volume comum.....105

Figura 5.4 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano – 2010. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....106

Figura 5.5 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 de 2010, em torno das 20 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 10,83, 7,64 e 12,05 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....107

Figura 5.6 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 de 2010, em torno das 21 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 12,19, 8,5 e 11,88 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....108

Figura 5.7 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 de 2010, em torno das 22 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 12,27, 8,06 e 11,74 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....110

Figura 5.8 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 de 2010, em torno das 23 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 9,96, 8,42 e 11,15 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....111

Figura 5.9 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 24 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 10,01, 8,06 e 11,146 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....113

Figura 5.10 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 25 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 8,68, 8,44 e 11,61 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....114

Figura 5.11 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 26 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 8,67, 8,20 e 11,36 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....115

Figura 5.12 – Dados do índice Ap disponível no site da Universidade de Kyoto para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2010.....116

Figura 5.13 – Dados do índice Dst disponível no site da Universidade de Kyoto para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2010.....117

Figura 5.14 - Periodograma de L-S da série temporal do índice AP disponível no site da Universidade de Kyoto para o mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....118

Figura 5.15 - Periodograma de L-S da série temporal do índice Dst disponível no site da universidade de Kyoto para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....119

Figura 5.16 – Dados de vento zonal observado entre os dias 322-338 (18/11-04/12) de 2011 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica modo cardeal.....121

Figura 5.17 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano – 2011. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....122

Figura 5.18 - Dados de vento meridional observado entre os dias 338-357 (04-23/12) de 2011 observados através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica modo cardeal.....123

Figura 5.19 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano – 2011. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....124

Figura 5.20 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 20 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,6, 10,03 e 13 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....125

Figura 5.21 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 21 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,73, 9,34 e 13,5 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....127

Figura 5.22 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 22 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,69, 9,35 e 14 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....128

Figura 5.23 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 23 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,10, 9,79 e

13,75 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....130

Figura 5.24 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 24 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,74, 9,68 e 12,69 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....131

Figura 5.25 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 25 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,53, 9,03 e 12,99 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....133

Figura 5.26 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 de 2011, em torno das 26 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,25, 9,4 e 12,99 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.....134

Figura 5.27 - Periodograma de L-S da série temporal do índice AP disponível no site da Universidade de Kyoto para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....135

Figura 5.28 - Periodograma de L-S da série temporal do índice Dst disponível no site da universidade de Kyoto para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.....136

Figura 5.29 – Dados do índice Ap disponível no site da Universidade de Kyoto para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2011.....137

Figura 5.30 – Dados do índice Dst disponível no site da Universidade de Kyoto para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2011.....138

Figura 5.31 - Ilustração dos possíveis mecanismos de indução de ondas planetárias na região da MLT e de dínamo.....142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes utilizados no cálculo da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm. Onde $T$ é a temperatura neutra, $T_{el}$ a temperatura eletrônica, $t_i \equiv T_i/300$ e $T_i$ é a temperatura iônica.....	28
Tabela 3.1 - Principais modos livres propagantes para o Oeste mais comum na média e alta atmosfera, e suas nomenclaturas com $h = 10,5$ km.....	49
Tabela 4.1 - Resumo dos principais dados técnicos do IFP.....	56
Tabela 4.2 - Parâmetro da função de contagem.....	70
Tabela 4.3 - Ângulos azimutais e de elevação utilizados pelos os interferômetros localizados em Cajazeiras e São João do Cariri.....	83
Tabela 4.4 - Agrupamento dos “pretendentes” ao dado que será cálculo do vento zonal e meridional no modo volume comum.....	85
Tabela 4.5 - Escolha dados utilizados no cálculo do vento zonal e meridional no modo volume comum.....	86
Tabela 4.6 - Dados utilizados, no exemplo, para o cálculo do vento zonal e meridional no setor Norte.....	86

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. A LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA .....	15
2.1 AS PRINCIPAIS EMISSÕES DA LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA .....	19
2.2 A LINHA VERMELHA DO OXIGÊNIO ATÔMICO.....	22
2.2.1 MECANISMO DE RECOMBINAÇÃO DISSOCIATIVA.....	23
2.2.2 TAXA DE EMISSÃO VOLUMÉTRICA .....	24
3. ONDAS NA ATMOSFERA.....	30
3.1 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS ONDAS ATMOSFÉRICAS.....	30
3.1.1 EQUAÇÕES PRIMITIVAS EM UMA ESFERA EM ROTAÇÃO .....	33
3.2 MÉTODO DA PERTURBAÇÃO.....	43
3.3 MODOS NORMAIS .....	46
4. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA .....	50
4.1 O OLAP .....	50
4.2 O INPE – FORTALEZA.....	51
4.3 O INTERFERÔMETRO FABRY-PEROT.....	51
4.3.1 O SKY SCANNER.....	52
4.3.2 O ETALON .....	54
4.4 GERAÇÃO DE INTERFERÊNCIA.....	56
4.5 DESLOCAMENTO DOPPLER .....	64
4.6 DESLOCAMENTO BROADENING.....	65
4.7 ANÁLISE DOS ANÉIS.....	67
4.8 TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO.....	73
4.8.1 MODO CARDEAL .....	74
4.8.2 MODO VOLUME COMUM.....	79
4.9 TRATAMENTO DOS DADOS DO IFP .....	83
4.10 IONOSSONDA .....	87
4.11 METODOLOGIA .....	89
4.12 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS.....	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99

5.1 RESULTADOS.....	99
5.1.1 DADOS DE VENTO TERMOSFÉRICO - 2010 .....	99
5.1.2 DADOS DE VENTO TERMOSFÉRICO - 2011 .....	118
5.2 DISCUSSÕES.....	137
6. CONCLUSÕES .....	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
APÊNDICE A - ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS.....	155

# 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de ondas de escala planetária na mesosfera-termosfera-ionosfera vem sendo estudada por vários autores através de medidas de radar meteorológico, radar MF, radar de espalhamento incoerente, fotômetro e ionossonda operando em diferentes regiões do globo terrestre (e. g. CHEN, 1992; FORBES, 1992, 1995 e 1996; FORBES et al., 1995; FORBES e ZHANG, 1997; LASTOVICKA, 1997; JACOBI, 1998; ALTADILL et al., 1998, 2004; BORRIES et al., 2002; TAKAHASHI et al., 2002, 2012, 2013; ALTADILL e APOSTOLOV, 2003; LASTOVICKA et al., 2003, 2006; LIMA, 2004; FAGUNDES et al., 2005; ABDU et al., 2006; LIMA et al., 2006 e 2011; POGORELTSEV et al. 2007; PEDATELLA et al., 2009; ENGLAND et al., 2012 e LIU et al. 2012).

As oscilações na região F com períodos 2, 5, 6-7, 9-10 e 12-18 dias tem sido atribuídas à atividade de ondas planetárias. Embora alguns mecanismos tenham sido propostos (ver Forbes et al. (1995), Forbes (1996) e Pancheva e Lysenko (1988)), a maneira com que ondas planetárias conseguem se propagar para as regiões mais altas da atmosfera terrestre ainda continua desconhecida. A grande questão é que ondas planetárias não são capazes de se propagar acima de, aproximadamente, 110 km de altura, como demonstrou Pogoreltsev et al. 2007.

Oscilações com períodos de dias na região da anomalia de ionização equatorial têm sido relacionados a variações nos ventos na região E que, através do mecanismo de dínamo, geram oscilações no campo elétrico equatorial.

Lastovicka et al. (2003) menciona em seu trabalho que os picos mais evidentes em suas análises espectrais são consistentes com os modos normais de Rossby (2, 5, 10 e 16). Outra característica importante apresentada por eles, é que oscilações próximas a 25-30 dias estão relacionadas à rotação do Sol e período entre 13-14 relacionadas à meia rotação solar.

Este trabalho tem como objetivo estudar a ocorrência de oscilações de escala planetária na termosfera equatorial brasileira utilizando dados de ventos termosféricos (vento zonal e meridional) observados através de medidas de dois Interferômetros de Fabry-Perot (IFP), localizados em Cajazeiras ( $6^{\circ} 53' 25''$  S;  $38^{\circ} 33' 19''$  O) e São João do Cariri ( $7^{\circ} 23' 27''$  S;  $36^{\circ} 31' 58''$  O) entre os meses de outubro, novembro e dezembro de 2010 e 2011. Em paralelo, tenta apontar possíveis mecanismos de geração destas oscilações.

Além da introdução, este trabalho possui mais 5 capítulos, os quais estão estruturados da seguinte forma:

- O Capítulo 2 tem como objetivo apresentar os conceitos básicos sobre a aeroluminescência atmosférica fornecendo conceitos, tais como: classificação, o que se pode estudar com a aeroluminescência, os principais mecanismos de formação e as principais emissões. Em seguida, será descrito em mais detalhes a linha vermelha do oxigênio atômico (OI 630 nm), que é a emissão estudada neste trabalho.
- O Capítulo 3 tem como objetivo fazer uma descrição teórica de ondas atmosféricas, destacando em especial a descrição matemática das ondas planetárias.
- No Capítulo 4 será descrito em detalhes o Interferômetro Fabry-Perot e a ionosfera, bem como a metodologia no cálculo dos ventos termosféricos e o tratamento dos dados desses instrumentos.
- No Capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos utilizando dados de vento obtidos através do Interferômetro, bem como as discussões dos resultados obtidos.
- Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. A LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A luminescência atmosférica ou *Airglow* é um fenômeno ótico devido à emissão de fótons pelos átomos ou moléculas excitados presentes na alta atmosfera terrestre. Chamberlain (1961) define a luminescência atmosférica como sendo uma radiação amorfa continuamente emitida pela atmosfera terrestre numa faixa espectral que se estende do ultravioleta distante até o infravermelho próximo. No entanto, esta luminescência é relativamente fraca e, normalmente, imperceptível ao olho humano. Sendo assim, faz-se necessário a utilização de instrumentos óticos capazes de observar esta luminescência. Na Figura 2.1 a luminescência atmosférica, camada verde incandescente, pode ser visto em uma foto tirada pela tripulação da Estação Espacial Internacional (EEI).

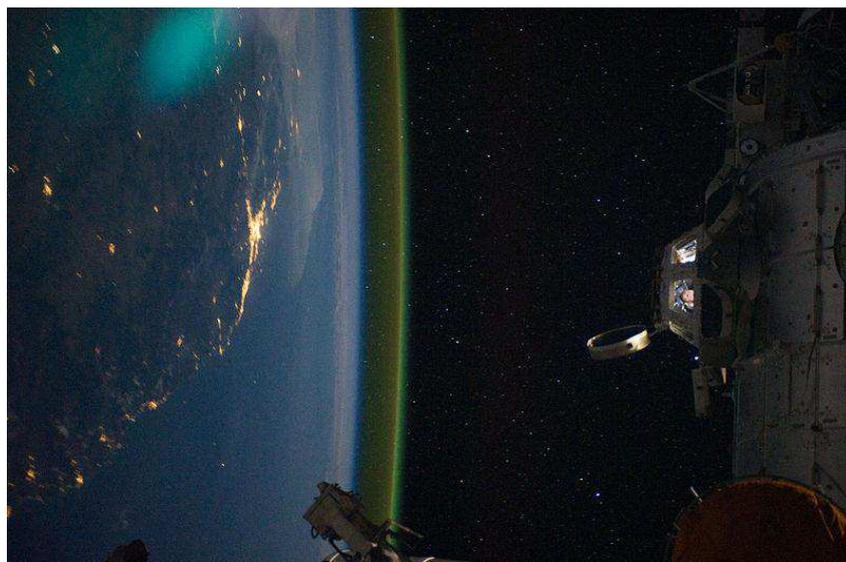


Figura 2.1 - Foto da luminescência atmosférica, camada verde incandescente, tirada pela tripulação da Estação Espacial Internacional (EEI).

Foto: Extraído de: <http://spaceflight.nasa.gov>

A luminescência atmosférica pode ser classificada de acordo com o ângulo zenital da radiação solar incidente sobre a atmosfera terrestre, podendo ser: diurna (*Dayglow*), crepuscular (*Twilightglow*) ou noturna (*Nightglow*). Medidas noturnas da luminescência são normalmente as mais utilizadas, pois a presença da radiação solar torna o espectro complexo e com uma elevada quantidade de ruí-

do. As observações da luminescência são feitas de três formas diferentes: medidas em solo, a bordo de foguetes e em satélites.

Através de medidas da luminescência atmosférica pode-se estudar:

- Processos químicos, iônicos e dinâmicos que reagem à distribuição vertical dos vários constituintes atmosféricos;
- Processos de excitação que geram emissões óticas;
- A geração e a propagação de irregularidades do plasma ionosférico;
- Processos ligados a deposição de partículas neutras energéticas na alta atmosfera;
- Ondas atmosféricas;
- Acoplamento entre a termosfera e a ionosfera.

Os principais processos na formação da luminescência atmosférica são:

- Ressonância: luz emitida no mesmo comprimento de onda absorvido, resultante da excitação pela absorção da radiação solar;
- Fluorescência: luz emitida em frequências menores que as absorvidas, também resultante da excitação pela absorção da radiação solar;
- Fotoionização: luz emitida de estados excitados de elementos ionizados pela radiação solar;
- Fotodissociação: luz emitida de estados excitados de elementos neutros dissociados pela radiação solar;

- Colisões inelásticas: luz emitida da excitação causada pelo impacto de elétrons energéticos produzidos na fotoionização;
- Quimiluminescência: luz resultante de reações químicas principalmente entre átomos de oxigênio, nitrogênio e moléculas de hidroxila. A radiação solar quebra as moléculas entre 100 e 300 km durante o dia, as quais se recombinam a noite emitindo luz;
- Excitação por raios cósmicos: radiação e partículas energéticas provenientes de fora do sistema solar que têm uma pequena contribuição na formação da luminescência atmosférica.

Usualmente utiliza-se a unidade Rayleigh (R) para especificar uma quantidade luminosa da luminescência atmosférica. Um Rayleigh corresponde à intensidade de uma fonte isotrópica de radiação que emite  $10^6$  fótons por centímetro quadrado de coluna de ar por segundo.

## **2.1 AS PRINCIPAIS EMISSÕES DA LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA**

Como já foi mencionado, a luminescência atmosférica possui uma ampla faixa de emissão espectral que se estende do ultravioleta distante até o infravermelho próximo. No entanto, as principais emissões ocorrem na faixa do visível e do infravermelho próximo.

As principais emissões são devido à:

- Molécula de OH (também chamadas de Bandas de Meinel): Possui uma camada de emissão localizada na região da mesosfera, com um pico de emissão em torno de 87 km de altura;

- Oxigênio atômico: As linhas de emissão mais importantes são a linha vermelha ( $\lambda = 630$  nm) com uma camada de emissão localizada na termosfera e com um pico de emissão em torno de 250 km de altura; e a linha verde ( $\lambda = 557,7$  nm), que possui uma camada de emissão localizada na região da mesopausa (aproximadamente 96 km de altura) e uma segunda camada de emissão localizada na termosfera (entre 250 e 300 km de altura);
- Oxigênio molecular: Na região do infravermelho a molécula de oxigênio ( $O_2$ ) é a que possui a emissão mais intensa. A camada de emissão é formada, basicamente, devido à banda (0-0) ( $\lambda = 761,9$  nm) e a banda (0-1) ( $\lambda = 864,5$  nm);
- Sódio: Possui uma camada de emissão localizada entre 80 e 120 km e uma linha de emissão com comprimento de onda de 589,3 nm.

Nas Figuras 2.2 e 2.3 pode ser visto o espectro da luminescência noturna obtida por Johnston e Broadfoot (1993) e o perfil vertical de emissão das principais camadas citadas acima, respectivamente.

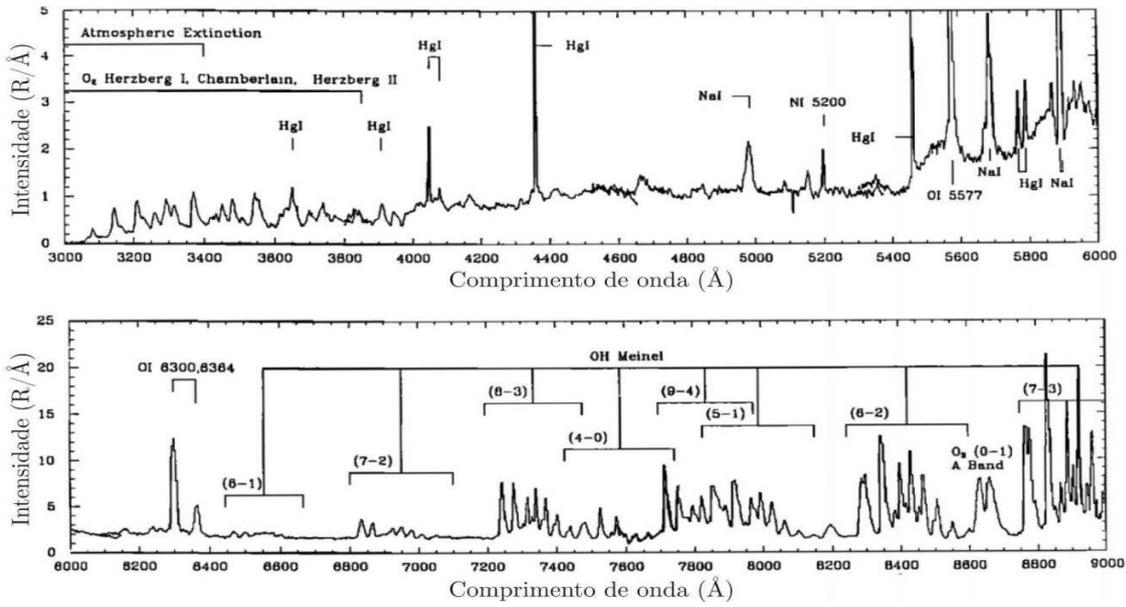


Figura 2.2 - Espectro da luminescência noturna.  
 Fonte: JOHNSTON e BROADFOOT (1993).

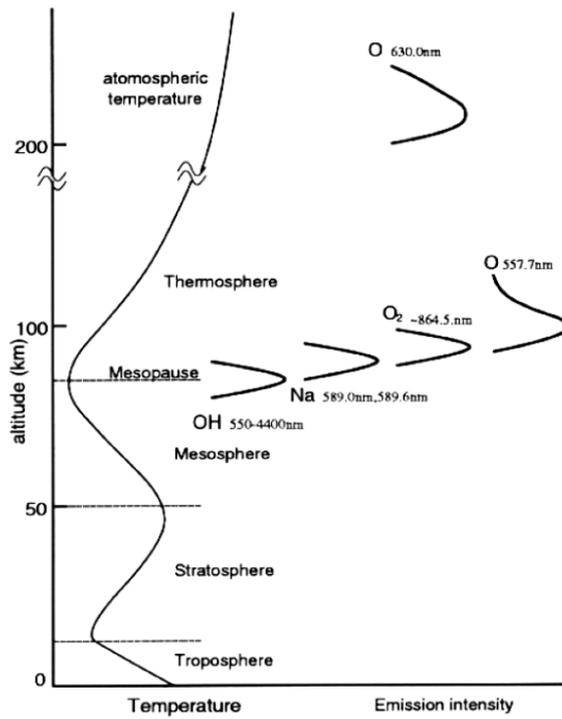


Figura 2.3 - Camadas de emissão da luminescência atmosférica representadas junto com o perfil vertical de temperatura.  
 Fonte: MAEKAWA (2000).

A seguir será descrita as principais características e os processos fotoquímicos envolvidos na linha vermelha de emissão do oxigênio atômico.

## 2.2 A LINHA VERMELHA DO OXIGÊNIO ATÔMICO

A linha vermelha de emissão, ou OI 630 nm, é produzida em uma camada emissora de aproximadamente 50 km de espessura localizada entre 240 e 300 km de altura. A intensidade do OI 630 nm aumenta, ou diminui, quando o plasma ionosférico move-se pra baixo, ou para cima, respectivamente. Desta forma, a intensidade desta emissão é mais intensa quando a densidade dos elétrons aumenta e menos intensa quando a densidade dos elétrons diminui.

A linha vermelha do oxigênio atômico é emitida pelo átomo do oxigênio excitado no estado  $O(^1D)$ , que ao decair para o estado fundamental  $^3P$ , espontaneamente, libera o excesso de energia da forma de radiação eletromagnética. A Figura 2.4 ilustra os níveis de energia do oxigênio atômico relativo a várias transições deste átomo.

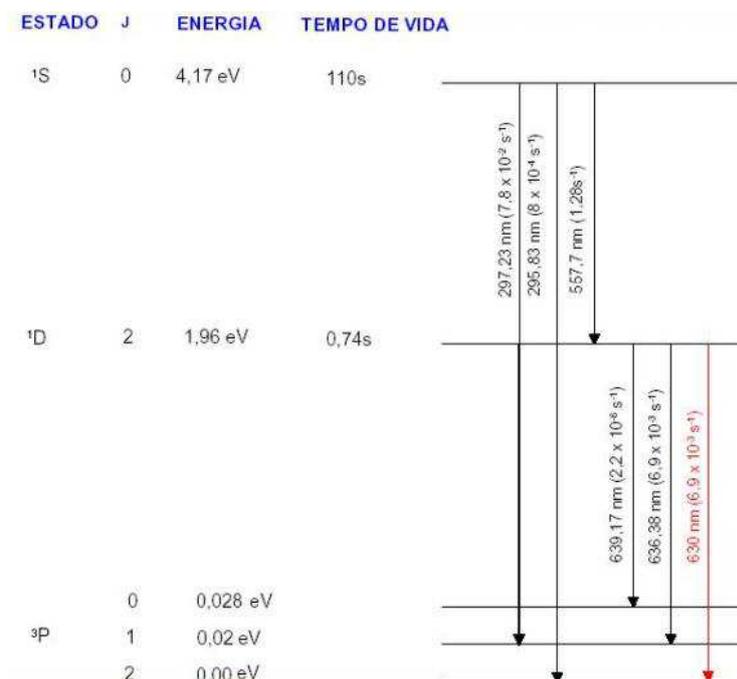


Figura 2.4 - Níveis de energia do oxigênio atômico.

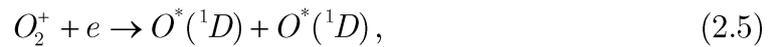
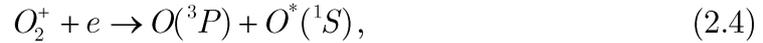
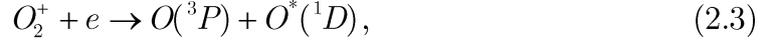
Fonte: KRASSOVSKY (2000).

### 2.2.1 MECANISMO DE RECOMBINAÇÃO DISSOCIATIVA

O mecanismo de recombinação dissociativa é o principal processo de produção do estado  $O(^1D)$  na região F. Matematicamente, o processo de recombinação dissociativa pode ser expresso pela seguinte equação:



parte da energia da reação é utilizada para dissociar o íon molecular  $XY^+$  em átomos excitados. A produção do estado  $O(^1D)$  é devido a recombinação do íon oxigênio molecular ( $O_2^+$ ) com um elétron, que pode produzir, assim como o estado  $O(^1D)$ , oxigênio em vários estados excitados. Alguns estados excitados para oxigênio estão listados a seguir:



Sendo o símbolo sobrescrito (\*) utilizado para indicar que o átomo está no estado excitado. A equação de decaimento do átomo de oxigênio excitado  $O(^1D)$  para o estado  $^3P$  é dada por:



Em que  $h$  a constante de Planck e  $\nu$  a frequência correspondente ao comprimento de onda de 630 nm. O átomo de oxigênio excitado  $O(^1D)$  ao decair libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética, emitindo linha discretas no comprimento de onda 630 nm, 636,4 nm e 639,2 nm.

## 2.2.2 TAXA DE EMISSÃO VOLUMÉTRICA

Uma forma de estudar quantitativamente uma emissão é determinando a taxa de emissão volumétrica, definida como sendo a quantidade de fótons emitidos por unidade de volume e de tempo. Usualmente a taxa de emissão volumétrica é expressa em *fótons/cm<sup>3</sup>s*. Matematicamente, ela é expressa como o produto entre a concentração do constituinte emissor e a probabilidade de ocorrer a emissão, ou seja:

$$V_{OI630} = A_{630} [O^1D]. \quad (2.8)$$

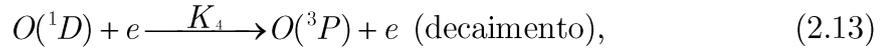
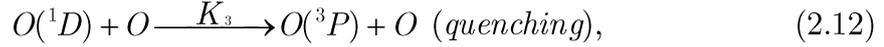
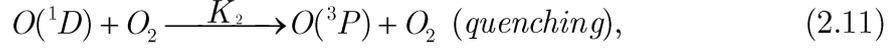
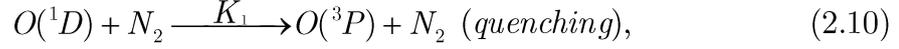
Sendo  $A_{OI630}$  a probabilidade de ocorrer a transição e  $[O^1D]$  a concentração do oxigênio atômico no estado excitado  $^1D$ .

Para o cálculo da taxa de emissão é necessário conhecer os processos fotoquímicos de produção e perda do oxigênio no estado  $O(^1D)$ . As Equações 2.3, 2.5 e 2.6 expressam os mecanismos de produção do  $O(^1D)$  e a Equação 2.7 expressa o mecanismo de perda do  $O(^1D)$ . A seguir serão apresentados os mecanismos de produção e perda envolvidos na emissão do OI 630 nm acompanhados de seus respectivos coeficientes de reação segundo Sobral (1993).

Mecanismo de produção:



Mecanismos de perda:



Sendo  $\alpha(^1D) \equiv \beta_1\alpha_1$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  e  $A_D$  os coeficientes de reação, que em geral dependem da temperatura do meio. O tempo de vida do  $O(^1D)$  é  $\leq 110$  segundos (PETERSON et al., 1966), podendo ser desativado durante este período por colisões, sem a emissão de fótons. O processo de desativamento por colisão sem a emissão de fótons é chamado de *quenching*.

No equilíbrio fotoquímico tem-se que a produção (P) do oxigênio excitado no estado  $^1D$  é numericamente igual a perda (L) do mesmo, ou seja:

$$P[O(^1D)] = L[O(^1D)]. \quad (2.15)$$

A produção do  $O(^1D)$  pode ser expressa utilizando a Equação 2.9 da seguinte forma:

$$P[O(^1D)] = \alpha(^1D)[O_2^+][e]. \quad (2.16)$$

Analogamente, a perda do  $O(^1D)$  pode ser expressa utilizando as Equações 2.10-2.14 de modo que:

$$L[O(^1D)] = K_1[O(^1D)][N_2], \quad (2.17)$$

$$L[O(^1D)] = K_2[O(^1D)][O_2], \quad (2.18)$$

$$L[O(^1D)] = K_3[O(^1D)][O], \quad (2.20)$$

$$L[O(^1D)] = K_4[O(^1D)][e], \quad (2.21)$$

$$L[O(^1D)] = A_D[O(^1D)]. \quad (2.22)$$

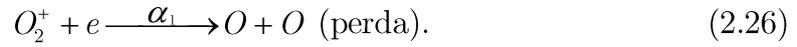
Logo, no equilíbrio fotoquímico tem-se que:

$$\begin{aligned} \alpha(^1D)[O_2^+][e] = & K_1[O(^1D)][N_2] + K_2[O(^1D)][O_2] + K_3[O(^1D)][O] \\ & + K_4[O(^1D)][e] + A_D[O(^1D)]. \end{aligned} \quad (2.23)$$

A equação acima pode ser rescrita da seguinte forma:

$$[O(^1D)] = \frac{\alpha(^1D)[O_2^+][e]}{K_1[N_2] + K_2[O_2] + K_3[O] + K_4[e] + A_D}. \quad (2.24)$$

Note que a equação acima depende da concentração  $O_2^+$ , logo, deve-se considerar seus processos de produção e perda para o cálculo da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm. As equações de produção e perda são dadas a seguir (LINK E COGGER, 1988):



Reescrevendo as equações de produção e perda em termos da concentração, tem-se que:

$$P[O_2^+] = K_5 [O_2][O^+], \quad (2.26)$$

$$L[O_2^+] = \alpha_1 [O_2^+][e]. \quad (2.27)$$

Então, no equilíbrio fotoquímico utilizando as Equações 2.26 e 2.27, tem-se:

$$K_5 [O_2][O^+] = \alpha_1 [O_2^+][e]. \quad (2.28)$$

A equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$[O_2^+] = \frac{K_5 [O_2][O^+]}{\alpha_1 [e]}. \quad (2.29)$$

Substituindo a Equação 2.29 na Equação 2.24, a equação da concentração para o  $O(^1D)$  será dada por:

$$[O(^1D)] = \frac{\alpha(^1D)K_5 [O_2][O^+][e]}{\alpha_1 [e](K_1 [N_2] + K_2 [O_2] + K_3 [O] + K_4 [e] + A_D)}. \quad (2.30)$$

Sabendo que  $\alpha(^1D) \equiv \beta_1 \alpha_1$  e definindo  $\Theta = [O^+]/[e]$ , a equação acima pode ser reescrita na forma:

$$[O(^1D)] = \frac{\beta_1 K_5 \Theta [O_2] [e]}{K_1 [N_2] + K_2 [O_2] + K_3 [O] + K_4 [e] + A_D}. \quad (2.31)$$

Por fim, substituindo  $[O(^1D)]$  na equação da taxa de emissão volumétrica, tem-se que.

$$V_{OI630} = A_{630} \frac{\beta_1 K_5 \Theta [O_2] [e]}{K_1 [N_2] + K_2 [O_2] + K_3 [O] + K_4 [e] + A_D}. \quad (2.32)$$

Os valores de todas as constantes utilizadas no cálculo da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm encontra-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Coeficientes utilizados no cálculo da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm. Onde  $T$  é a temperatura neutra,  $T_{el}$  a temperatura eletrônica,  $t_i \equiv T_i/300$  e  $T_i$  é a temperatura iônica.

Coeficientes	Valor	Unidades
$K_1$	$2 \times 10^{-11} e^{\frac{111.8}{T}}$	$cm^3 s^{-1}$
$K_2$	$2,9 \times 10^{-11} e^{\frac{67.5}{T}}$	$cm^3 s^{-1}$
$K_3$	$2,55 \times 10^{-12}$	$cm^3 s^{-1}$
$K_4$	$1,6 \times 10^{-12} e^{(T_{el})^{0,91}}$	$cm^3 s^{-1}$
$K_5$	$3,2 \times 10^{-12} e^{(3,72/t_i - 1,87/t_i^2)}$	$cm^3 s^{-1}$
$\beta_1$	1,1	-
$A_D$	$6,81 \times 10^{-3}$	$s^{-1}$
$A_{630}$	$5,15 \times 10^{-3}$	$s^{-1}$

Fonte: LINK e COGGER (1988).

Na Figura abaixo é apresentado uma gráfico do perfil vertical da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm para a cidade de São João do Cariri (07°23'27" S, 36°31'58" O) a 0 h do dia 01 de dezembro de 2010 e 2011. O perfil foi gerado a partir da Equação 2.32 e os dados foram obtidos através dos modelos MSIS-E-00 e IRI-2012, disponíveis na internet.

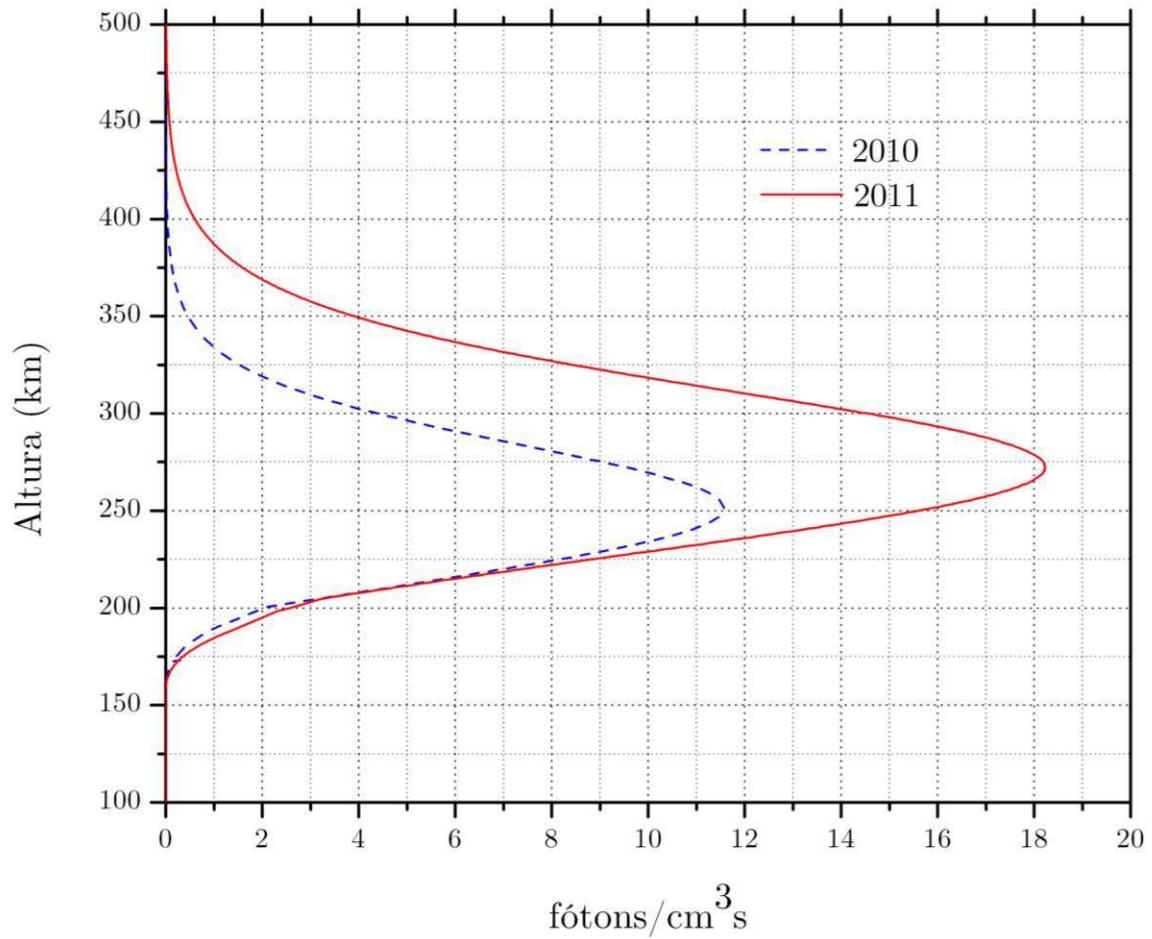


Figura 2.5 - Perfil vertical da taxa de emissão volumétrica do OI 630 nm para a cidade de São João do Cariri (07°23'27" S, 36°31'58" O) a 0 h do dia 01 de dezembro de 2010 e dia 01 de dezembro de 2011. O perfil foi gerado a partir da Equação 2.32 e os dados foram obtidos através dos modelos MSIS-E-90 e IRI-2012.

### 3. ONDAS NA ATMOSFERA

A atmosfera terrestre comporta um vasto espectro de movimentos com as mais diversas escalas espaciais e temporais, dentre elas as ondas atmosféricas. As ondas atmosféricas são movimentos que podem transmitir energia e momento sem o transporte de matéria e são geradas por perturbações que provocam o desequilíbrio do ar e de forças restauradoras.

As ondas na atmosfera podem ser classificadas de acordo com seu período em:

- Ondas de gravidade: São geradas a partir do balanço entre a força inercial, força de gravidade e gradiente de pressão. Seu período de oscilação está compreendido entre, aproximadamente, 5 minutos e  $12 \cos \theta$  (dado em horas), onde  $\theta$  é a colatitude;
- Marés atmosféricas: São produzidas pela combinação do efeito gravitacional do Sol e o efeito gravitacional da Lua sobre a Terra. Seus períodos são sub-harmônicos de um dia solar ou lunar;
- Ondas planetárias: Conhecidas também como ondas de Rossby, as ondas planetárias são geradas devido à variação do efeito da força de Coriolis em função da latitude sobre a atmosfera terrestre. As ondas planetárias possuem períodos superiores a 1 dia e comprimento de onda horizontal da ordem do diâmetro da Terra.

#### 3.1 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DAS ONDAS ATMOSFÉRICAS

Para explicar os movimentos da atmosfera neutra é necessário identificar as forças que atuam sobre mesma. Basicamente, têm-se as seguintes forças:

- Forças derivadas do gradiente de pressão,

- Força de atração gravitacional,
- Forças friccionais,
- Forçantes externos,
- Força centrífuga,
- Força de Coriolis.

Conhecendo as forças que atuam sobre a atmosfera é possível escrever a segunda lei de Newton para o movimento do fluido. A segunda lei de Newton para o movimento de um fluido pode ser escrita como:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + \vec{F}_r. \quad (3.1)$$

Sendo:

- $\vec{V}$  a velocidade do fluido,
- $\vec{\Omega}$  a velocidade angular da Terra,
- $\rho$  a densidade do fluido,
- $P$  a pressão do fluido,
- $\vec{F}_r$  representa as forças friccionais e forçantes externos,
- $\frac{d\vec{V}}{dt}$  a aceleração da parcela do fluido,
- $-2\vec{\Omega} \times \vec{V}$  a aceleração de Coriolis,

- $-\frac{1}{\rho}\nabla P$  a aceleração devida ao gradiente de pressão,
- $\vec{g}$  a aceleração.

As forças friccionais são devido à viscosidade e às forças hidromagnéticas, que tende a atenuar o movimento na atmosfera, dissipando sua energia. A viscosidade torna-se importante à medida que a altura aumenta, conseqüentemente, a densidade diminui resultando em um aumento da viscosidade. Já a força hidromagnética é causada pelas colisões entre partículas carregadas e a atmosfera neutra. Os íons, por ter massa bem superior do que os elétrons são os agentes principais da dissipação de energia da atmosfera neutra por colisão.

Cada solução da Equação 3.1 corresponde a um tipo de movimento que a atmosfera pode suportar. Além da equação da segunda lei de Newton para a atmosfera neutra, faz-se necessário a utilização das equações da conservação da massa, primeira lei da termodinâmica e a equação de estado para o gás ideal, ou seja:

- Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = P - L. \quad (3.2)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do fluido, P o termo de produção e L o termo de perda de uma determinada espécie química.

Primeira lei da termodinâmica

$$c_v \frac{dT}{dt} + P \frac{d\alpha}{dt} = Q. \quad (3.3)$$

Sendo  $c_V$  o calor específico à volume constante,  $T$  a temperatura absoluta,  $P$  a pressão,  $\alpha \equiv 1/\rho$  o volume específico e  $Q$  a taxa de aquecimento por unidade de massa.

- Equação de estado para o gás ideal

$$P = \rho RT. \quad (3.4)$$

Sendo  $R = R^*/\bar{M}$ , e  $R^*$  a constante universal dos gases ideais e  $\bar{M}$  a massa molecular média da atmosfera.

### 3.1.1 EQUAÇÕES PRIMITIVAS EM UMA ESFERA EM ROTAÇÃO

A escolha do sistema de coordenadas mais adequado à geometria do problema é fundamental para encontrar a solução das equações básicas do movimento da atmosfera neutra. Naturalmente, a geometria mais adequada nesta situação é a de simetria esférica, devido à simetria da Terra se aproximar a de uma esfera. Desta forma, considere o sistema de coordenadas esféricas dado pela Figura 3.1.

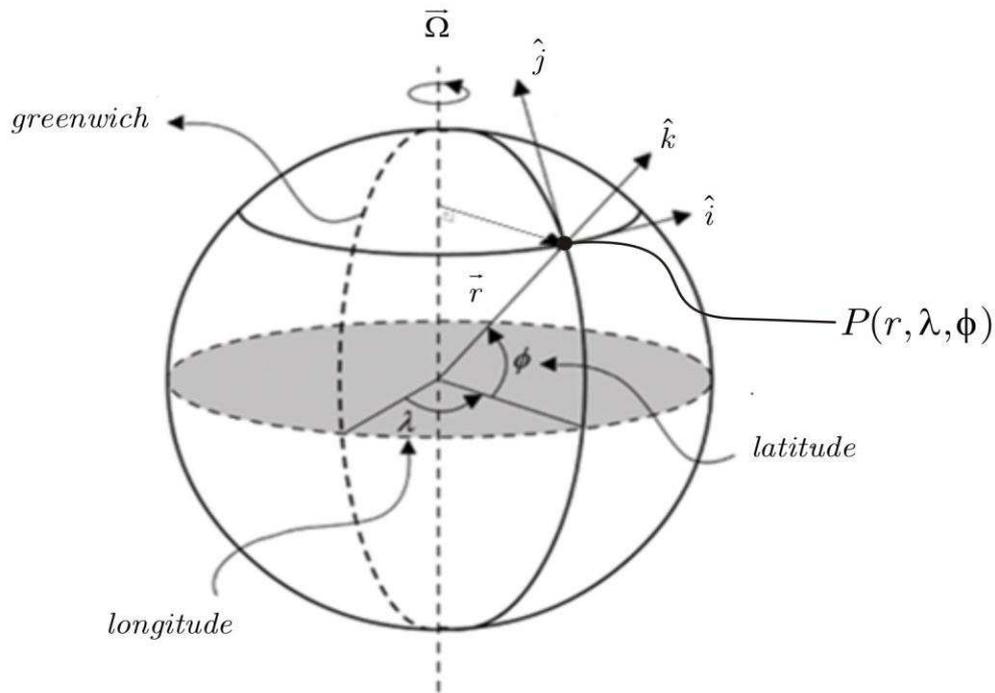


Figura 3.1 - Representação do sistema de coordenadas esféricas utilizado na solução das equações do movimento da atmosfera neutra.

Neste sistema de coordenadas a localização de um ponto  $P$  é definida em função do raio ( $r$ ), do ângulo azimutal ( $\lambda$ ) e do ângulo de elevação ( $\phi$ ). Assim, definindo o ponto  $P$  como sendo um ponto acima da superfície da terra, o mesmo pode ser localizado pela sua distância entre o centro da Terra, a longitude e a latitude.

O vento (velocidade do fluido) pode ser expresso em termo da componente zonal ( $u$ ), meridional ( $v$ ) e vertical ( $w$ ), da seguinte forma:

$$\bar{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}, \quad (3.5)$$

Cada componente do vetor vento acima pode ser escrita em termos dos parâmetros definidos no sistema de coordenadas esféricas (HOLTON, 2004), da seguinte maneira:

$$u = r \cos \phi \frac{D\lambda}{Dt}, \quad v = r \frac{D\phi}{Dt} \quad \text{e} \quad w = \frac{Dz}{Dt}. \quad (3.6)$$

Normalmente a componente radial ( $r$ ) é substituída pela altura  $z$ , distância entre a superfície da Terra e o ponto  $P$ , dada por:

$$r = a + z. \quad (3.7)$$

Sendo  $a$  o raio da Terra. Note que  $a \gg z$ , logo em boa aproximação,  $r = a$ . Substituindo a aproximação  $r = a$  nas Equações 3.6, obtém que:

$$u = a \cos \phi \frac{D\lambda}{Dt}, \quad v = a \frac{D\phi}{Dt} \quad \text{e} \quad w = \frac{Dz}{Dt}. \quad (3.8)$$

Derivando a Equação 3.5, tem-se que:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \left( \hat{i} \frac{Du}{Dt} + u \frac{D\hat{i}}{Dt} \right) + \left( \hat{j} \frac{Dv}{Dt} + v \frac{D\hat{j}}{Dt} \right) + \left( \hat{k} \frac{Dw}{Dt} + w \frac{D\hat{k}}{Dt} \right), \quad (3.9)$$

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \hat{i} \frac{Du}{Dt} + \hat{j} \frac{Dv}{Dt} + \hat{k} \frac{Dw}{Dt} + u \frac{D\hat{i}}{Dt} + v \frac{D\hat{j}}{Dt} + w \frac{D\hat{k}}{Dt}. \quad (3.10)$$

Perceba que os vetores unitários  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$  não são constantes, e sim, função da posição do ponto  $P$ . Desta maneira, para obter a equação do movimento é necessário avaliar a taxa com que os vetores unitários variam com o movimento do ponto  $P$ .

- Cálculo de  $\frac{D\hat{i}}{Dt}$

A derivada total do vetor com respeito ao tempo é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{D\hat{i}}{Dt} = \frac{D\hat{i}}{Dx} \frac{Dx}{Dt} + \frac{D\hat{i}}{Dy} \frac{Dy}{Dt} + \frac{D\hat{i}}{Dz} \frac{Dz}{Dt} + \frac{D\hat{i}}{Dt}. \quad (3.11)$$

Mas o vetor  $\hat{i}$  possui apenas dependência em x, logo:

$$\frac{D\hat{i}}{Dt} = u \frac{D\hat{i}}{Dx}. \quad (3.12)$$

Isolando a variação do vetor  $\hat{i}$  na Figura 3.1, tem-se a seguinte ilustração:

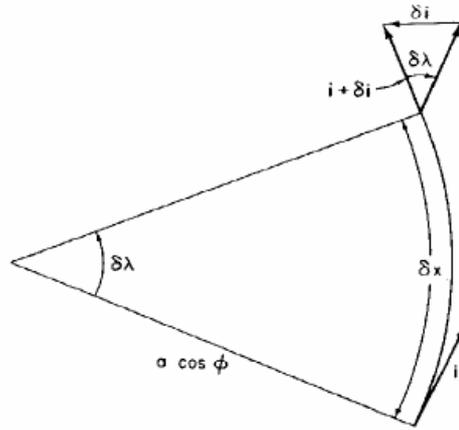


Figura 3.2 - Dependência longitudinal do vetor  $\hat{i}$ .

Fonte: HOLTON (2004).

Usando a aproximação  $s = r \cos \theta \approx r\theta$  para todo  $\theta \ll 1$ , da Figura 3.2 tem-se que:

$$\delta i = \left| \hat{i} \right| \delta \lambda. \quad (3.13)$$

Mas  $\left| \hat{i} \right| = 1$ , logo:

$$\delta i = \delta \lambda. \quad (3.14)$$

Ainda da Figura 3.2 podemos extrair a seguinte relação:

$$\delta x = a \cos \phi \delta \lambda. \quad (3.15)$$

Utilizando a Equação 3.14, pode-se reescrever a equação acima da seguinte maneira:

$$\delta x = a \cos \phi \delta i, \quad (3.16)$$

$$\frac{\delta i}{\delta x} = \frac{1}{a \cos \phi}. \quad (3.17)$$

Tomando o limite quando  $\delta x \rightarrow 0$ , obtém-se que:

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} \left| \frac{\delta i}{\delta x} \right| = \left| \frac{\partial i}{\partial x} \right| = \frac{1}{a \cos \phi}. \quad (3.18)$$

A Equação acima pode ser reescrita na forma vetorial dada por:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{1}{a \cos \phi} \vec{a}. \quad (3.19)$$

Onde  $\vec{a}$  pode ser calculado da geometria dada pela Figura 3.3.

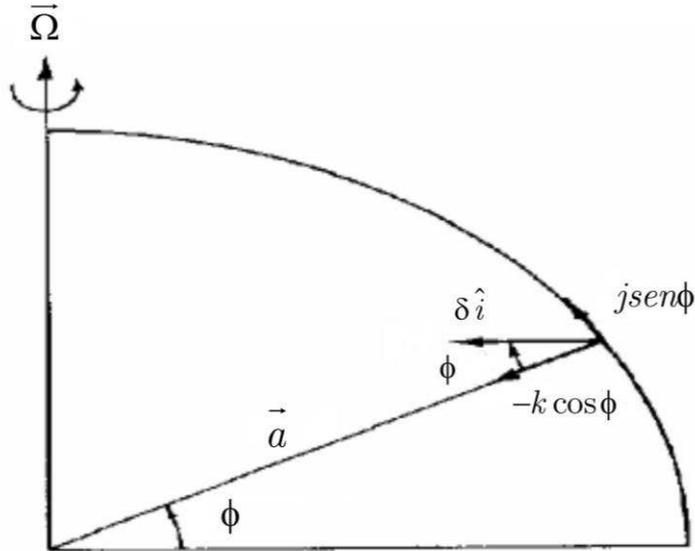


Figura 3.3 - Representação do vetor  $\vec{a}$ .  
 Fonte: HOLTON (2004).

Pode-se escrever  $\vec{a}$  como:

$$\vec{a} = \text{sen}\phi \hat{j} - \text{cos}\phi \hat{k}. \quad (3.20)$$

Substituindo na Equação 3.19,  $\frac{\partial \hat{i}}{\partial x}$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \hat{i}}{\partial x} = \frac{1}{a \cos \phi} (\text{sen}\phi \hat{j} - \text{cos}\phi \hat{k}), \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \hat{i}}{\partial x} = \frac{1}{a} \tan \phi \hat{j} - \frac{1}{a} \hat{k}. \quad (3.22)$$

Consequentemente,  $\frac{D\hat{i}}{Dt}$  pode ser reescrita em termos da equação acima:

$$\frac{D\hat{i}}{Dt} = \frac{u}{a} \tan \phi \hat{j} - \frac{u}{a} \hat{k}. \quad (3.23)$$

Analogamente, pode ser mostrado que:

$$\frac{D\hat{j}}{Dt} = -\frac{u}{a} \tan \phi \hat{i} - \frac{v}{a} \hat{k}, \quad (3.24)$$

$$\frac{D\hat{k}}{Dt} = \frac{u}{a} \hat{i} + \frac{v}{a} \hat{j}. \quad (3.25)$$

Substituindo as Equações 3.23, 3.24 e 3.25 na Equação 3.10 e rearranjando os termos, a expansão em coordenadas esféricas da aceleração, é dado pela seguinte equação:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \left( \frac{Du}{Dt} - \frac{uv}{a} \tan \phi + \frac{uw}{a} \right) \hat{i} + \left( \frac{Dv}{Dt} + \frac{u^2}{a} \tan \phi + \frac{vw}{a} \right) \hat{j} + \left( \frac{Dw}{Dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} \right) \hat{k}. \quad (3.26)$$

A equação acima corresponde ao primeiro termo da segunda lei de Newton para o movimento de um fluido. Calculando agora os outros termos a fim de encontrar a equação geral do movimento, tem-se que a força de Coriolis é dada por:

$$-2\vec{\Omega} \times \vec{V} = -2 \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & \Omega_y \cos \phi & \Omega_z \text{sen} \phi \\ u & v & w \end{pmatrix}. \quad (3.27)$$

Sendo  $\Omega_y \cos \phi$  e  $\Omega_z \text{sen} \phi$  as projeções do vetor velocidade angular sobre os vetores  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$ , respectivamente. Resolvendo a equação acima, a força de Coriolis pode ser escrita como:

$$-2\vec{\Omega} \times \vec{V} = -2(w\Omega_y \cos \phi - v\Omega_z \text{sen} \phi) \hat{i} - 2(u\Omega_z \text{sen} \phi) \hat{j} + 2(u\Omega_y \cos \phi) \hat{k}. \quad (3.28)$$

A força do gradiente de pressão pode ser expressa por:

$$\vec{\nabla}p = \hat{i} \frac{\partial p}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial p}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (3.29)$$

A gravidade pode ser escrita em termos do vorto unitário  $\hat{k}$ , dada por:

$$g = -g\vec{k}. \quad (3.30)$$

Por fim, a força de atrito nas componentes  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{F}_r = \hat{i}F_{rx} + \hat{j}F_{ry} + \hat{k}F_{rz}. \quad (3.31)$$

Finalmente, a equação do movimento para a atmosfera neutra poder ser escrita em termos da componente zonal, meridional e vertical da seguinte forma:

$$\bullet \quad \frac{Du}{Dt} - \frac{uv}{a} \tan \phi + \frac{uw}{a} = +2v\Omega_z \text{sen} \phi - 2w\Omega_y \cos \phi - \frac{1}{\rho a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{rx}, \quad (3.32)$$

$$\bullet \quad \frac{Dv}{Dt} + \frac{u^2}{a} \tan \phi + \frac{vw}{a} = -2u\Omega_z \text{sen} \phi - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + F_{ry}, \quad (3.33)$$

$$\bullet \quad \frac{Dw}{Dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} = 2u\Omega_y \cos \phi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_{rz}. \quad (3.34)$$

A Equação 3.34 pode ser simplificada considerando o equilíbrio hidrostático, no qual as forças devido ao gradiente de pressão e a força da gravidade são considera nesta componente da equação do movimento. Se estas duas forças estão em equilíbrio, assim a equação acima pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho. \quad (3.35)$$

Pode-se ainda introduzir outro parâmetro nas equações do movimento, esse parâmetro é o geopotencial, dado pela seguinte equação:

$$\Phi = \int_0^z g dz . \quad (3.36)$$

O geopotencial é interpretado como sendo o trabalho necessário pra erguer uma massa unitária do nível do mar a uma determinada altura  $z$ . Utilizando o geopotencial e a lei dos gases ideais a equação da hidrostática pode ser reescrita da forma:

$$\frac{D\Phi}{Dz} = \frac{RT}{H} . \quad (3.37)$$

A coordenada  $z$  é normalmente substituída pela altura log-pressão definida como:

$$z_p = -H \ln\left(\frac{p}{p_s}\right) . \quad (3.38)$$

Sendo  $H = RT_s/g$  a altura de escala,  $p_s$  a pressão em um nível de referência a uma temperatura  $T_s$ .

Com essas considerações as componentes da equação do movimento podem ser reescrita da seguinte forma:

$$\bullet \quad \frac{Du}{Dt} - \frac{uv}{a} \tan \phi = +2v\Omega_z \text{sen}\phi - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + F_{rx} , \quad (3.39)$$

$$\bullet \quad \frac{Dv}{Dt} + \frac{u^2}{a} \tan \phi = -2u\Omega_z \text{sen}\phi - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + F_{ry} , \quad (3.40)$$

- $$\frac{D\Phi}{Dz} - \frac{RT}{H} = 0. \quad (3.41)$$

As equações da conservação de energia e massa podem ser também reescritas como da forma a seguir:

$$\frac{DT}{Dt} + \frac{kT w}{H} = Q, \quad (3.42)$$

$$\frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial (v \cos \phi)}{\partial \phi} \right] + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\rho_0 w)}{\partial z} = 0. \quad (3.43)$$

Sendo  $k = R/c_p$  e  $c_p$  o calor específico a pressão constante,  $\rho_0 = \rho_s e^{-z/H}$  e  $\rho_s$  a densidade em um nível de referência.

Outro parâmetro utilizado é a temperatura potencial ( $\theta$ ) ao invés da temperatura  $T$ . A temperatura potencial é definida como sendo a temperatura que uma parcela de ar, com temperatura  $T$  e pressão  $P$ , teria se fosse expandida ou comprimida adiabaticamente até uma pressão  $p_s$ . A temperatura potencial é definida como:

$$\theta = T \left( \frac{p_s}{p} \right)^k. \quad (3.44)$$

Com a definição acima as equações da hidrostática e da energia podem ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = RH^{-1} e^{-\frac{kz}{H}}, \quad (3.45)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = Q. \quad (3.46)$$

As Equações 3.39, 3.40, 3.43, 3.45 e 3.46 descrevem os movimentos da atmosfera neutra e são conhecidas como equações primitivas. Estas equações requerem determinadas condições de contorno para que possam ser resolvidas. Na seção seguinte será comentado o método para a obtenção das soluções para estas equações.

### 3.2 MÉTODO DA PERTURBAÇÃO

Através do método da perturbação pode-se encontrar um conjunto de soluções para as equações do movimento da atmosfera neutra. O método consiste na suposição de que as variáveis envolvidas nas equações do movimento são divididas em duas partes: uma parte no estado básico, no qual é suposto ser independente do tempo e da longitude; outra parte perturbada, onde é suposto um desvio local com relação ao estado básico (HOLTON, 2004). Supõe-se ainda que, se a perturbação for nula, o estado básico é solução da equação primitiva, e que a perturbação é suficientemente pequena para que os produtos envolvendo a mesma sejam desprezíveis, ou seja, por exemplo:

$$L(x, t) \equiv \bar{L} + L'(x, t). \quad (3.47)$$

Sendo  $L$  uma variável qualquer e  $\bar{L}$  seu valor médio.

Utilizando as considerações do método da perturbação, as equações primitivas podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\bullet \quad \frac{Du'}{Dt} + \left[ \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial(\bar{u} \cos \phi)}{\partial \phi} - f \right] v' + \frac{D\bar{u}}{Dz} w' + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi'}{\partial \lambda} = F_{rx}, \quad (3.48)$$

$$\bullet \quad \frac{Dv'}{Dt} + \left[ \frac{2\bar{u}}{a} \tan \phi + f \right] u' + \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi'}{\partial \phi} = F_{ry}, \quad (3.49)$$

- $$\frac{\partial \Phi'}{\partial z} = R\theta' H^{-1} e^{\frac{-kz}{H}}, \quad (3.50)$$

- $$\frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial u'}{\partial \lambda} + \frac{\partial (v' \cos \phi)}{\partial \phi} \right] + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\rho_0 w')}{\partial z} = 0, \quad (3.51)$$

- $$\frac{D\theta'}{Dt} + \frac{1}{a} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \phi} v' + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \phi} w' = Q'. \quad (3.52)$$

Sendo  $\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda}$ ,  $f \equiv 2\Omega \sin \phi$ ,  $Q' \equiv \frac{J}{c_p} e^{\frac{kz}{H}}$  e  $J$  é a taxa de entrada de

calor por unidade de massa.

As soluções para as Equações 5.48-5.52 podem ser encontradas utilizando o método de separação de variáveis de modo que:

$$(u', v', \Phi') = e^{\frac{z}{2H}} U(z) \left[ u(\lambda, \phi, t), \tilde{v}(\lambda, \phi, t), \Phi(\lambda, \phi, t) \right], \quad (3.53)$$

$$w' = e^{\frac{z}{2H}} W(z) w(\lambda, \phi, t). \quad (3.54)$$

Sendo  $u$  e  $\tilde{v}$  as componentes das velocidades, e  $U$  e  $W$  as amplitudes complexas das componentes da velocidade, respectivamente. Substituindo nas Equações 5.48, 5.49 e 5.51, obtém-se que:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - f\tilde{v} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = 0, \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} - fu + \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} = 0, \quad (3.56)$$

$$\frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial(\tilde{v} \cos \phi)}{\partial \phi} \right] + \frac{1}{gh} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0. \quad (3.57)$$

As equações acima são conhecidas como equações de marés de Laplace, onde  $h$  é uma constante de separação, conhecida como profundidade equivalente (LIMA, 2004).

Para a estrutura vertical, tem-se que:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left( \frac{N^2}{gh} - \frac{1}{4H^2} \right) W = 0, \quad (3.58)$$

Sendo:

$$\frac{dW}{dz} + \left( \frac{R\bar{T}(0)}{gh} - \frac{1}{2} \right) \frac{W}{H} = 0 \text{ em } z = 0, \quad (3.59)$$

é a condição de contorno inferior e  $N^2(z) = H^{-1} R \left( \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) e^{\frac{-kz}{H}}$  é o quadrado da frequência de Brunt-Väisälä ( $N$ ).

As soluções para as Equações 5.55-5.57 são dadas da forma:

$$[u, \tilde{v}, \Phi] = \text{Re} \left\{ [u(\phi), \hat{v}(\phi), \Phi(\phi)] e^{[i(s\lambda - 2\Omega\sigma t)]} \right\}. \quad (3.60)$$

Sendo  $s$  o número de onda e  $\frac{2\pi}{2\Omega\sigma}$  o período em dias.

Solucionando as Equações 3.55 e 3.56 para  $u$  e  $\hat{v}$ , e substituindo na Equação 3.57, obtém-se:

$$L\Phi + \gamma\Phi = 0. \quad (3.61)$$

Sendo  $\gamma = 4\Omega^2 a^2 / gh$  conhecido como parâmetro de Lamb, e  $L$  é dado por:

$$L = \frac{d}{d\mu} \left[ \frac{(1 - \mu^2)}{(\sigma^2 - \mu^2)} \frac{d}{d\mu} \right] - \frac{1}{\sigma^2 - \mu^2} \left[ -\frac{s(\sigma^2 + \mu^2)}{\sigma(\sigma^2 - \mu^2)} + \frac{s^2}{1 - \mu^2} \right]. \quad (3.62)$$

Sendo  $L$  é conhecido como operador de Laplace e  $\mu = \text{sen}\phi$  para  $-1 \leq \mu \leq 1$ .

Especificando  $s$  e  $\sigma$ , pode-se estabelecer uma série de autovalores  $\gamma_n^{(\sigma,s)}$ , ou profundidades equivalente  $h_n^{(\sigma,s)}$ , e autofunções equivalentes  $\Theta_n^{(\sigma,s)}$  de forma que satisfaçam a equação abaixo:

$$L\Theta_n^{(\sigma,s)} + \gamma_n^{(\sigma,s)}\Theta_n^{(\sigma,s)}. \quad (3.63)$$

Sendo  $n$  assumindo valores inteiros e  $\Theta_n$  conhecido como função de Hough. Na Figura 3.4, estão representados as curvas referentes aos autovalores  $\gamma_n^{(\sigma,s)}$ , em função da frequência normalizada  $\sigma/\Omega$ , para o número de onda zonal  $s=1$  (para mais detalhes, ver Lima, 2004).

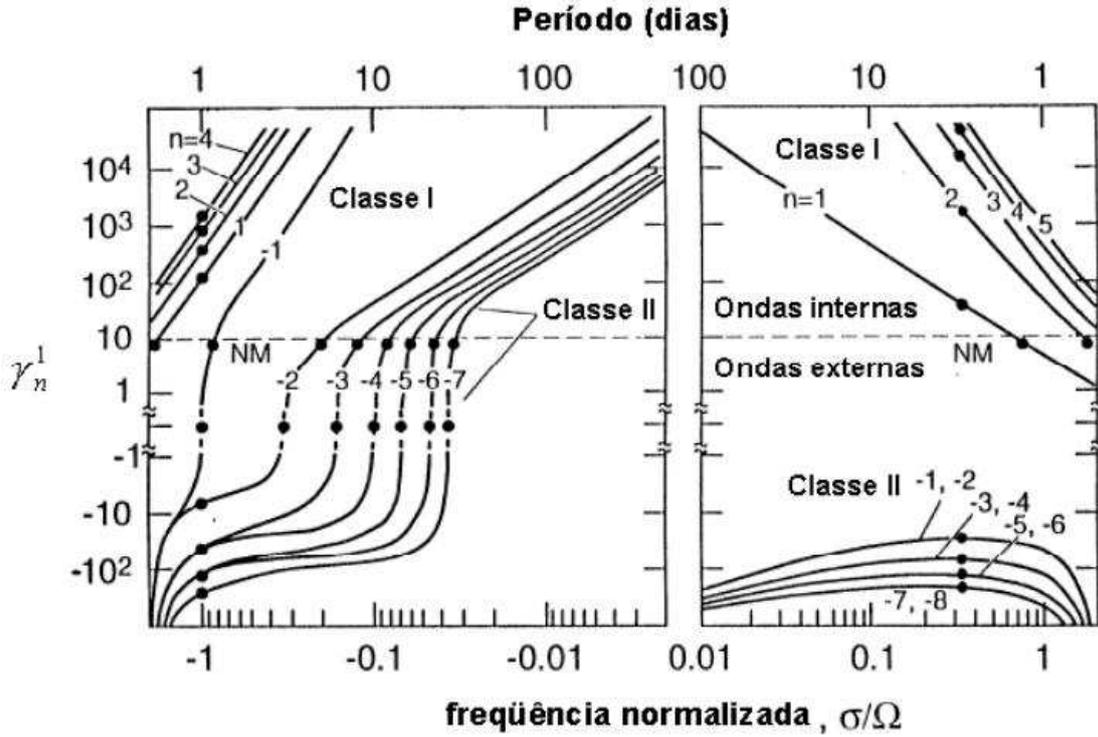


Figura 3.4 - Autovalores  $\gamma_n^{(\sigma,s)}$ , em função da frequência normalizada  $\sigma/\Omega$ , para o número de onda zonal  $s=1$ .  
 Fonte: VOLLAND (1998).

### 3.3 MODOS NORMAIS

Uma onda planetária livremente propagante é aquela que depois de gerada, mantém sua propagação sem a presença de um forçante. Neste caso, a teoria adotada para os modos livres considerando as Equações 5.48, 5.49 e 5.52 com  $F_{rx}$ ,  $F_{ry}$  e  $J$  igual a zero, de modo a buscar soluções da forma:

$$w' = e^{\frac{z}{2H}} \operatorname{Re} \left\{ \left[ W(z), w(\phi) \right] e^{[i(s\lambda - 2\Omega\sigma t)]} \right\}. \quad (3.64)$$

Levando em conta as condições de contorno definidas pela Equação 3.59 e a necessidade de  $W \rightarrow 0$  e  $z \rightarrow \infty$ , calcula-se inicialmente a profundidade equivalente como autovalor da equação da estrutura vertical. Em outras pala-

vras, a energia da onda por unidade de volume tende à zero em grandes altitudes.

Após o cálculo da profundidade equivalente determina-se a frequência da onda e a estrutura horizontal através da equação de maré de Laplace, dada por:

$$Lw + \gamma w = 0. \quad (3.65)$$

Sendo  $w$  autofunção da função de Hough.

A única solução não trivial para Equação 5.58, que satisfaça a Equação 5.59 e a condição  $W \rightarrow 0$  e  $z \rightarrow \infty$  se considerarmos uma atmosfera isotérmica com  $\bar{T} = T_s = \text{constante}$  e  $N^2 = gkH^{-1}$ , é dada pela seguinte equação:

$$h = (1 - k)^{-1} H. \quad (3.66)$$

Sendo  $(1 - k)^{-1} = \frac{c_p}{c_v}$ , logo:

$$W(z) \propto e^{\frac{\left(\frac{k-1}{2}\right)z}{H}}, \quad (3.67)$$

$$w' \propto e^{\frac{kz}{H}}. \quad (3.68)$$

Para os modos livres numa atmosfera isotérmica com uma temperatura de 256 K, e  $h = 10,5$  km, tem-se que  $\gamma = 8,4$ . Nesta condição, a linha horizontal na Figura 3.5, define os modos normais (ou livres) que existem para  $s = 1$ , e as frequências ou períodos para os modos normais deduzidos dos pontos de intersecção  $NM$ , indicados na Figura 3.4, ocorrem em períodos de aproximadamente 28 horas, 5 dias, 8 dias e 12 dias, e assim por diante. De acordo com Forbes (1995), a Tabela 3.1 apresenta os modos propagantes para o Oeste mais comum e suas nomenclaturas, com  $h = 10,5$  km.

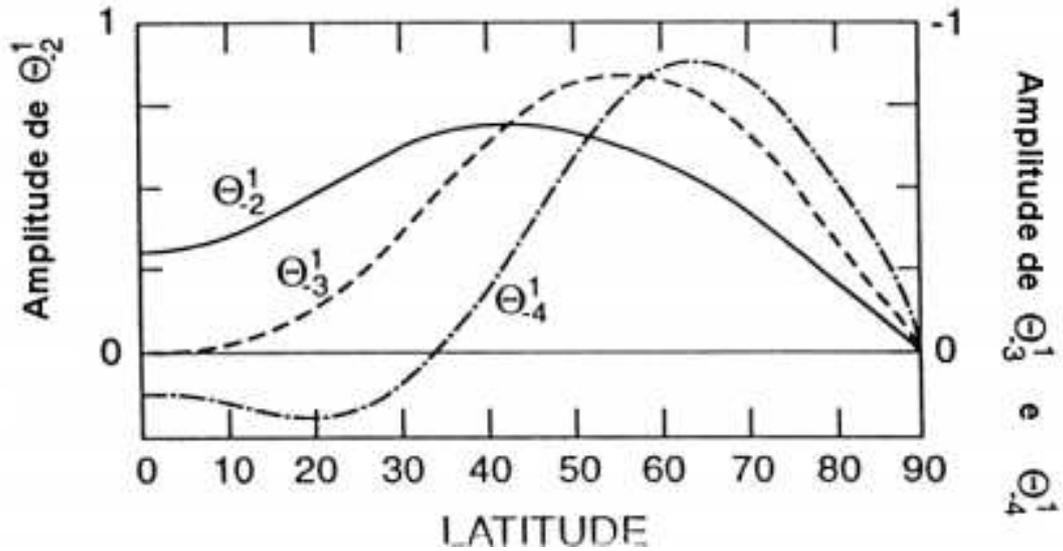


Figura 3.5 - Funções de Hough correspondentes aos três primeiros modos para  $s = 1$ .

Fonte: Forbes (1995).

Tabela 3.1 - Principais modos livres propagantes para o Oeste mais comum na média e alta atmosfera, e suas nomenclaturas com  $h = 10,5$  km.

Período	$(s,n)$	Descrição
2	(3,-3)	Mista de Rossby-gravidade, assimétrica.
4	(2,-3)	Rotacional, Rossby, Primeiro simétrico.
5	(1,-2)	Rotacional, Rossby, Primeiro simétrico.
10	(1,-3)	Rotacional, Rossby, Primeiro assimétrico.
16	(1,-4)	Rotacional, Rossby, Primeiro simétrico.

Fonte: Forbes (1995).

## 4. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

### 4.1 O OLAP

O Observatório da Luminescência Atmosférica da Paraíba (OLAP) possui duas unidades, uma instalada em Cajazeiras ( $6^{\circ} 53' 25''$  S;  $38^{\circ} 33' 19''$  O) e outra em São João do Cariri ( $7^{\circ} 23' 27''$  S;  $36^{\circ} 31' 58''$  O). As unidades estão vinculadas à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e mantêm cooperação científica com o Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE) e a Universidade de Illinois. Atualmente o observatório opera regularmente com: dois interferômetros de Fabry-Perot, dois imageadores *All Sky*, uma CADI (do inglês *Canadian Advanced Digital Ionosonde*) e receptores de GPS (do inglês *Global Positioning System*).



Figura 0.1 - Foto do OLAP localizado em São João do Cariri.

Foto: Fábio do Egito Gomes.

## 4.2 O INPE – FORTALEZA

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Unidade de Fortaleza desenvolve pesquisas nas áreas de geodésia espacial, geodinâmica, geomagnetismo, astrofísica, física da ionosfera e processamento inteligente de sinais. Atualmente o INPE – Fortaleza conta com: um rádio observatório espacial, uma estação de GPS geodésico, um magnetômetro, uma ionossonda e um kit ZISC, e possui cooperação científica com a agência americana NOAA (do inglês *National Oceanic and Atmospheric Administration*), a Universidade Presbiteriana Mackenzie, Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), entre outros.

## 4.3 O INTERFERÔMETRO FABRY-PEROT

O Interferômetro Fabry-Perot (IFP) é um instrumento de espectroscopia de alta resolução utilizado para estimar ventos e temperaturas termosféricas através da observação da emissão OI 630,00 nm (HEDLUND, 2010). A linha vermelha de OI possui um pico de emissão em torno de 250 km de altura, ideal para o estudo da dinâmica da baixa termosfera. Atualmente o IFP é o principal instrumento de medição de vento e temperaturas nesta região da atmosfera devido ao fato de que, os perfis verticais de vento e temperatura são, geralmente, constantes dentro da faixa de altura representada pelo perfil de emissão volumétrica do OI 630,00 nm (MAKELA et al., 2011).

O IFP é basicamente composto de quatro partes: o *Sky Scanner*, um aparato ótico formado por dois espelhos, que através de motores de passo pode move-se em diferentes direções; e o *Etalon*, que tem como finalidade a formação de franjas de interferências com alto grau de resolução de onde se pode, com o auxílio da teoria do Efeito Doppler, estimar os ventos e temperatura (HEDLUND, 2010; MAKELA et al., 2011; MERIWETHER et al., 2011); Anexo ao *Etalon* há um sistema ótico e uma câmera *CCD*, onde os padrões de interferência produzidos

pelo *Etalon* são convergidos, pelo sistema ótico, para a câmera *CCD*, que tem a função de transformar o sinal ótico em pulso elétrico. Na Figura 4.2 é apresentada uma ilustração esquemática do IFP onde podem ser vistos o *Sky Scanner* e os dois motores de passo; logo abaixo tem-se o *Etalon* e a indicação das duas placas refletoras e o filtro de interferência no comprimento de onda do OI 630,00 nm; em seguida, há um sistema ótico com uma lente convergente de comprimento focal igual a 30 cm; por fim encontra-se a câmera *CCD*.

Abaixo será descrito em maiores detalhes o funcionamento do *Sky Scanner* e do *Etalon*, e como são geradas as franjas de interferência.

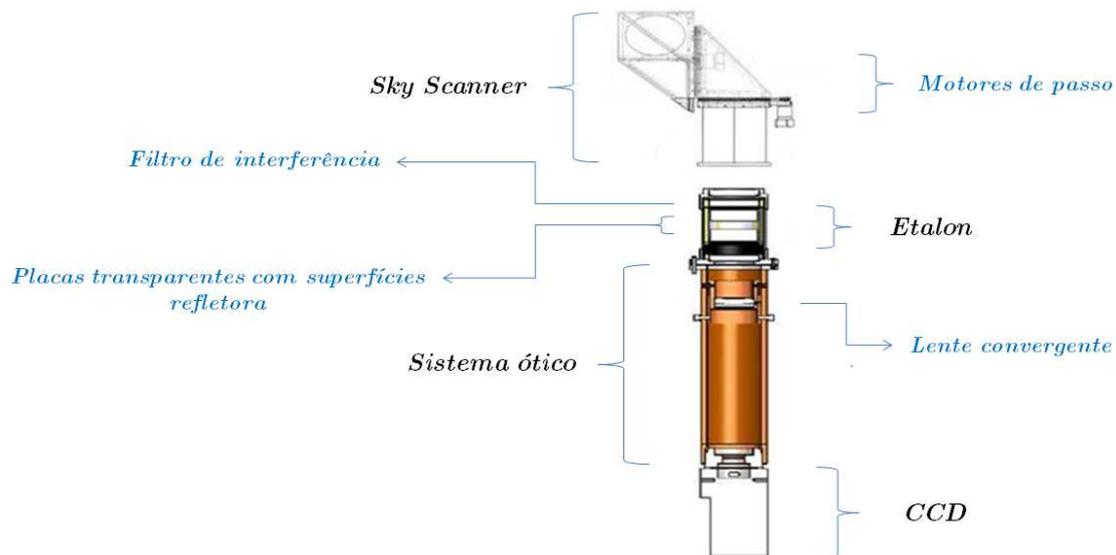


Figura 0.2 - Ilustração esquemática dos componentes básicos de um IFP, onde pode ser visto: o *Sky Scanner*, o *Etalon*, o sistema ótico e a *CCD*.

### 4.3.1 O SKY SCANNER

O *Sky Scanner* consiste em um sistema de dois espelho planos, um espelho responsável em fazer uma varredura no eixo de elevação, e o outro espelho uma varredura no eixo azimutal, com isso o *Sky Scanner* é capaz de observar em qualquer direção. Os espelhos são controlados por dois motores de passo, um para cada eixo de rotação, e estes são controlados por um software que está sin-

cronizado com uma câmera *CCD* localizada na base do IFP. Após calibração o *Sky Scanner* pode observar uma série de específicos ângulos de elevação e azimute com uma precisão de  $\pm 0,2^\circ$ . Na Figura 4.3 pode ser vista uma fotografia do *Sky Scanner* do IFP localizado em São João do Cariri, onde é possível ver os dois motores de passo que movimentam os espelhos. Ainda na Figura 4.3, pode ser visto na base onde o *Sky Scanner* está afixado uma abertura (canto inferior direito da foto) por onde o IFP fará medições de um laser de HeNe, medida necessária nas análises dos padrões de interferência.



Figura 0.3 - Foto do *Sky Scanner* do IFP localizado em São João do Cariri.  
Foto: Ricardo Arlen Buriti da Costa.

## CALIBRAÇÃO DO SKY SCANNER

A calibração dos ângulos absolutos de cada eixo de rotação do *Sky Scanner* é feita utilizando a posição relativa de um objeto celeste, podendo ser o Sol, a Lua ou as estrelas. Para os IFP's localizados em Cajazeiras e em São João do Cariri,

a calibração foi feita utilizando a posição da imagem do Sol projetada no eixo ótico, logo, sabendo a posição relativa do Sol (com a ajuda de um software utilizado pra identifica a posição de um corpo celeste), em um dado momento, são feitos ajustes no código fonte do equipamento. Feito isso, o *Sky Scanner* é capaz de observar em qualquer direção com uma precisão de  $\pm 0,2^\circ$  (MERIWETHER et al., 2011). Os IFP's de São João do Cariri e Cajazeiras estão configurados para observar em dois modos diferentes: no modo cardeal, no qual cada IFP, independentemente, observa nas direções cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste), na direção do zênite e do laser; e no modo volume comum, no qual os dois IFP's observam, simultaneamente, uma região da atmosfera em comum. Estas duas técnicas serão discutidas em maiores detalhes mais adiante, bem como a metodologia utilizada no tratamento dos dados.

#### 4.3.2 O ETALON

O Interferômetro Fabry-Perot tem como principal objetivo formar franjas de interferência. Estes padrões de interferência são gerados devido ao uso de duas placas planas transparentes, paralelas entre si e com uma determinada distância de separação  $d$ . Quando a distância entre as duas placas é mantida constante, este tipo de configuração é chamada de *Etalon* (HEDLUND, 2010). As franjas de interferência produzidas são convergidas, por meio de um sistema ótico, para uma câmera *CCD* de alto desempenho que fornece excelente resolução espectral e temporal. A seguir pode ser visto na Figura 4.4 uma fotografia das duas placas refletoras do IPF dispostas sobre uma mesa.



Figura 0.4 - Foto das Placas planas transparentes com uma superfície refletora com 77% de refletividade de um IFP.

Foto: John Meriwether.

O *Etalon* possui uma distância de separação de 1,5 cm, superfície com 77% de refletividade (com esse grau de refletividade a transmissão da emissão do OI 630,00 nm é feita sem perdas consideráveis de resolução espectral), índice de refração igual a 1 e uma abertura de 42 mm de diâmetro. O sistema é mantido hermeticamente fechado e termicamente controlado, para conservar condições favoráveis de temperatura e pressão (atualmente é mantido a uma temperatura de  $35,0^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}$ ) (MERIWETHER et al., 2011). Na Tabela 4.1 é apresentado alguns dos principais dados técnicos do IFP.

Tabela 0.1- Resumo dos principais dados técnicos do IFP.

Dados técnicos – IFP	
Diâmetro do filtro de interferência	50 mm
Diâmetro do <i>Etalon</i>	42 mm
Separação do <i>Etalon</i>	1,5 cm
Refletividade do <i>Etalon</i>	77%
Campo de visão do sistema	1,8°
Comprimento focal	30 cm
Câmera <i>CCD</i>	DU-434
Resolução da <i>CCD</i>	1024 x 1024 pixels
Área do chip da <i>CCD</i>	1,33 x 1,33 cm <sup>2</sup>
Ruído de leitura	~ 3 elétrons/pixel
Ruído de fundo	~ 0,0004 elétrons/segundo/pixel
Temperatura de trabalho da <i>CCD</i>	-70°C

Fonte: (MAKELA et al., 2011).

#### 4.4 GERAÇÃO DE INTERFERÊNCIA

Para entendermos melhor o IFP faz-se necessário um estudo mais detalhado de como o *Etalon* é capaz de formar franjas de interferência e do formalismo matemático por trás desta técnica. Então, considere uma situação onde dois filmes dielétricos irão formar uma cavidade ressonante, onde fora da cavidade tem-se um meio com índice de refração  $n_1$ , e dentro da cavidade um meio com índice de refração  $n_2$ . Admita que cada placa possui um coeficiente de reflexão e transmissão igual a  $r$  e  $t$ , respectivamente, e que não há perdas consideráveis durante as reflexões, ou seja,  $r + t = 1$  (HEDLUND, 2010).

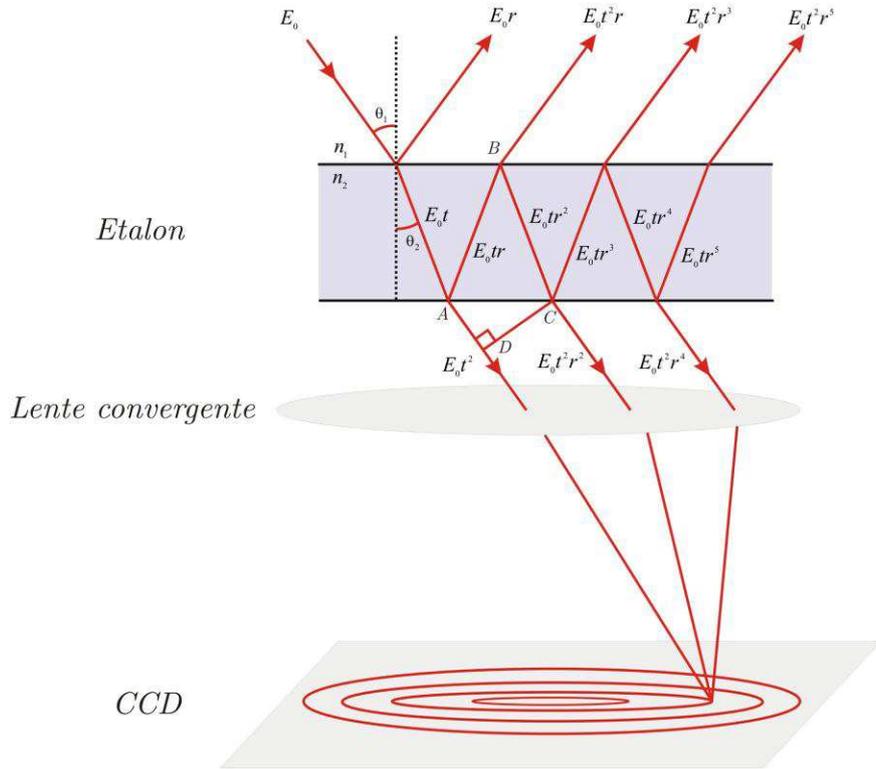


Figura 0.5 - Ilustração das múltiplas reflexões sofridas por um feixe de luz incidente no *Etalon* até ser convergido para o chip da *CCD*. Sendo  $E_0$  é a amplitude da onda incidente antes de sofrer a primeira reflexão e transmissão. Conseqüentemente  $E_0 t^2$ ,  $E_0 t^2 r^2$ ,  $E_0 t^2 r^4$ , ... representam a amplitude dos sucessivos feixes transmitidos até a lente convergente.

Na Figura 4.5 um feixe de luz, representado por  $E_0$ , incide na primeira placa formando um ângulo  $\theta_1$  com o eixo vertical tracejado. Parte da onda é refletida com um ângulo  $\theta_1$ , permanecendo no meio com índice de refração  $n_1$ , enquanto parte entra na cavidade com um ângulo  $\theta_2$  e índice de refração  $n_2$ , até o ponto  $A$ . A segunda placa refletirá o feixe do ponto  $A$  para o  $B$ , onde será refletido de volta para a segunda placa até o ponto  $C$ , enquanto parte do feixe transmitido ( $E_0 t^2$ ) no ponto  $A$  seguirá até uma lente, onde será convergido até a *CCD*, e assim por diante. Com isso, o caminho óptico percorrido pelo feixe de luz pelo caminho  $A$ ,  $B$  e  $C$ , no meio com índice de refração  $n_2$  pode ser escrito como:

$$\overline{ABC} = \frac{2dn_2}{\cos\theta_2}. \quad (4.1)$$

O caminho percorrido de  $A$  até  $D$ , no meio de índice de refração  $n_1$  é dado por:

$$\overline{AD} = \overline{AC}\text{sen}\theta_1. \quad (4.2)$$

Com isso, a diferença de caminho pode ser dada por:

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = \frac{2dn_2}{\cos\theta_2} - \overline{AC}\text{sen}\theta_1, \quad (4.3)$$

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = \frac{2dn_2}{\cos\theta_2} - 2dn_1\text{sen}\theta_1\text{tg}\theta_2, \quad (4.5)$$

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = \frac{2dn_2 - 2dn_1\text{sen}\theta_1\text{sen}\theta_2}{\cos\theta_2}. \quad (4.6)$$

Aplicando a Lei de Snell na Equação 4.6, obtém-se:

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = \frac{2dn_2 - 2dn_2\text{sen}^2\theta_2}{\cos\theta_2}, \quad (4.7)$$

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = \frac{2dn_2(1 - \text{sen}^2\theta_2)}{\cos\theta_2}. \quad (4.8)$$

Usando a relação  $\text{sen}^2\theta_2 + \cos^2\theta_2 = 1$ , podemos reescrever a relação acima da seguinte forma:

$$\overline{ABC} - \overline{AD} = 2dn_2 \cos\theta_2. \quad (4.9)$$

Sabendo que a diferença de fase devido à diferença de caminho pode ser escrita como:

$$\phi = \frac{(\overline{ABC} - \overline{AD})\omega}{v}. \quad (4.10)$$

Sendo  $\omega$  a frequência angular e  $v$  a velocidade, logo:

$$\phi = \frac{2dn_2 \cos \theta_2 \cdot 2\pi f}{v}, \quad (4.11)$$

$$\phi = \frac{4\pi dn_2 \cos \theta_2 \cdot f}{v}. \quad (4.12)$$

Lembrando que:

$$v = \lambda f, \quad (4.13)$$

$$\rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{v}, \quad (4.14)$$

e substituindo na Equação 4.12, a expressão final para a diferença de fase pode ser escrita como:

$$\phi = \frac{4\pi dn_2 \cos \theta_2}{\lambda}, \quad (4.15)$$

sendo  $\lambda$  é o comprimento de onda do feixe de luz incidente na placa,  $n_2$  é o índice de refração dentro da cavidade ressonante e  $\theta_2$  o ângulo formado entre o feixe transmitido para a cavidade e o eixo vertical tracejado. A primeira onda transmitida pode ser representada por:

$$E = E_0 t^2 e^{i(\omega\tau - \kappa r)}. \quad (4.16)$$

Em que  $E_0$  é a amplitude da onda incidente antes de sofrer a primeira reflexão e transmissão. Conseqüentemente  $E_0 t^2$ ,  $E_0 t^2 r^2$ ,  $E_0 t^2 r^4$ , ... representam a amplitude dos sucessivos feixes transmitidos até a lente convergente. Cada feixe de onda transmitida possui uma diferença de fase com relação ao feixe transmitido vizinho, dada pela equação de diferença de fase, com isso a soma de todas as ondas transmitidas é dada pela equação abaixo:

$$E_T = E_0 t^2 + E_0 t^2 r^2 e^{i\phi} + E_0 t^2 r^4 e^{i\phi} + E_0 t^2 r^6 e^{i\phi} + \dots, \quad (4.17)$$

$$\rightarrow E_T = E_0 t^2 (1 + r^2 e^{i\phi} + r^4 e^{i\phi} + r^6 e^{i\phi} + \dots), \quad (4.18)$$

Usando a relação:

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots, \text{ para } |x| < 1, \quad (4.19)$$

a Equação 4.18 pode ser reescrita na forma:

$$E_T = \frac{E_0 t^2}{1 - r^2 e^{i\phi}}. \quad (4.20)$$

A intensidade da luz transmitida  $I_T = |E_T|^2$ , é dada por:

$$I_T = I_0 \frac{|t|^4}{|1 - r^2 e^{i\phi}|^2}. \quad (4.21)$$

Neste caso,  $I_0 = |E_0|^2$  é a intensidade da onda incidente antes de sofrer a primeira reflexão e transmissão. Denotando de  $R$  a refletância e  $T$  a transmitância do *Etalon* em termos de  $r$  e  $t$ , respectivamente, tem-se:

$$R = |r|^2 = rr^*, \quad (4.22)$$

$$T = |t|^2 = tt^*. \quad (4.23)$$

Sendo o asterisco (\*) indica o complexo conjugado. A Equação 4.21 pode ser reescrita como:

$$I_T = I_0 \frac{T^2}{|1 - Re^{i\phi}|^2}. \quad (4.24)$$

Desenvolvendo  $|1 - Re^{i\phi}|^2$ , tem-se que:

$$\begin{aligned} |1 - Re^{i\phi}|^2 &= (1 - Re^{i\phi})(1 - Re^{-i\phi}) = 1 - R(e^{i\phi} + e^{-i\phi}) + R^2 \\ &= 1 - 2R \cos \phi + R^2 = (1 - R^2) \left[ 1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \text{sen}^2 \frac{\phi}{2} \right]. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Portanto, a intensidade pode ser escrita como:

$$I_T = I_0 \frac{T^2}{(1 - R)^2} \frac{1}{1 + F \text{sen}^2 \frac{\phi}{2}}. \quad (4.26)$$

Sendo o último termo da equação acima:

$$\frac{1}{1 + F \operatorname{sen}^2 \frac{\phi}{2}}, \quad (4.27)$$

conhecido como *função de Airy* e  $F$  é dado por:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}, \quad (4.28)$$

e é chamado de coeficiente de *Finesse*, e esta relacionado com a distância entre as franjas de interferência.

O comportamento geral da função pode ser visto na figura abaixo. As curvas são para vários valores de refletância  $R$  e ilustra a distribuição de intensidade para as franjas de interferência de múltiplos feixes incidentes no *Etalon*.

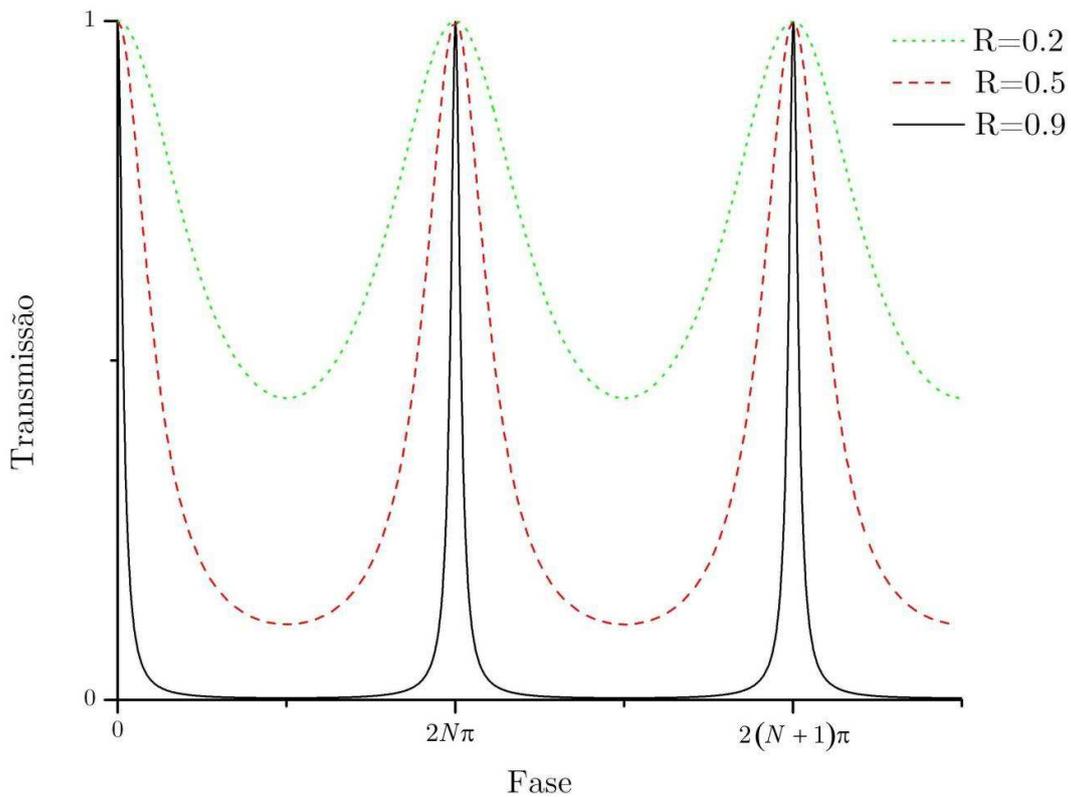


Figura 0.6 - Gráfico da Função de Airy fornecendo a fração da luz transmitida em função do caminho ótico  $nd$  para  $R=0,9$ ,  $R=0,5$  e  $R=0,2$ .

Se o argumento  $\phi/2$  do *seno* da função de Airy for um múltiplo de  $\pi$ , a função atingirá seu máximo valor para todo qualquer valor da função  $F$ . Se o valor da refletância  $R$  for muito pequeno, o valor de  $F$  será muito pequeno, implica dizer que as franjas de interferência serão indistinguíveis. No entanto se o valor de  $R$  for próximo de 1,  $F$  será grande, conseqüentemente a distância entre franjas de interferência será grande.

A condição para que a franja tenha intensidade máxima é dada por:

$$\frac{\phi}{2} = N\pi . \quad (4.29)$$

Em que  $N$  é um inteiro; e a Equação 4.29 é equivalente à:

$$2N\pi = \frac{4\pi}{\lambda} dn_2 \cos \theta_2 \quad (4.30)$$

e  $N$  é conhecido como a *ordem de interferência*.

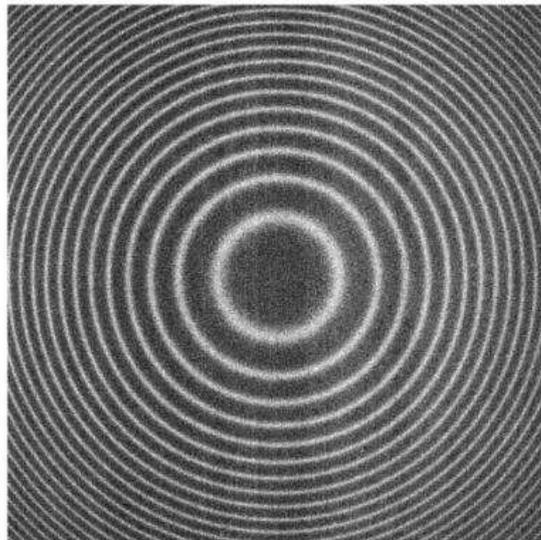


Figura 0.7 - Típica imagem capturada por um IFP.

Fonte: MAKELA et. al. (2011).

## 4.5 DESLOCAMENTO DOPPLER

Quando se tem átomos ou moléculas em um gás de baixa pressão, existe um frequência quase monocromática  $\nu_0$  que é emitida de um conjunto de átomos. Se o átomo se move com velocidade relativa  $v$  na direção ou afastando-se do receptor, o observador vai identificar uma frequência da forma:

$$\nu = \nu_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right). \quad (4.31)$$

Sendo o sinal + e - usado para indicar que a onda está se propagando na direção do observador ou para indicar que a onda está se afastando do observador, respectivamente, como uma velocidade  $c$ .

Sabendo que  $v = \lambda\nu$ , a Equação 4.31 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\left( 1 - \frac{v}{c} \right)}. \quad (4.32)$$

Sendo  $\lambda_0$  o comprimento de onda da fonte. Determinando a fonte e a posição do receptor, pode-se calcular a velocidade da fonte através da equação abaixo:

$$v = \left( 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right) c. \quad (4.33)$$

Com a equação acima, pode-se determinar a velocidade do vento termosférico utilizando o Interferômetro Fabry-Perot.

## 4.6 DESLOCAMENTO BROADENING

O deslocamento broadening é uma ampliação das linhas espectrais devido ao efeito Doppler causado pela distribuição da velocidade de átomos ou moléculas. As diferentes velocidades que as partículas experimentam (devido ao movimento térmico das partículas) resultam em deslocamentos diferentes. Este deslocamento depende da frequência do espectro, massa da partícula e da temperatura, que pode ser utilizada para inferir a temperatura do corpo emissor. O movimento térmico faz com que a partícula se mova nas mais diversas direções, inclusive na direção do observador, e assim, emitindo uma radiação que será observada com frequência maior que a do emissor. Da mesma forma quando o emissor afasta-se, faz com que a frequência seja menor.

Para velocidades térmicas não relativísticas, o deslocamento Doppler para a frequência é dado pela seguinte equação:

$$v = \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda}\right)c. \quad (4.34)$$

Sendo  $\nu$  a frequência observada,  $\nu_0$  a frequência quase monocromática emitida do conjunto de átomos,  $v$  a velocidade do emissor para o observador e  $c$  a velocidade da luz.

A probabilidade de encontrar uma partícula com uma velocidade  $v$  dentro de um elemento de volume  $dv$  é dado pela seguinte equação.

$$P_v(v)dv. \quad (4.35)$$

Logo, a distribuição correspondente da frequência é dada por:

$$P_\nu(\nu)d\nu = P_v(v)\frac{dv}{d\nu}d\nu. \quad (4.36)$$

Sendo  $v = c \left( \frac{\nu}{\nu_0} - 1 \right)$  a velocidade na direção do observador, a equação pode ser reescrita na forma:

$$P_\nu(\nu)d\nu = P_\nu \left[ c \left( \frac{\nu}{\nu_0} - 1 \right) \right] \frac{d\nu}{d\nu} d\nu. \quad (4.37)$$

Reescrevendo o comprimento de onda ( $\lambda$ ) utilizando o limite não relativístico, tem-se que:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx -\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \Rightarrow d\lambda \approx -d\nu. \quad (4.38)$$

Com este resultado, a Equação 4.37 pode ser dada na forma:

$$P_\lambda(\lambda)d\lambda = \frac{c}{\lambda_0} P_\nu \left[ c \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \right] d\lambda. \quad (4.39)$$

Por outro lado, lembre que a distribuição de velocidade de Maxwell, é dada por:

$$P_\nu(\nu)d\nu = \sqrt{\frac{m}{2\pi K_B T}} e^{-\frac{m\nu^2}{2K_B T}} d\nu. \quad (4.40)$$

Sendo  $m$  a massa da partícula emissora,  $K_B$  a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura.

Substituindo a Equação 4.40 na Equação 4.39, tem-se que:

$$P_\nu(\nu)d\nu = \frac{c}{\nu_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi K_B T}} e^{-\frac{m \left[ c \left( \frac{\nu}{\nu_0} - 1 \right) \right]^2}{2K_B T}} d\nu, \quad (4.41)$$

$$P_\nu(\nu)d\nu = \sqrt{\frac{mc^2}{2\pi K_B T \nu_0^2}} e^{-\frac{mc^2(\nu-\nu_0)^2}{2K_B T \nu_0^2}} d\nu. \quad (4.42)$$

A equação acima se aproxima de uma distribuição normal. Desta forma a variância pode ser escrita da forma:

$$\frac{1}{\sigma^2} = \frac{mc^2}{K_B T \nu_0^2}. \quad (4.43)$$

O desvio padrão dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{K_B T}{mc^2}} \nu_0. \quad (4.44)$$

## 4.7 ANÁLISE DOS ANÉIS

As imagens produzidas pelo IFP são analisadas para extrair o deslocamento e espalhamento Doppler, a intensidade da emissão do OI 630,00 nm e o *background*. No entanto, é necessário primeiro converter as imagens geradas pela *CCD*, que estão em coordenadas retangulares (2D), em interferogramas em uma dimensão (1D) por meio do algoritmo descrito por Makela et al.(2011).

Para converter as imagens de 2D para 1D utiliza-se um interferograma obtido através da medição de um laser de HeNe, do qual será inferido a função do instrumento para cada ordem de interferência (N), esta é necessária para determinar a localização do centro dos anéis e o deslocamento sofrido pelos mesmos devido à variação da temperatura do ambiente.

Uma vez localizado o centro dos anéis, a imagem gerada pela *CCD*, o qual ilumina uma área  $A$  do chip da *CCD*, é dividida em um determinado número de

anéis ( $n_{anéis} \sim 500$ ). O raio de cada área circular é escolhido de forma que, cada círculo tenha o mesmo valor de área. O raio da  $i$ -ésima área circular é dada por:

$$r_i = \sqrt{i \frac{A_i}{\pi}}, \quad (4.45)$$

sendo  $A_i$  a área da  $i$ -ésima área circular. A *CCD* do IFP possui uma resolução de 1024 x 1024 pixels, o que fornece uma imagem com um total de 12 anéis completos, com isso, tomando  $n_{anéis} \sim 500$  tem-se, aproximadamente, 40 áreas circulares para cada ordem de interferência. Feito a divisão da imagem gerada pela *CCD*, a intensidade dos pixels de cada área circular serão somadas e depois normalizadas pelo o número total de pixels, neste momento valores absurdos de intensidade causados por raios cósmicos ou estrelas no campo de visão do IFP são desconsiderados. O resultado deste processo é um diagrama em uma dimensão (1D) (*spectral bin* em função da intensidade) do qual é analisado o efeito Doppler e estimada a temperatura. Na Figura 4.8, tem-se um interferograma gerado a partir de uma medição do laser. Ainda na Figura 4.8 pode ser visto dois gráficos, um a esquerda e outro abaixo da imagem gerada pela *CCD* que mostram a integração do sinal através das linhas verticais e horizontais, respectivamente, que cortam a imagem (PAULINO, 2012).

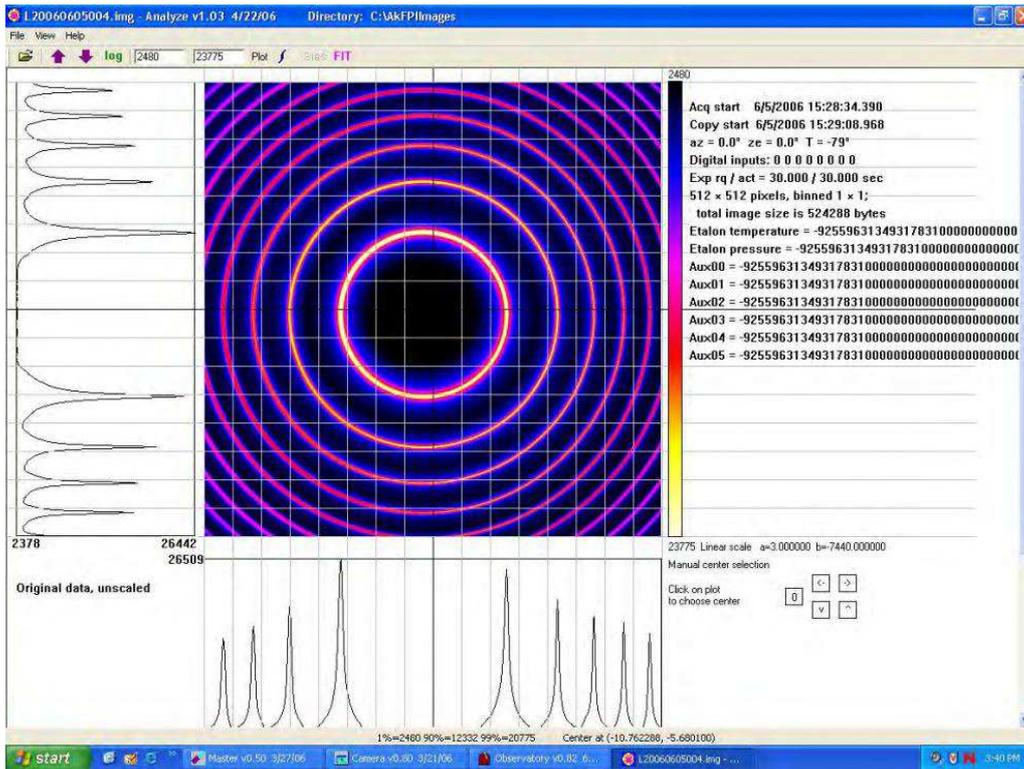


Figura 0.8 - Interferograma de uma medição do laser. Ainda da figura pode ser visto dois gráficos, um a esquerda e outro abaixo da imagem gerada pela CCD que mostram a integração do sinal através das linhas verticais e horizontais, respectivamente, que cortam a imagem.  
 Fonte: PAULINO (2012).

Após transformar o interferograma de 2D para 1D, utiliza-se a análise descrita por Killen e Hays (1984) para calcular o número de contagem ( $N_i$ ) do  $i$ -ésimo *spectral bin*, dada pela equação abaixo:

$$N_i = \frac{A_0 \Omega_i t Q_i T_{oi} x 10^6}{4\pi} \int_0^\infty T_F(\lambda) \Psi(\lambda, \theta_i) Y(\lambda) d\lambda + B_i. \quad (4.46)$$

Os parâmetros da Equação 4.46 estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 0.2 - Parâmetro da função de contagem.

Parâmetros da função de contagem - $N_i$	
$A_0$	Área do chip da <i>CCD</i> iluminada
$\Omega_i$	Campo de visão da $i$ -ésima ordem de interferência
$t$	Tempo
$Q_i$	Eficiência quântica da $i$ -ésima ordem de interferência
$T_{oi}$	Transmissão ótica do instrumento
$T_F(\lambda)$	Função de transmissão do filtro de interferência ( $\lambda = 630,00$ nm)
$\Psi(\lambda, \theta_i)$	Função do equipamento
$\theta_i$	Ângulo submetido pelo detector do $i$ -ésimo anel na lente convergente
$Y(\lambda)$	Distribuição espectral da emissão do OI 630,00 nm
$B_i$	<i>Background</i>

Fonte: KILLEN e HAYS (1984).

Sendo  $Y(\lambda)$  a distribuição espectral da emissão do OI 630,00 nm:

$$Y(\lambda) = \frac{\mathfrak{R}_0 e^{-\left(\frac{\lambda-\lambda_i}{\Delta\lambda_T}\right)^2}}{\sqrt{\pi}\Delta\lambda_T} + \left. \frac{\partial\mathfrak{R}_0}{\partial\lambda} \right|_0. \quad (4.47)$$

O primeiro termo da equação acima corresponde a Gaussiana normalizada correspondente à emissão térmica. Sendo  $\mathfrak{R}_0$  a intensidade da emissão do OI 630,00 nm (dada em Rayleighs),  $\partial\mathfrak{R}_0/\partial\lambda$  o termo de correção da emissão contínua,  $\lambda$  comprimento de onda da emissão em repouso,  $\lambda_i$  comprimento de onda observado e  $\Delta\lambda_T$  comprimento térmico dado por:

$$\Delta\lambda_T = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \frac{\lambda_i}{c}. \quad (4.48)$$

Sendo  $k$ ,  $T$ ,  $m$  e  $c$ , respectivamente, a constante de Boltzmann, a temperatura, a massa e a velocidade da luz.

A Função do equipamento ( $\Psi(\lambda, \theta_i)$ ) pode ser reescrita em uma série de Fourier na forma:

$$\Psi(\lambda, \theta_i) = a_{0i} + \sum_{n=i}^{\infty} a_{ni} \cos \left( \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda_l - \lambda_r) + 2\pi n_i \left( \frac{\mu d}{\lambda_l} (\theta_1^2 - \theta_i^2) \right) \right) + \sum_{n=i}^{\infty} b_{ni} \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda_l - \lambda_r) + 2\pi n_i \left( \frac{\mu d}{\lambda_l} (\theta_1^2 - \theta_i^2) \right) \right). \quad (4.49)$$

Sendo  $a_{0i}$ ,  $a_{ni}$  e  $b_{ni}$  os coeficientes de Fourier e contém toda informação necessária para descrever a função do equipamento,  $\lambda_r$  é um comprimento de onda arbitrário de referência e  $\theta_i$  é dado por:

$$\theta_i = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{f_0} \left( \frac{r_i^2 + r_{i+1}^2}{2} \right)^{1/2} \right], \quad (4.50)$$

$f_0$  é o comprimento focal da lente convergente,  $r_i$  é o raio do detector do  $i$ -ésimo anel.

Aplicando a convolução entre  $Y(\lambda)$  e  $\Psi(\lambda, \theta_i)$  pode-se derivar a resposta do equipamento para a linha de emissão, dada por:

$$N_i = C_{oi} t \left( \Delta\lambda_F \frac{\partial \Re}{\partial \lambda} \Big|_0 a_{oi} \left( \frac{1-R}{1+R} \right) + T_{Fo}(\lambda_l) \Re_0 \left\{ a_{oi} + \sum_{n=i}^{\infty} \left[ a_{ni} \cos \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda_l - \lambda_r + \phi_i) \right] \right\} e^{[-n^2 G^2(T)]} \right) + C_{oi} t \left( T_{Fo}(\lambda_l) \Re_0 \sum_{n=i}^{\infty} \left[ b_{ni} \cos \frac{2\pi n}{\Delta\lambda_0} (\lambda_l - \lambda_r + \phi_i) \right] e^{[-n^2 G^2(T)]} \right), \quad (4.51)$$

Por simplicidade, admitindo  $\lambda_r = 0$ , resulta em:

$$U_1 = C_{oi} t \Delta\lambda_F \frac{\partial \Re}{\partial \lambda} \Big|_0 a_{oi} \left( \frac{1-R}{1+R} \right), \quad (4.52)$$

$$U_2 = C_{oi} a_o t T_{Fo} \mathfrak{R}_0, \quad (4.53)$$

$$U_3 = \frac{K \lambda_l}{\Delta \lambda_0}, \quad (4.54)$$

$$U_4 = G(T) = \frac{\pi}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \frac{\lambda_l}{\Delta \lambda_0}. \quad (4.55)$$

Nas Equações 4.52 e 4.53 tem-se:

$$C_{oi} = A_0 \Omega_i Q_i T_{oi} \cdot 10^6 \frac{1}{4\pi}, \quad (4.56)$$

$$\Delta \lambda_F = \int_0^\infty T_F(\lambda) d\lambda. \quad (4.57)$$

Sendo  $K$  o número de elementos espectrais em um anel do interferograma em 1D e  $\Delta \lambda_F$  o comprimento espectral do filtro de interferência utilizado no IFP.

Para utilizar a expansão de Fourier de modo a simplificar  $\Psi(\lambda, \theta_i)$ , os coeficientes de Fourier derivados da imagem gerada do laser HeNe devem ter um deslocamento de fase de forma que, o pico de reconstrução do espectro do laser esteja localizado no começo ou no final de uma franja de interferência. Portanto considere um deslocamento de fase ( $\beta$ ) dada por:

$$\beta_n = \frac{2\pi}{K} \left( 1 + \frac{Pico_{emissão}}{Pico_{calibração}} \right). \quad (4.58)$$

De modo que:

$$a'_{ni} = a_{ni} \cos \beta_n + b_{ni} \sen \beta_n, \quad (4.59)$$

$$b'_{ni} = -a_{ni} \text{sen} \beta_n + b_{ni} \cos \beta_n. \quad (4.60)$$

Reescrevendo  $N_i$ , obtém-se:

$$N_i = t(U_1 + U_2 \left[ a_0 + \sum_{n=1}^{n_{\max}} (a'_n \cos [2\pi n(\phi_i + U_3)] + b'_n \text{sen} [2\pi n(\phi_i + U_3)]) e^{-n^2 U_4^2} \right] + B_i) \quad (4.61)$$

Neste método cada ordem de interferência é isolada e analisada separadamente. Por fim utiliza-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt para calcular os valores de  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  e  $U_4$ , e após 5 a 9 iterações do algoritmo é estimado os valores para os 4 parâmetros. O deslocamento Doppler é dado por:

$$v = -c U_3 \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0 K}. \quad (4.62)$$

Da equação acima se pode calcular a intensidade da emissão e da Equação 4.63 a temperatura, da seguinte forma:

$$T = \left( U_4 \frac{c}{\pi} \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \right)^2 \frac{m}{2k}. \quad (4.63)$$

## 4.8 TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO

Nesta seção será descrito a metodologia empregada no cálculo do vento zonal e meridional por meio de duas técnicas distintas, bem como o tratamento dos dados utilizado para a realização deste trabalho.

### 4.8.1 MODO CARDEAL

Nesta técnica de observação é utilizado apenas um IFP para a medição do vento e temperatura. O IFP possui um ciclo de observação que consiste em medidas na direção zenital, seguida por medições nas direções cardeais. Ainda neste ciclo, é incluído medida do laser necessária para a calibração das imagens geradas pelo interferômetro. Ao todo, um ciclo de observação requer cerca de 27 minutos pra ser realizado.

### VENTO VERTICAL

Uma medida na direção zenital fornece o vento vertical ( $w$ ) mais o fator  $\beta$ . O fator  $\beta$  está associado à imprecisão da medida devido à variação de temperatura sofrida pelo *Etalon* e o sistema ótico. Uma medida na direção zenital pode ser representada por:

$$v_{zenital} = w + \beta. \quad (4.64)$$

### VENTO NA LINHA DE VISADA

Apos a medição na direção zenital o *Sky Scanner* do interferômetro se posiciona para medição nas direções Norte, Sul, Leste e Oeste. O vento medido em cada direção pode ser representado em termos do vento zonal, meridional, vento vertical e o fator  $\beta$ . Este vento medido em cada direção é denominado de *vento da linha de visada* ( $v_{vis}$ ).

A fim de entender a formação do  $v_{vis}$ , considere uma situação geral como mostrada na Figura 4.9. Sendo P o local da medição do vento no espaço de coordenadas cartesianas,  $X$  representa a componente que aponta na direção do

Norte (meridional),  $Y$  a componente que aponta para o Leste (zonal) e  $Z$  a componente na direção do zênite (vertical);  $\alpha$  é o ângulo formado entre  $\vec{v}_{vis}$  e a projeção do mesmo no plano  $XY$  e  $\theta$  é o ângulo formado entre a projeção de  $\vec{v}_{vis}$  no plano  $XY$  e o eixo  $X$ .

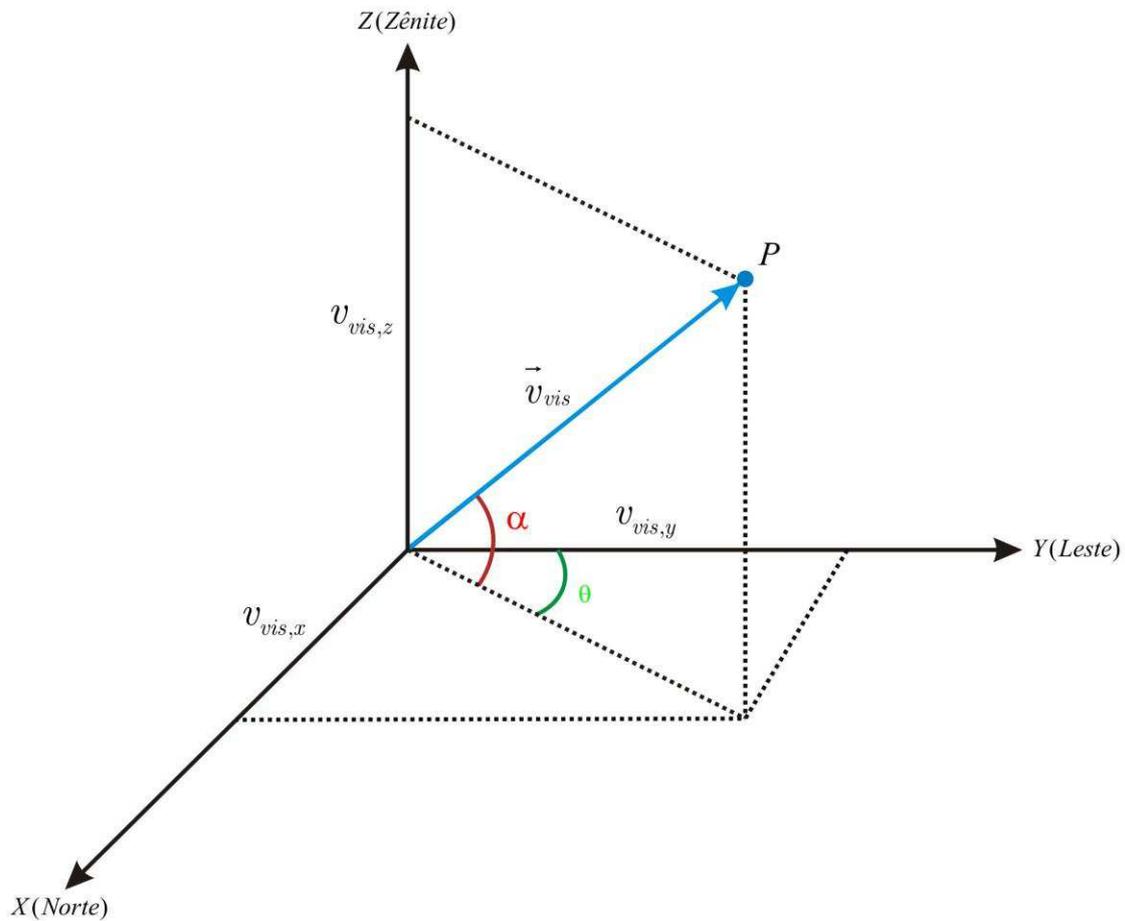


Figura 0.9 - Representação do vetor vento na linha de visada.

O vetor vento na linha de visada pode ser escrito segundo suas projeções ao longo dos eixos  $XYZ$  da seguinte forma:

$$\vec{v}_{vis} = v_{vis,x} \hat{i} + v_{vis,y} \hat{j} + v_{vis,z} \hat{k}, \quad (4.65)$$

$$\vec{v}_{vis} = v_{vis} \left( \cos \alpha \sin \theta \hat{i} + \cos \alpha \cos \theta \hat{j} + \sin \alpha \hat{k} \right). \quad (4.66)$$

Sendo  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$  e  $\hat{k}$  os vetores unitários que aponta na direção de  $X$ -positivo,  $Y$ -positivo e  $Z$ -positivo, respectivamente.

Definindo  $\vec{l} = \cos \alpha \text{sen} \theta \hat{i} + \cos \alpha \cos \theta \hat{j} + \text{sen} \alpha \hat{k}$  a Equação 4.66 pode ser reescrita como:

$$\vec{v}_{vis} = v_{vis} \vec{l}. \quad (4.67)$$

Note que, um vetor vento qualquer pode ser escrito em termo do vento zonal ( $u$ ), meridional ( $v$ ) e zenital ( $v_{zenital}$ ) dada por:

$$\vec{V} = u \hat{i} + v \hat{j} + v_{zenital} \hat{k}. \quad (4.68)$$

Com as Equações 4.67 e 4.68, o vetor vento na linha de visada pode ser reescrito como a projeção do vetor  $\vec{V}$  sobre o vetor  $\vec{l}$ , logo:

$$v_{vis} = \vec{V} \cdot \vec{l}, \quad (4.69)$$

$$v_{vis} = u \cos \alpha \text{sen} \theta + v \cos \alpha \cos \theta + v_{zenital} \text{sen} \alpha. \quad (4.70)$$

Lembre que, uma medida na direção zenital feita pelo IFP é dada por:

$$v_{zenital} = w + \beta. \quad (4.71)$$

Portanto, o vento da linha de visada do IFP pode ser escrito como:

$$v_{vis} = u \cos \alpha \text{sen} \theta + v \cos \alpha \cos \theta + w \text{sen} \alpha + \beta, \quad (4.72)$$

sendo  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $\beta$  o vento zonal, meridional, vertical e o fator associado à incerteza da medida, respectivamente.

## VENTO HORIZONTAL

O interferômetro localizado em São João do Cariri está direcionado para o Norte, ou seja, os ângulos azimutais para as observações feitas no Norte, Sul, Leste e Oeste são, respectivamente,  $0$ ,  $\pi$ ,  $\pi/2$  e  $3\pi/2$ . Por exemplo, a Equação 4.72 pode ser reescrita para o cálculo do vento na direção Leste ( $\theta = \pi/2$ ) da seguinte forma:

$$v_{vis,Leste} = u \cos \alpha + w \operatorname{sen} \alpha + \beta. \quad (4.73)$$

Supondo que  $w$  e  $\beta$  são constantes durante a observação, pode-se subtrair o  $v_{zenital}$  da Equação 4.73, assim:

$$v_{vis,Leste} - (w + \beta) = u \cos \alpha + w(\operatorname{sen} \alpha - 1). \quad (4.74)$$

Note que o vento na linha de visada ainda está escrito em termo de  $w$  e  $\beta$ . No entanto, considerando o vento vertical e o fator  $\beta$  nulo a equação do vento da linha de visada pode ser, finalmente, reescrita para o vento para o Leste (zonal), logo:

$$u = \frac{v_{vis,Leste}}{\cos \alpha}. \quad (4.75)$$

Supondo o vento constante para o campo de visão do equipamento, implica que o vento para Oeste é igual ao vento para Leste, mas com o sinal invertido, ou seja:

$$v_{vis,Oeste} - (w + \beta) = -u \cos \alpha + w(\operatorname{sen} \alpha - 1). \quad (4.76)$$

O mesmo método pode ser realizado para o cálculo do vento nas direções Norte e Sul.

Perceba que somando as Equações 4.74 e 4.76 pode-se encontrar um valor para o vento vertical ( $w$ ) em função dos ventos para Leste e Oeste na linha de visada, da seguinte forma:

$$v_{vis,Leste} - (w + \beta) + v_{vis,Oeste} - (w + \beta) = u \cos \alpha + w(\operatorname{sen} \alpha - 1) - u \cos \alpha + w(\operatorname{sen} \alpha - 1), \quad (4.77)$$

$$v_{vis,Leste} + v_{vis,Oeste} - 2(w + \beta) = 2w(\operatorname{sen} \alpha - 1),$$

$$w = \frac{v_{vis,Leste} + v_{vis,Oeste} - 2\beta}{2\operatorname{sen} \alpha}. \quad (4.78)$$

O método abordado nesta seção (que pode ser aplicado de maneira análoga para o IFP de cajazeiras) requer algumas aproximações, tais como: vento vertical, vento zonal e meridional constantes para todo o campo de visão do IFP e durante todo o ciclo de observação; e fator  $\beta$  nulo. Obviamente, essas aproximações são questionáveis já que o campo de visão do IFP é de aproximadamente 354 km x 354 km e um ciclo de observação requer cerca de 27 minutos. A Figura 4.10 ilustra uma medição para a direção Leste do interferômetro (no topo de um *container*) em torno do pico de emissão (250 km) do OI 630,00 nm. Para um ângulo de elevação de 45°, a distância entre IFP e a perpendicular do ponto de observação é de aproximadamente 250 km. Devido o interferômetro observar em 4 direções diferentes (Norte, Sul, Leste e Oeste) o campo de visão do instrumento é de aproximadamente 354 km x 354 km. Pode-se aumentar o ângulo de elevação de forma a diminuir o campo de visão, mas aumentaria a incerteza no cálculo do vento nas direções cardeais.

De forma a reduzir o número de aproximação utilizado no modo individual de observação, foi proposto uma nova técnica de observação onde dois IFP's obser-

vam, simultaneamente, uma região da atmosfera em comum. Os detalhes desta técnica serão abordados na próxima seção deste capítulo.

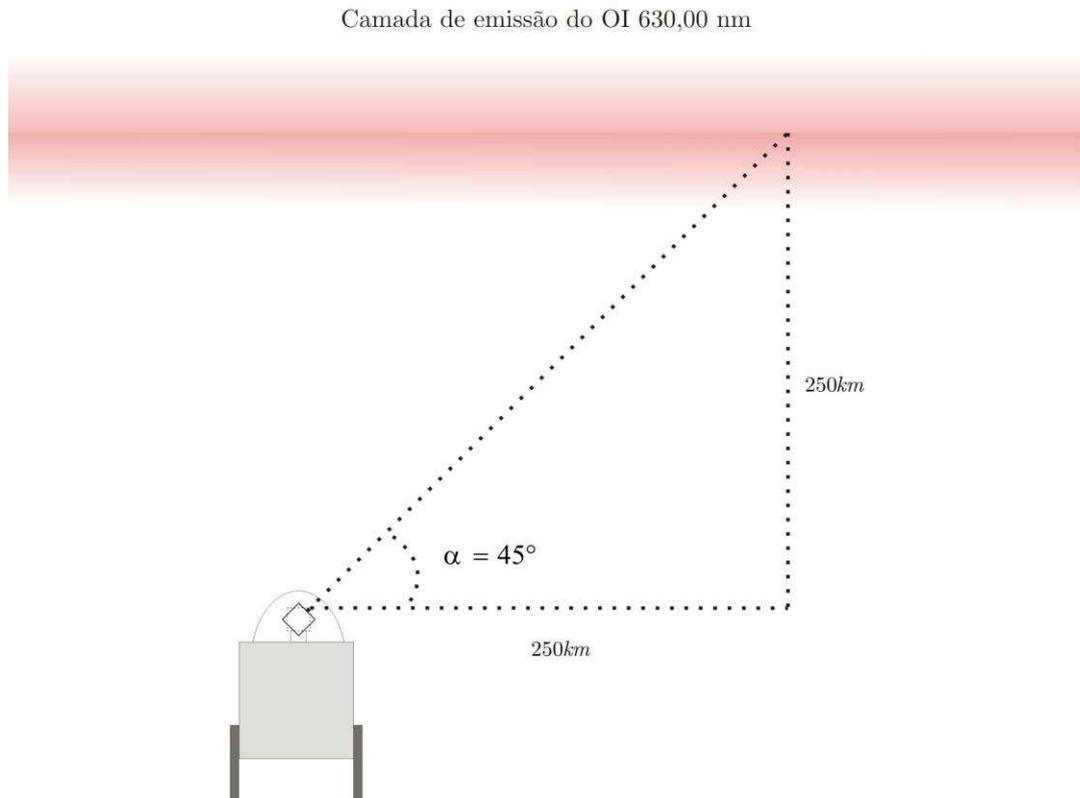


Figura 0.10 - Ilustração de uma medição para uma direção do interferômetro (no topo de um *container*) em torno do pico de emissão (250 km) do OI 630,00 nm.

#### 4.8.2 MODO VOLUME COMUM

Nesta nova técnica de observação é utilizado dois IFP's para a medição do vento e temperatura. Os interferômetros localizados em Cajazeiras e São João do Cariri observam, simultaneamente, na direção zenital, Norte, Sul e em um ponto central entre os dois instrumentos. Os interferômetros estão calibrados de forma a observar uma mesma região da camada de emissão, com exceção para a medição na direção zenital. As medições simultâneas de uma mesma região na direções Norte, Sul e no ponto central serão aqui denominadas de setor Norte (SN), setor Sul (SS) e setor central (SC). Os detalhes deste método podem ser

visto na Figura 4.11, onde está indicada a localização dos IFP's, os setores Norte, Sul e central, e as projeções destes pontos de observação no solo. Um ciclo de observação neste modo requer cerca de 22 minutos para ser realizado.



Figura 0.11 - Ilustração dos Setores de observação Norte, Sul e central. Onde as linhas amarelas representam as linhas de visada dos interferômetros e a linhas pretas representam as projeções as linhas amarelas no solo.

Fonte: Google Earth.

## VENTO VERTICAL

Da mesma forma do modo individual uma medida na direção zenital fornece o vento vertical ( $w$ ) mais o fator  $\beta$ . Em seguida os interferômetros observam uma sequência de 3 pontos em comum, como mostrado na Figura 4.11. Para uma medida no ponto central entre os interferômetros, localizados em Cajazeiras e São João do Cariri, os ângulos azimutais possuem a seguinte relação:

$$\theta_2 = \theta_1 + \pi. \quad (4.79)$$

Sendo o índice 1 subscrito representando o interferômetro situado em Cajazeiras e o índice 2 representando o Interferômetro de São João do Cariri. Supondo o vento vertical constante, uma medição em um ponto central pelo IFP 1 pode ser escrita como:

$$v_{SC,1} = [usen\theta + v \cos \theta] \cos \alpha + wsen\alpha + \beta. \quad (4.80)$$

Utilizando a relação entre os ângulos azimutais, uma medição com o IFP 2 pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_{SC,2} = [usen(\theta + \pi) + v \cos(\theta + \pi)] \cos \alpha + wsen\alpha + \beta, \quad (4.81)$$

$$= -[usen\theta + v \cos \theta] \cos \alpha + wsen\alpha + \beta. \quad (4.82)$$

Subtraindo o vento vertical das Equações 4.80 e 4.82, e somando-as, é fácil ver que:

$$w = \frac{v_{SC,1} + v_{SC,2} - 2\beta}{2sen\alpha}. \quad (4.83)$$

Note que a equação acima é semelhante à Equação 4.78 obtida na seção anterior, a diferença é que o  $v_{SC,1}$  e  $v_{SC,2}$  são medidos em uma mesma região da camada de emissão. Logo, este novo método dispensa a necessidade do vento da linha de visada ser constante para todo o campo de visão do IFP. No entanto, ainda requer a aproximação do vento zenital constante.

## VENTO HORIZONTAL

Calculado o vento vertical pode-se calcular o vento horizontal e, conseqüentemente, o vento zonal e meridional para a região Norte e Sul. Mantendo a

aproximação de vento vertical constante durante todo o ciclo de observação, o vento na linha de visada para cada instrumento pode ser escrito da forma:

$$v_1 = [usen\theta_1 + v_1 \cos \theta_1] \cos \alpha_1 + wsen\alpha_1 + \beta, \quad (4.84)$$

$$v_2 = [usen\theta_2 + v_2 \cos \theta_2] \cos \alpha_2 + wsen\alpha_2 + \beta. \quad (4.85)$$

Sendo o índice subscrito utilizado para diferenciar os interferômetros. Perceba que o termo entre colchetes é justamente a contribuição do vento horizontal no cálculo do vento na linha de visada, ou seja:

$$v_{h1} = usen\theta_1 + v \cos \theta_1, \quad (4.86)$$

$$v_{h2} = usen\theta_2 + v \cos \theta_2. \quad (4.87)$$

Nestas equações  $v_{h1}$  e  $v_{h2}$  os ventos horizontais medidos pelos interferômetros de Cajazeiras e São João do Cariri, respectivamente. As equações acima podem ser reescritas na forma matricial, da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} v_{h1} \\ v_{h2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} sen\theta_1 & \cos \theta_1 \\ sen\theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad (4.88)$$

$$\begin{pmatrix} v_{h1} \\ v_{h2} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}. \quad (4.89)$$

Em que, M é dado por:

$$M = \begin{pmatrix} sen\theta_1 & \cos \theta_1 \\ sen\theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix}. \quad (4.90)$$

Aplicando a matriz inversa de  $M$  ( $M^{-1}$ ) em ambos os membros na equação acima, obtém-se:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} v_{h1} \\ v_{h2} \end{pmatrix}. \quad (4.91)$$

A matriz  $M$  admite inversa desde que seu determinante seja diferente de zero. O determinante da matriz  $M$  será zero se  $\theta_1$  ou  $\theta_2$  for igual à zero ou múltiplo de  $\pi/2$ . No entanto, este não é o caso dos interferômetros utilizado neste trabalho, logo, a inversa da matriz  $M$  existe. Portanto a Equação 4.91 permite calcular o vento zonal e meridional, tanto no setor Norte como no setor Sul. Na Tabela 4.3 estão listados os ângulos azimutais e de elevação para os IFP localizados em Cajazeiras e São João do Cariri para o cálculo do vento no zênite, setor Norte, setor Sul e central.

Tabela 0.3 – Ângulos azimutais e de elevação utilizados pelos os interferômetros localizados em Cajazeiras e São João do Cariri.

	Cajazeira		S. J. Cariri	
	Azimute	Elevação	Azimute	Elevação
Zênite	0,0°	0,0°	0,0°	0,0°
SC	-75,8°	-25,8°	-75,8°	25,8°
SN	59,1°	34,4°	-30,9°	34,4°
SC	-30,9°	-34,4°	-59,1°	-34,1°

#### 4.9 TRATAMENTO DOS DADOS DO IFP

O tratamento dos dados obtidos pelo IFP requer a manipulação de um grande volume de dados, visto que um interferômetro operando no modo cardeal fornece dados de 5 direções distintas. No caso do modo volume comum, cada Fabry-Perot fornece dados de 4 direções. Desta forma, foi utilizado um software de processamentos de dados no cálculo do vento zonal e meridional. O cálculo do vento zonal e meridional fornecidos do modo cardeal é feito de maneira mais direta, por exemplo, através da Equação 4.75 e dos dados fornecidos pelo IFP

pode-se calcular  $u$  (vento zonal) facilmente. Já o cálculo dos ventos (zonal e meridional) utilizando a técnica de volume comum requer algumas considerações antes de se encontrar  $u$  e  $v$ . Portanto, as atenções nesta seção serão voltadas para o cálculo dos ventos no modo volume comum.

Como já foi mencionado, o modo volume comum consiste de medidas simultâneas nos setores Norte, Sul e central utilizando dois interferômetros, além de medidas na direção zenital. No entanto, para o período de dados utilizados neste trabalho ocorrem dias em que um dos IFP's não coletou dados, devido à problemas técnicos. E ainda, houve dias em que ocorreu dessincronização entre os ciclos de observação entre os interferômetros. A seguir será descrito as etapas utilizadas no tratamento dos dados de IFP para o modo volume comum.

Sequência utilizada no tratamento dos dados

- Dados do IFP: O interferômetro fornece uma planilha de dados com as seguintes informações: ano, dia do ano, hora, ângulo de elevação, ângulo azimutal, vento horizontal, erro do vento horizontal, temperatura, erro da temperatura, intensidade, erro da intensidade, *background* e erro do *background*. Como se trata do modo volume comum, tem-se duas planilhas de dados para cada sítio de observação (uma planilha para Cajazeiras e outra para São João do Cariri) e para cada noite de observação.
- Dificuldades encontradas no modo volume comum: Os interferômetros medindo em momentos diferentes, fornecendo quantidades de dados diferentes e dados para apenas um dia de observação.
- Metodologia adotada: Escolhe-se o dado de vento na planilha do sítio com o menor número de dados como o “dado de referência”. Em seguida, escolhe-se para o cálculo do vento zonal e meridional, o valor (na segunda

planilha) mais próximo da hora do “dado de referência”, dentre um intervalo de  $\pm 10$  minutos.

De forma a tornar a explicação a respeito do método utilizado mais didático, considere o exemplo abaixo para o cálculo do vento zonal e meridional no setor Norte (SN):

- a) Assuma que o dado de referência esteja na planilha de dados de Cajazeiras. Em seguida, são selecionados os dados de vento na planilha de São João do Cariri em um intervalo de tempo de  $\pm 10$  minutos em torno da hora do “dado de referência”. Na Tabela 4.4, tem-se um exemplo do agrupamento dos dados utilizados no cálculo do vento zonal e meridional no modo volume comum. Na coluna de Cajazeiras tem-se o dado de referência e na coluna de São João do Cariri os “pretendentes” ao dado que será utilizado no cálculo do vento zonal e meridional.

Tabela 0.4 - Agrupamento dos “pretendentes” ao dado que será cálculo do vento zonal e meridional no modo volume comum.

Cajazeiras				São João do Cariri			
Ano	Dia do ano	Hora	Vento	Ano	Dia do ano	Hora	Vento
				2011	200	19:08:51	22.26
				2011	200	19:10:46	-55.11
2011	200	19:18:21	02.29	2011	200	19:13:22	-37.48
				2011	200	19:19:59	25.00
				2011	200	19:23:02	78.69

- b) Dentre os dados da coluna de São João do Cariri é escolhido o dado com a hora mais próxima da hora do “dado de referência” na coluna de Cajazeiras, ou seja:

Tabela 0.5 - Escolha dados utilizados no cálculo do vento zonal e meridional no modo volume comum.

Cajazeiras				São João do Cariri			
Ano	Dia do ano	Hora	Vento	Ano	Dia do ano	Hora	Vento
				2011	200	19:08:51	22.26
				2011	200	19:10:46	-55.11
2011	200	19:18:21	02.29	2011	200	19:13:22	-37.48
				2011	200	19:19:59	25.00
				2011	200	19:23:02	78.69

c) Selecionados os dados de vento horizontal nos dados de Cajazeiras e São João do Cariri e utilizando os dados da Tabela 4.6 que fornece os ângulos de elevação e azimutal para cada setor de observação, pode-se, finalmente, calcular o vento zonal e meridional.

Ou seja, para o exemplo sugerido, os parâmetros para o cálculo do vento zonal e meridional no setor Norte são dados na tabela abaixo:

Tabela 0.6 - Dados utilizados, no exemplo, para o cálculo do vento zonal e meridional no setor Norte.

	Cajazeiras	São João do Cariri
Ano	2011	2011
Dia do ano	200	200
Hora	19:18:21	19:19:59
Ângulo de elevação	$\alpha_1 = 34,4^\circ$	$\alpha_2 = 34,4^\circ$
Ângulo azimutal	$\theta_1 = 59,1^\circ$	$\theta_2 = -30,9^\circ$
Vento horizontal	$v_{h1} = 02.29 \text{ m/s}$	$v_{h2} = 25.00 \text{ m/s}$

Portanto, aplicando os dados da Tabela 4.6 na equação abaixo, pode-se encontrar os valores de vento zonal e meridional.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} v_{h1} \\ v_{h2} \end{pmatrix},$$

Lembrando que M é dado por:

$$M = \begin{pmatrix} \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix}.$$

A mesma metodologia pode ser aplicada para o cálculo do vento zonal e meridional nos setores Sul e central.

#### 4.10 IONOSSONDA

Ionossondas são radares utilizados para investigar a estrutura e dinâmica da camada ionosférica terrestre. Uma ionossoda é formada basicamente por: antenas de reflexão e transmissão e um circuito para amplificar e processar os ecos recebidos. Este tipo de equipamento transmite pulsos eletromagnéticos em uma ampla faixa de frequência de 1 MHz a 20 MHz. Os pulsos transmitidos são refletidos em regiões onde a frequência do plasma ionosférico é igual a frequência do pulso transmitido pela ionossonda. De acordo com Ratcliffe (1958) o índice de refração de uma onda eletromagnética com frequência angular ( $\omega$ ) através de um plasma contendo cargas livres é dado por:

$$\mu^2 = 1 - \frac{4\pi}{\epsilon_0\omega^2} \sum_i \frac{N_i e_i^2}{m_i}. \quad (4.92)$$

Sendo  $N_i$  a densidade,  $e_i$  a carga e  $m_i$  a massa de uma determinada espécie do plasma. Para o caso da camada ionizada da atmosfera terrestre a equação acima pode ser reescrita considerando apenas os elétrons, por ter massa menor, são mais importantes para o cálculo do índice de refração, logo:

$$\mu^2 = 1 - \frac{4\pi}{\epsilon_0\omega^2} \frac{N_e e_e^2}{m_e}. \quad (4.93)$$

A onda eletromagnética formará um ângulo  $\theta$  com o plano no qual será refratado. Na região onde a densidade eletrônica for alta suficiente para reduzir o

índice de refração a  $\mu = \text{sen}\theta$ , a onda será refletida e retornará para o solo. Se a onda incidir perpendicularmente com a ionosfera, ou seja,  $\theta = 1$ , o que implica  $\mu = 0$ , obtém-se:

$$n = (\epsilon_0 m / 4\pi e^2) \omega^2 = 1,24 \times 10^{-8} f^2. \quad (4.94)$$

Sendo  $f$  a frequência da onda dada em Hz e  $n$  é a densidade em  $\text{cm}^{-3}$ . A Equação 4.94 representa também a frequência de ressonância do plasma com densidade eletrônica  $n$ , assim, para que uma onda eletromagnética seja refletida em um determinado nível da ionosfera, a frequência desta onda deve ser igual à frequência do plasma ionosférico.

Ao final de uma sondagem por parte da ionosonda, são gerados diagramas de altura de reflexão das ondas em função de sua frequência, conhecidos como ionogramas. As alturas de reflexão são calculadas com base no intervalo de tempo entre a transmissão do pulso e a recepção do eco, ou seja:

$$h' = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (4.95)$$

$h'$ ,  $c$  e  $\Delta t$  representam a altura virtual, velocidade de propagação do sinal transmitido pela antena da ionosonda e o intervalo de tempo entre o pulso transmitido e o eco recebido, respectivamente. O termo altura virtual surge devido o pulso eletromagnético sofrer uma desaceleração ao se propagar no plasma ionosférico. Portanto, a altura calculada através da expressão acima são alturas aparentes e, por este motivo, são chamadas de alturas virtuais (BERTONI, 2004).

Outros parâmetros podem ser extraídos de um ionograma, tais como: isolinhas de densidade, frequência crítica ( $f_oF2$ ), altura de pico de densidade da região F ( $h_mF2$ ) e velocidade de deriva vertical ( $\Delta hF/\Delta t$ ).

Na Figura 4.12 são apresentadas fotografias das antenas de transmissão e recepção da ionossonda pertencentes à unidade de Fortaleza do INPE.



Figura 0.12 - Fotografias das antenas de transmissão e recepção da ionossonda pertencentes à unidade de Fortaleza do INPE.

Fonte: Site do INPE – Fortaleza.

#### 4.11 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido utilizando medidas de ventos termosféricos obtidos na região equatorial através do Interferômetro Fabry-Perot, descrito no início deste capítulo. Foram utilizados dados de vento zonal e meridional para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2010 e 2011, período este, escolhido por conter uma boa sequência de dados tanto em 2010, como em 2011. As observações da luminescência atmosférica, de onde são extraídos os dados de vento e temperatura através do interferômetro, ocorrem sempre durante a noite. Em dias em que há Lua, o interferômetro observa apenas nas direções em que está  $37^\circ$  fora da posição angular da Lua, para que não haja contaminação nas observações devido à luminosidade da mesma.

Cada sítio de observação fornece dados de vento zonal e meridional quando estão observando no modo cardeal. Quando os equipamentos estão configurados para observar no modo volume comum, tem-se dados de vento zonal e meridio-

nal para o setor Norte e dados de vento zonal e meridional para o setor Sul. Desta forma, tem-se dados de vento zonal e meridional de 4 maneiras diferentes. Têm-se dados de vento zonal e meridional para:

Modo cardeal.

- Cajazeiras,
- São João do Cariri,

Modo volume comum.

- Setor Norte,
- Setor Sul.

Em seguida, são feitas médias entre os ventos zonais de Cajazeiras e São João do Cariri, e médias entre o setor Norte e Sul. O mesmo procedimento é feito para o vento meridional. Portanto temos vento zonal e meridional no modo cardeal, e vento zonal e meridional no modo volume comum. Após o cálculo das médias é extraídos valores absurdos de vento, valores abaixo de -200 m/s e acima de 200 m/s são desconsiderados.

Determinado o vento zonal e meridional, os dados são organizados obedecendo a sequência temporal que foram medidos. Na Figura 4.13, é apresentado um exemplo de uma série temporal dos dados de vento zonal e meridional para o ano de 2011. Foram utilizados dados de: a) vento zonal e b) meridional medidos tanto no modo cardeal, como no modo volume comum na geração do gráfico abaixo.

A mesma metodologia de séries temporais é utilizada para dados de ionossonda localizada no INPE - Fortaleza. Diferentemente do Interferômetro Fabry-Perot, as observações feitas pela ionossonda ocorrem durante todo o dia com uma resolução temporal de 10 minutos.

Na Figura 4.14 é apresentado um exemplo de uma série temporal dos dados de: a) hmF2 (altura média da camada F2), b) h'F (altura virtual da camada F), e c) FoF2 (frequência de reflexão da camada F2) para o ano de 2011, obtidos através da ionossonda.

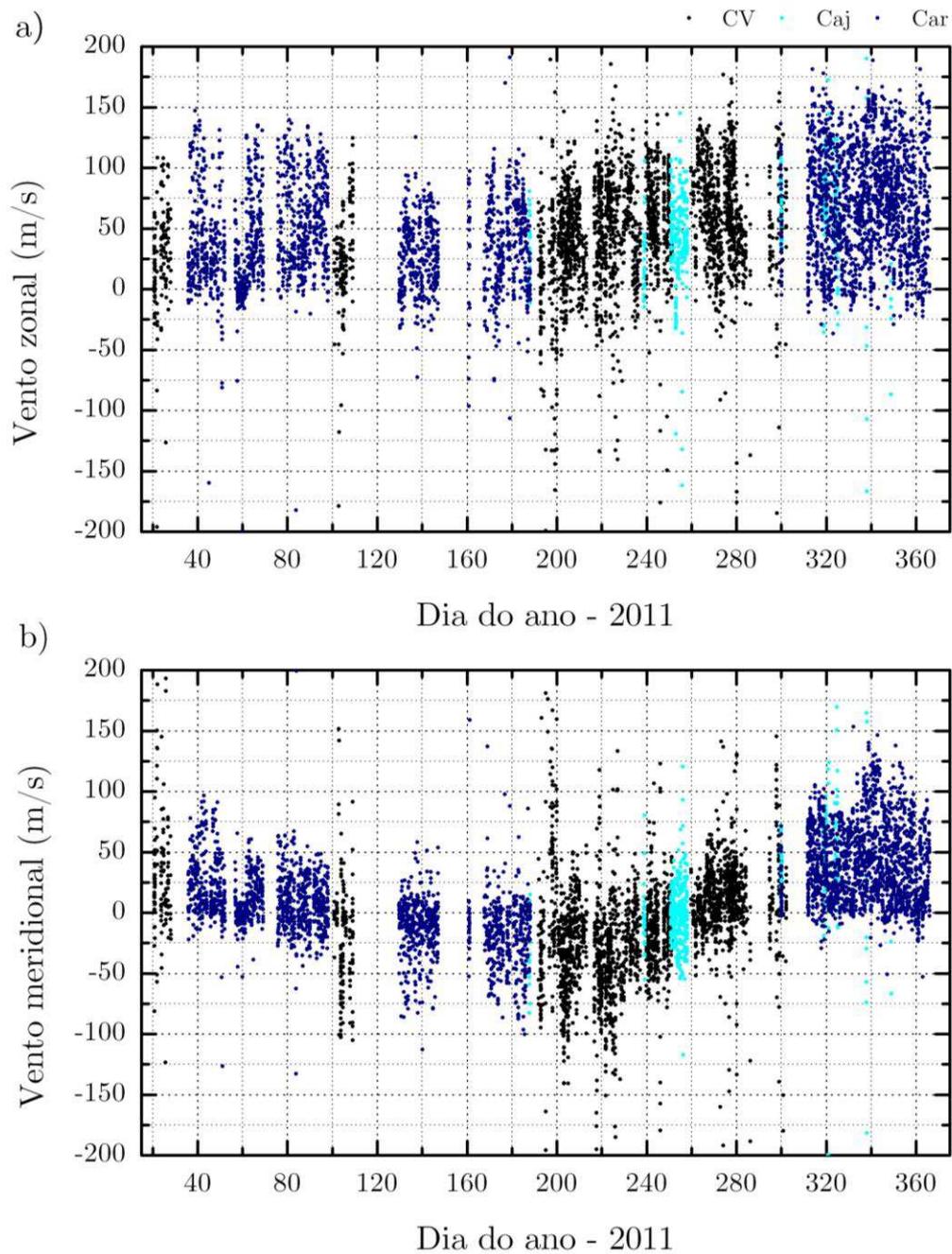


Figura 0.13 - Série temporal dos dados de vento zonal e meridional para o ano de 2011. Foram utilizados dados de vento a) zonal e b) meridional medidos tanto no modo cardeal, como no modo volume comum na geração do gráfico.

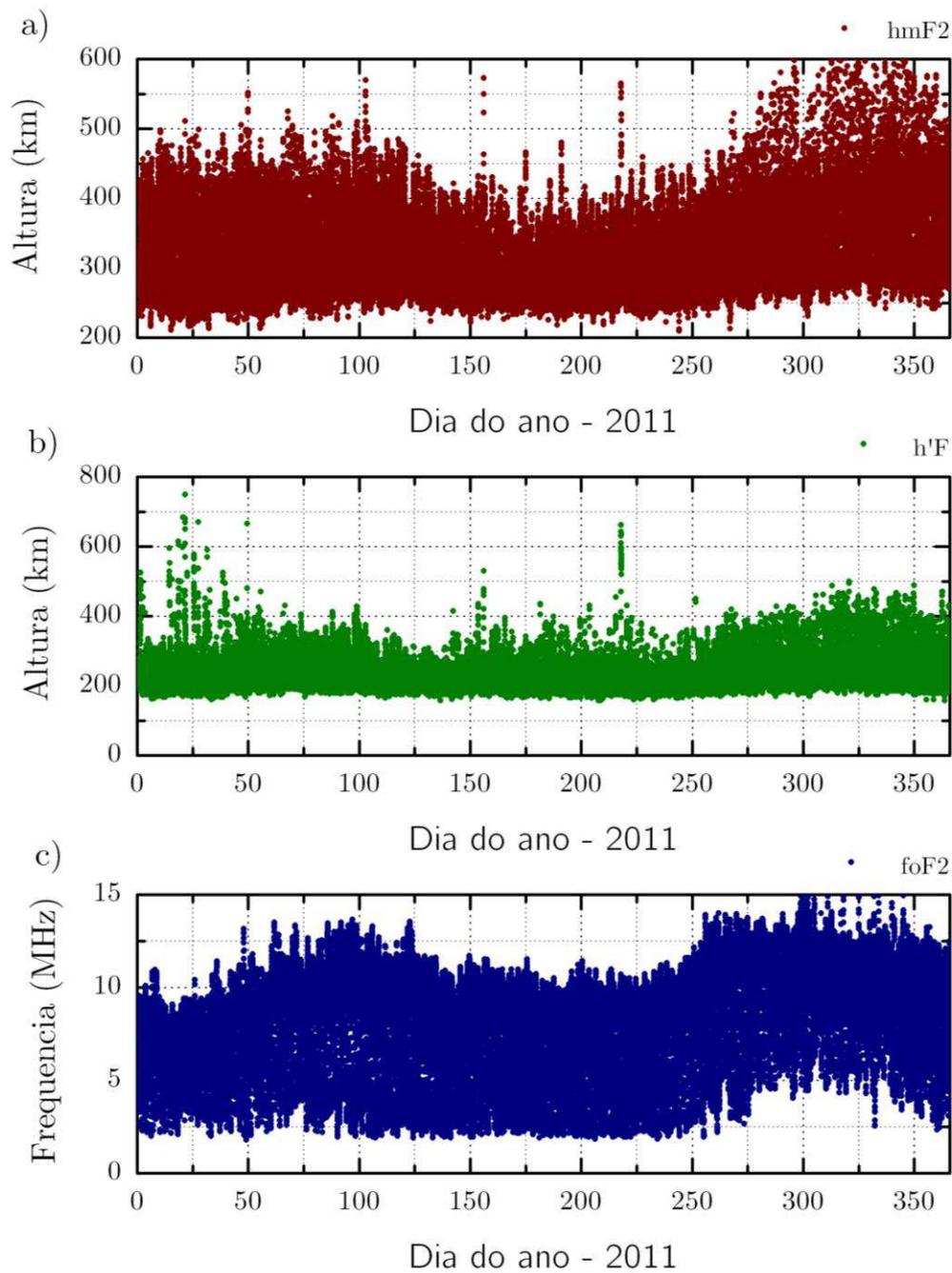


Figura 0.14 - Série temporal dos dados de: a) hmF2 (altura média da camada F2), b) h'F (altura virtual da camada F), e c) FoF2 (frequência de reflexão da camada F2) para o ano de 2011, obtidos através da ionossonda localizada no INPE - Fortaleza.

## 4.12 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS

Após a construção das séries temporais, estas são submetidas à análise com o intuito de se identificar periodicidades de escala planetárias nos dados de vento, bem com nos dados fornecidos pela ionossonda. A técnica utilizada na análise das séries foi a do periodograma de Lomb-Scargle (L-S). O periodograma de Lomb-Scargle é uma técnica amplamente utilizada na comunidade científica, principalmente, na análise de séries temporais que não são amostradas em intervalos de tempo constante, em outras palavras, uma série que não é igualmente espaçada (SCARGLE, 1982).

A definição utilizada no periodograma de L-S para estimar a contribuição de certa frequência ( $\omega$ ) para a composição de todo o sinal, para uma série temporal  $X(t_j)$  (sendo  $j = 1, 2, 3, \dots, N_0$  o número de dados amostrados), é dado pela seguinte equação:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X_j \cos(\omega(t_j - \tau)) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2(\omega(t_j - \tau))} + \frac{\left[ \sum_{j=1}^{N_0} X_j \text{sen}(\omega(t_j - \tau)) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \text{sen}^2(\omega(t_j - \tau))} \right\}. \quad (4.96)$$

Sendo  $\tau$  definido por:

$$\text{tg}(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \text{sen}(2\omega t_j)}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos(2\omega t_j)}. \quad (4.97)$$

A constante  $\tau$  faz com que o periodograma seja invariante com respeito a um deslocamento da origem de tempo (LOMB, 1976). Desta forma, o periodograma é equivalente a ajustar uma função em termos de senos e cossenos, para uma dada frequência  $\omega$ , do mesmo modo que uma análise de Fourier. A diferença é

que, enquanto que a análise de Fourier tem com base de cálculo os intervalos de tempo entre os dados, o periodograma de L-S tem como base os dados fornecidos para a aplicação do método.

De modo a averiguar a precisão do método acima, foi gerada uma oscilação com período conhecido, em seguida, esta oscilação foi submetida ao periodograma de L-S. Desta forma, considere uma oscilação dada pela seguinte expressão:

$$f(x) = a + \sum_{i=1}^3 b_i \cos[(x - \delta) / T_i]. \quad (4.98)$$

Sendo  $a$  o deslocamento vertical do gráfico,  $b$  a amplitude,  $\delta$  a constante de fase e  $T$  o período. Na Figura 4.15, tem-se uma oscilação gerada a partir da Equação 4.98 com períodos de 2, 5 e 10 dias.

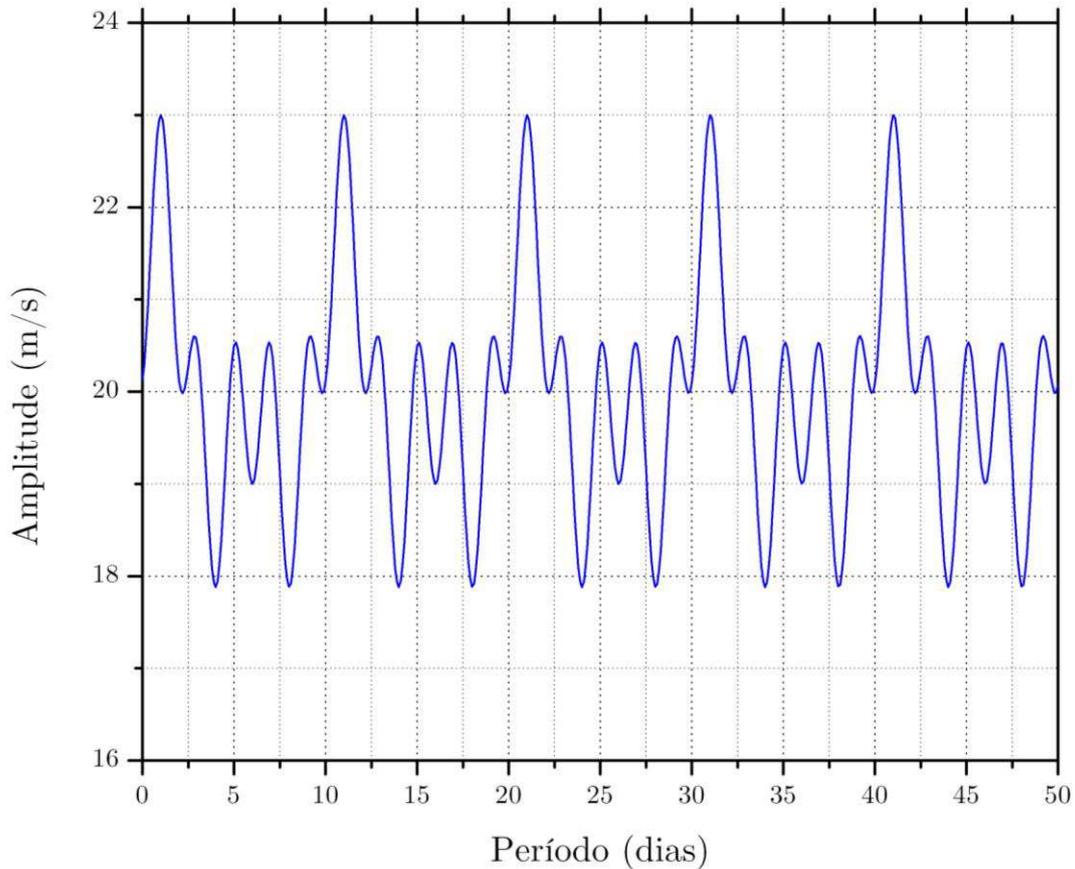


Figura 0.15 - Oscilação gerada com períodos de 2, 5 e 10 dias.

Submetendo a série temporal utilizada na geração da Figura 4.15 ao método do periodograma de L-S, tem-se o seguinte resultado.

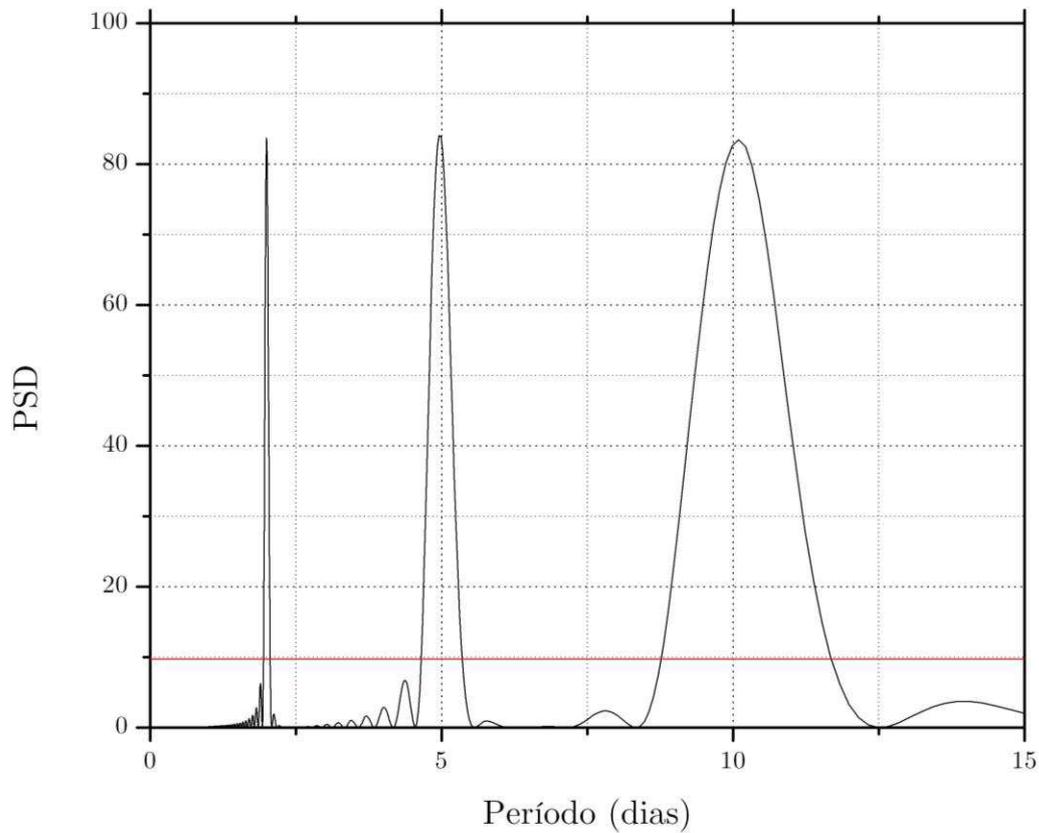


Figura 0.16 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

A Figura 4.16 apresenta o periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. O periodograma fornece um gráfico do PSD (Power spectral density) em função do período, e uma reta horizontal que indica o nível de confiança. Figura 4.16, observa-se que os picos mais significativos são de 2, 5 e 10, de acordo com o esperado, e a linha com uma confiança de 95%.

Em seguida, foi retirado dados a cada 3 dia para verificar a resposta do método na análise de uma série que não é igualmente espaçada. Na Figura 4.17 observa-se que os picos mais significativos são de 2, 5 e 10, e a linha com uma confiança

de 95%. Note que, outros picos estão acima da linha de confiança em torno dos picos esperados, Horne e Baulinas (1986) denomina essa característica de vazamento espectral (ou *aliasing*). O vazamento espectral ocorre quando a energia espectral associada à certa frequência  $\omega_0$  “escapa” para outras frequências devido ao comprimento finito da janela de dados às irregularidades a espaçamento nos dados.

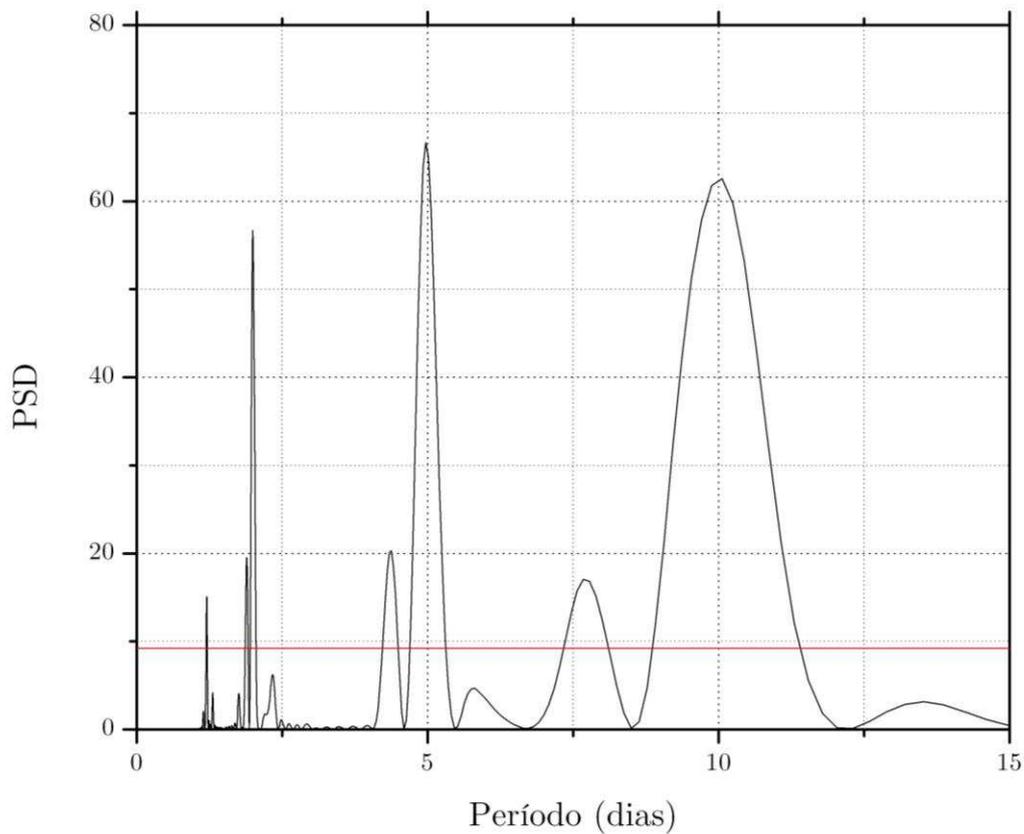


Figura 0.17 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. Foi retirado dados a cada 3 dia para verificar a resposta do método. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

Por fim, na Figura 4.18 foi usado o mesmo procedimento na geração da Figura 4.17, com a diferença que foi retirada uma quantidade maior de dados e de forma aleatória. Note que, os períodos de 2, 5 e 10 ainda são vistos no periodograma, mas com uma densidade espectral e precisão bem menor do que

na Figura 4.16. Além disso, devido à densidade espectral ser baixa, o vazamento espectral torna-se mais significativo.

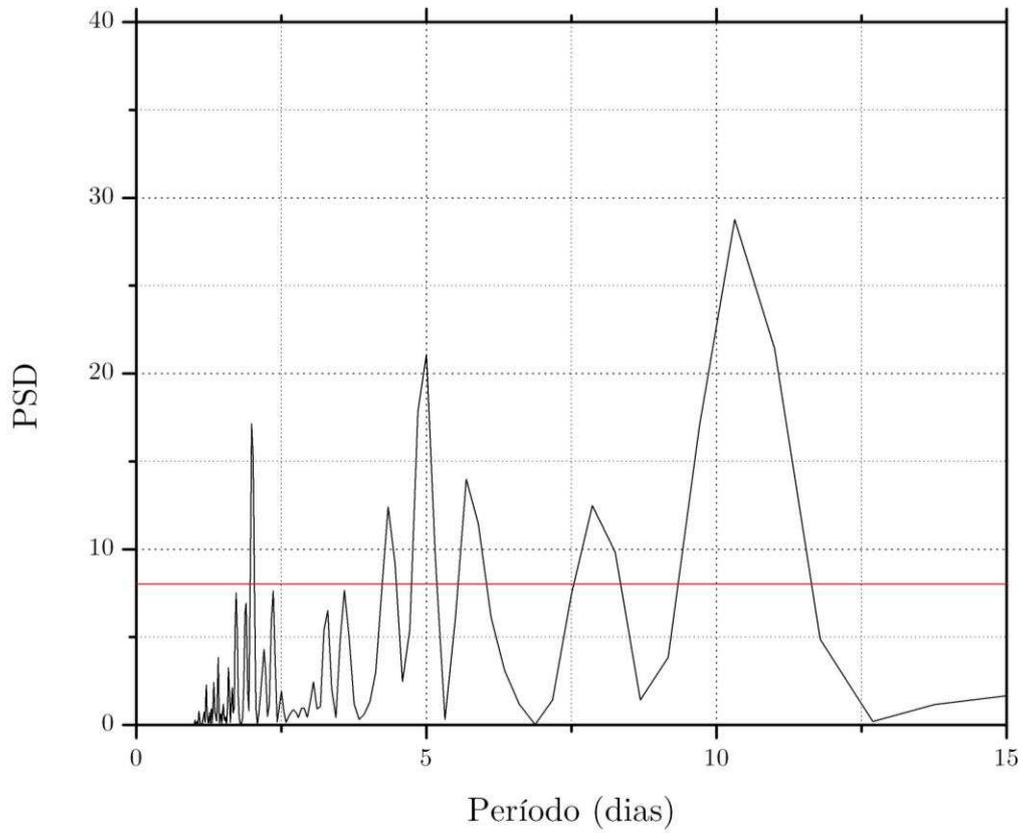


Figura 0.18 - Periodograma de L-S da série temporal construída a partir da Equação 4.98 utilizando períodos de 2, 5 e 10. Foram retiradas grandes quantidades de dados e de forma aleatória. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os dados apresentados neste capítulo têm como objetivo estudar a ocorrência de oscilações de escala planetária nos dados de ventos termosféricos na região equatorial. Serão utilizados dados de vento zonal e meridional obtido através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot, seguindo a metodologia descrita no Capítulo 4. Em seguida, de modo a investigar possíveis mecanismos de geração destas oscilações observadas nos dados de vento, serão apresentados dados de temperatura termosférica, dados de FoF2 e hmF2 obtidos através de medida da ionosonda localizada no INPE-Fortaleza e dados de atividade magnética (índices Ap e Dst) disponíveis no site da Universidade de Kyoto.

Neste trabalho, foram escolhidos horários fixos dentro na noite de observação para investigar a ocorrência de oscilações de escala planetária nos dados de vento e temperatura termosférica na região equatorial, os horários escolhidos são das 20 h (Hora Local - HL) às 26 h (HL) com uma resolução temporal de uma hora. O período estudado compreende os dias 300 (27/10) a 360 (26/12) de 2010 e 310 (06/11) a 360 (26/12) de 2011, tanto para dados de vento (zonal e meridional), temperatura, parâmetros ionosféricos e índices de atividade magnética. Fazendo uma análise visual nos dados de vento é possível observar que há uma variação na intensidade nos dados em função do dia com uma periodicidade da ordem de dias, sugerindo assim, a presença de ondas do tipo planetárias. A identificação das periodicidades presentes nos dados de ventos termosféricos foi feita através do método do peridiograma de Lomb-Scargle (L-S). Como já foi citado no Capítulo 4.

### **5.1 RESULTADOS**

#### **5.1.1 DADOS DE VENTO TERMOSFÉRICO - 2010**

Na Figura 5.1 é a apresentado um gráfico para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano – 2010, dado em m/s. Como já foi mencionado, é possível

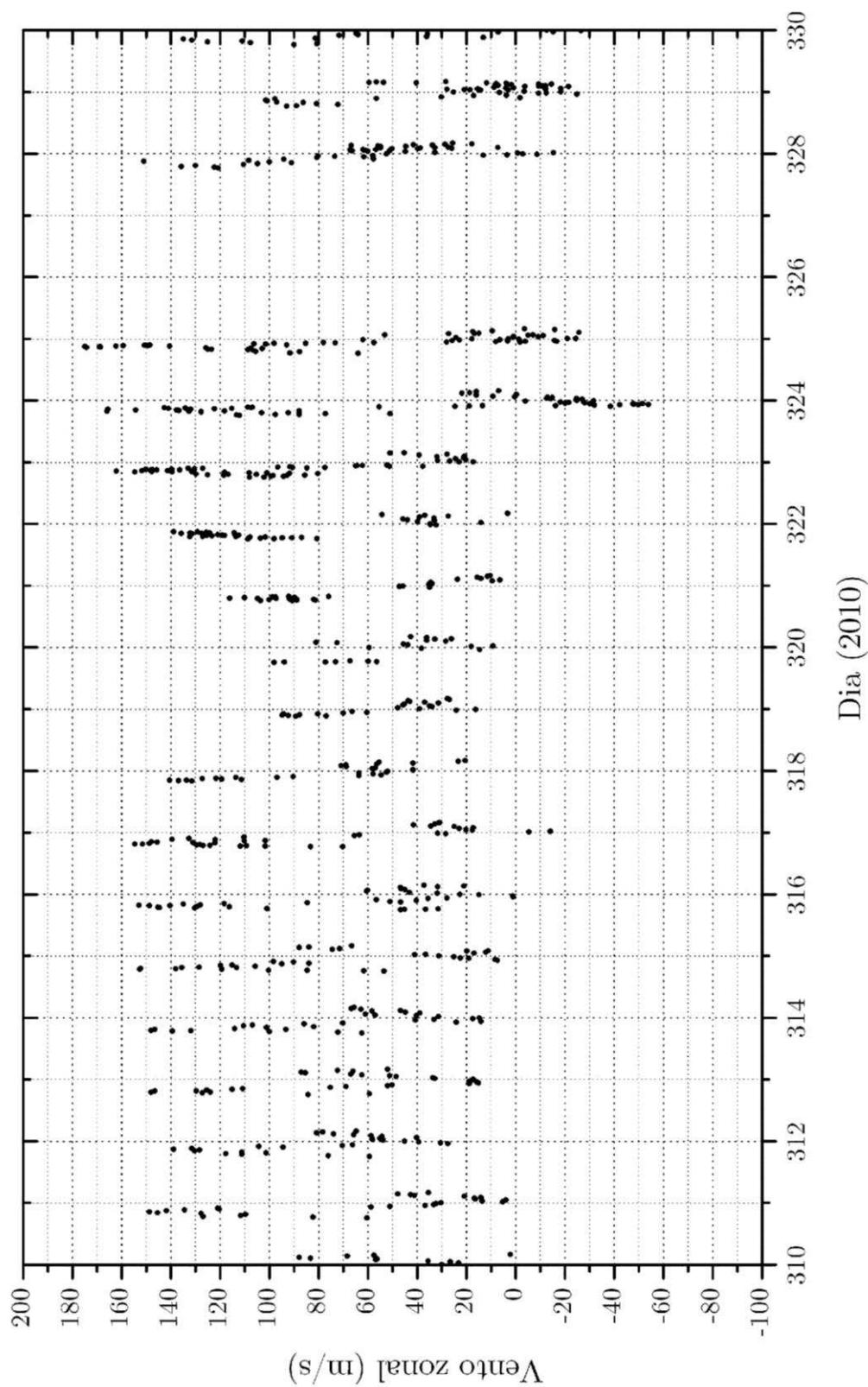


Figura 5.1 - Dados de vento zonal observado entre os dias 310-330 (06-26/11) de 2010 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica volume comum.

observar nos dados que há uma variação na intensidade nos dados de vento em função do dia. Note que, entre os dias 315-317 ocorreu uma maior intensidade nos dados, seguido por um mínimo entre os dias 319-320 e novamente uma intensificação nos dados de vento em torno do dia 15. Nos dias 326 e 327, como pode ser observado, não há medidas de vento. Esta ausência de dados é devido à problemas técnicos.

Submetendo a série temporal ao método de L-S também é possível observar na Figura 5.2 a presença de uma acentuada oscilação com período entre 10-11 dias, evidenciada pelo forte pico de energia espectral (PSD) associada a esta oscilação.

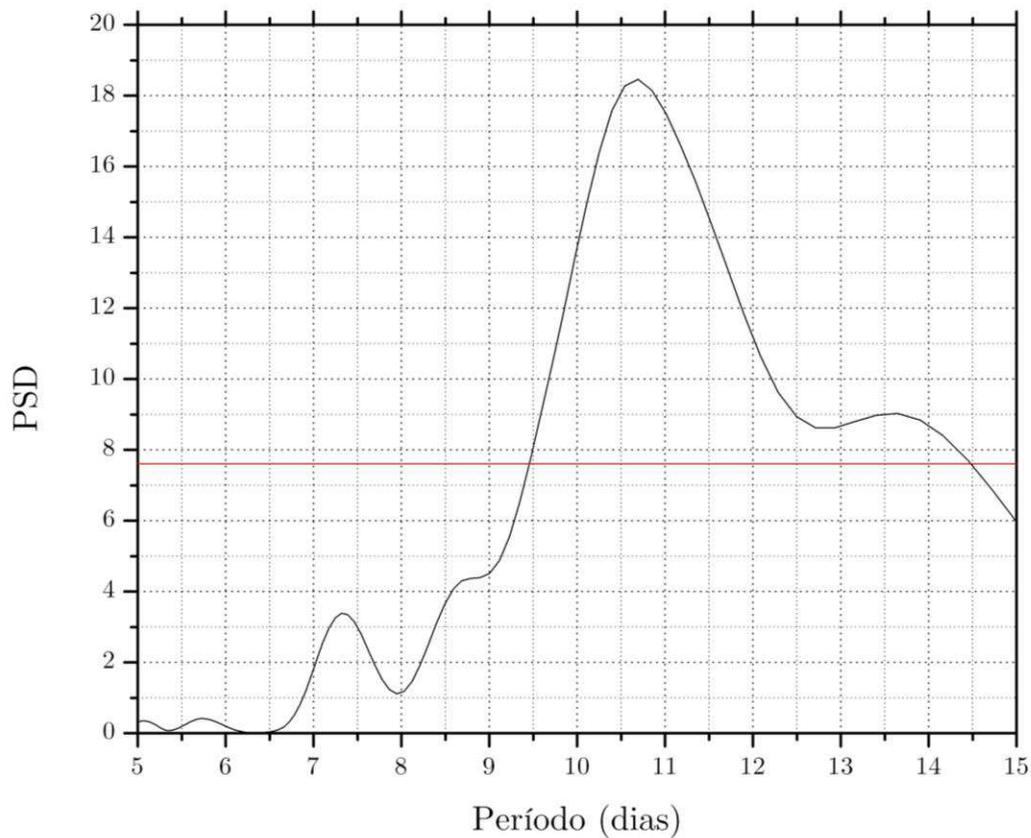


Figura 5.2 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano - 2010. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

De modo análogo, na Figura 5.3 é apresentado um gráfico para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano - 2010, dado em m/s. Novamente, é

possível observar que nos dados de vento há uma variação na intensidade nos dados de vento em função do dia. Note que, entre os dias 6-8 ocorreu uma maior intensidade nos dados, seguido por um mínimo entre os dias 11-12 e novamente uma intensificação nos dados de vento. Submetendo a série temporal ao método do periodograma de L-S também é possível observar na Figura 5.4 a presença de uma acentuada oscilação com período entre 8-9 dias, evidenciada pelo forte pico de energia espectral (PSD) associada a esta oscilação.

De modo a estudar estas oscilações nos dados de vento zonal e meridional com maior clareza, foram isolados dados em torno de sete horas fixas numa noite de observação, das 20 h (Hora Local) às 26 h (HL), com uma resolução temporal de uma hora. Para cada determinado horário foi selecionado os dados num intervalo de tempo de  $\pm 30$  min em torno da hora fixada e em seguida com os dados selecionados foi extraído uma média e o desvio padrão. Por fim, será apresentado um intervalo maior de dados, com relação à Figura 5.1, com o intuito de analisar o comportamento do vento nos dias que antecedem o evento estudado, bem como os dias posteriores ao mesmo.

Utilizando as médias como valores de vento representativos para cada horário, a Figura 5.5 apresenta dados de vento zonal e meridional observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 20 h (HL), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot. Pode-se observar que entre os dias 309 e 329 os dados de vento zonal apresentam um comportamento oscilatório com uma periodicidade da ordem de dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 303 e 318 nos dados de vento meridional. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos em torno de 11 e 8 dias para os dados de vento zonal e meridional, respectivamente. Ainda na Figura 5.5, de modo a ratificar e investigar possíveis mecanismos de geração destas oscilações observadas nos dados de vento, foram apresentados dados de temperatura e dados de FoF2 e hmF2 (segundo a metodologia descrita no parágrafo anterior) obtidos através de medidas de ionossonda localizadas no INPE-Fortaleza. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 327 com um perí-

odo em torno de 12 dias. Perceba que, não é possível observar características oscilatórias nos dias que antecedem o evento e os dias posteriores ao mesmo. Nos parâmetros ionosféricos, foi aplicado um filtro passa baixa de forma a retirar oscilações a baixo de 4 dias, desta forma, pode ser visto um comportamento oscilatório mas com um período menor do que observado nos dados de vento e temperatura.

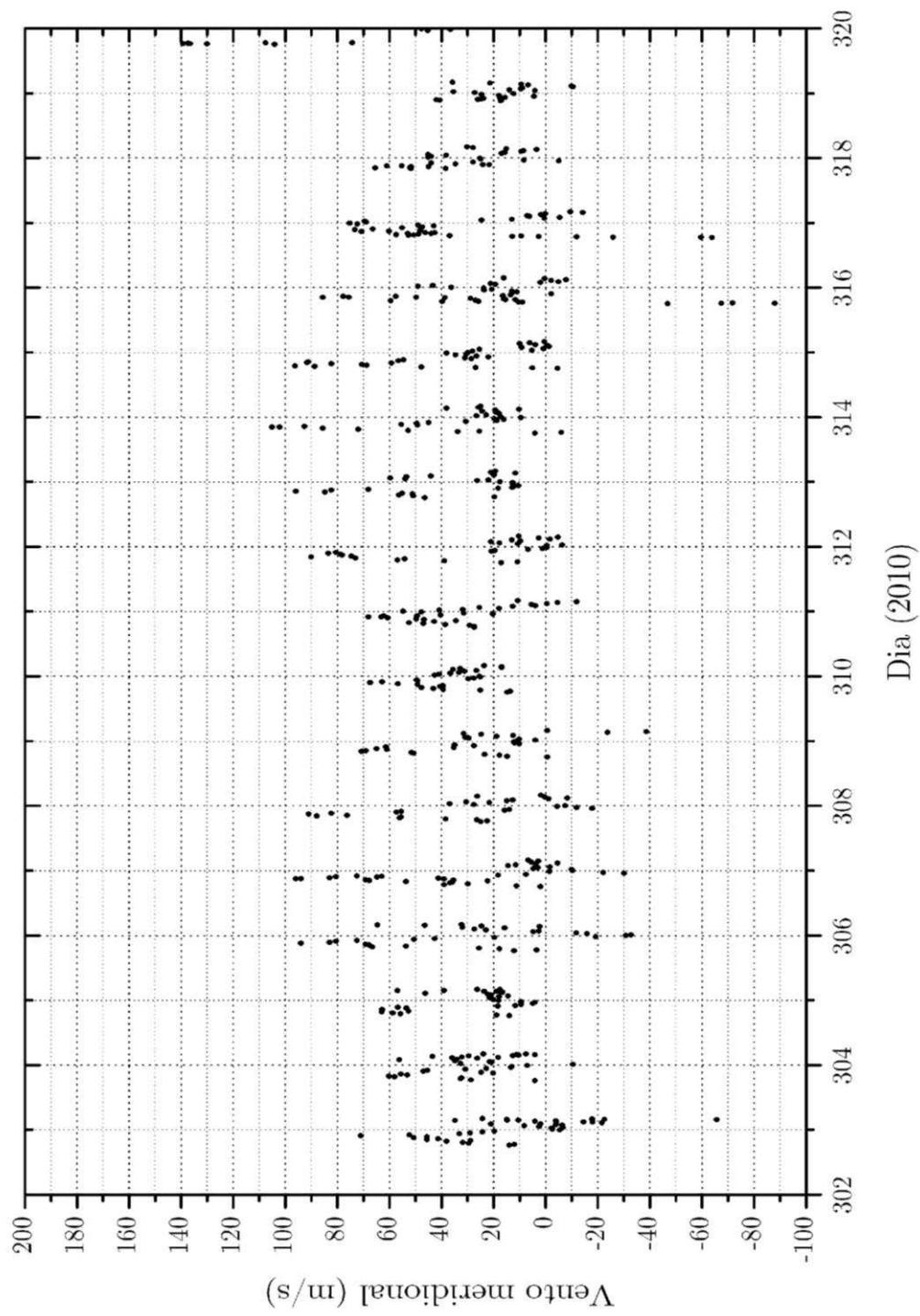


Figura 5.3 – Dados de vento meridional observados entre os dias 302-320 (29/10-16/11) de 2010 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica volume comum.

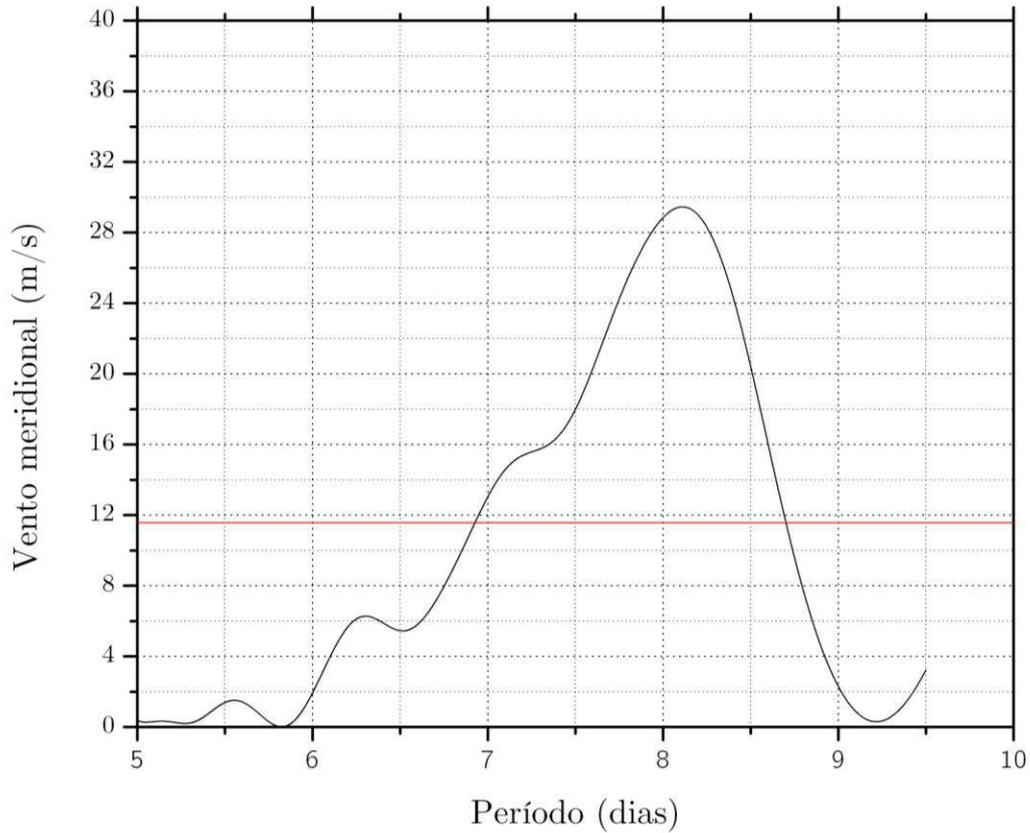


Figura 5.4 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano – 2010. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

A Figura 5.6 apresenta o vento zonal e o meridional para o mesmo período de observação da Figura 5.5, mas em torno das 21 h (HL). Pode-se observar que entre os dias 305 e 329 os dados de vento zonal apresentam uma periodicidade da ordem de 12 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 305 e 321 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 8 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 328 com um período em torno de 12 dias. Note que, ao contrário dos dados de vento e temperatura às 20 h, os dados às 21 h parecem manter o comportamento oscilatório após o evento estudado, mas sem a mesma definição.

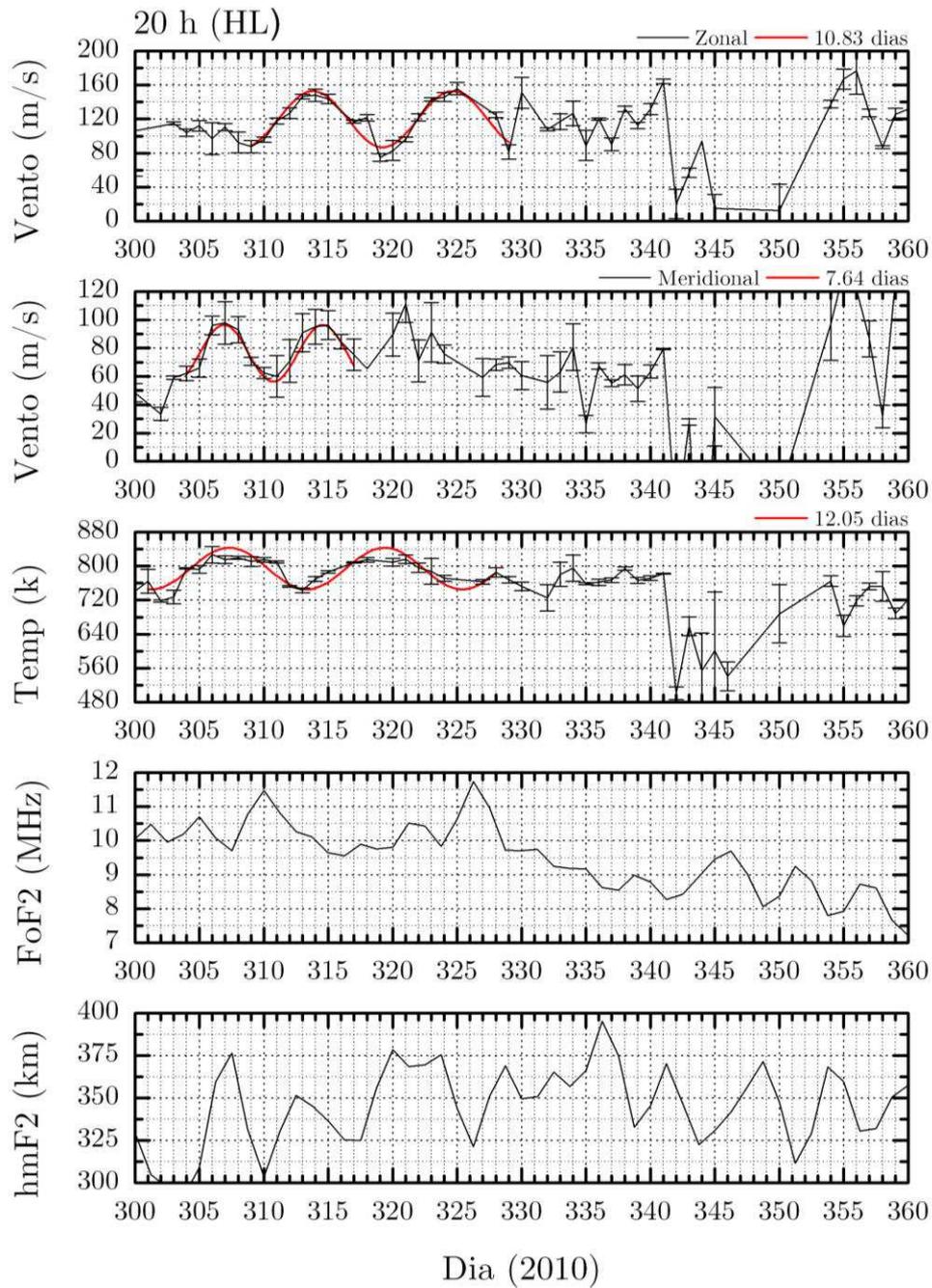


Figura 5.5 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 20 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 10,83, 7,64 e 12,05 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

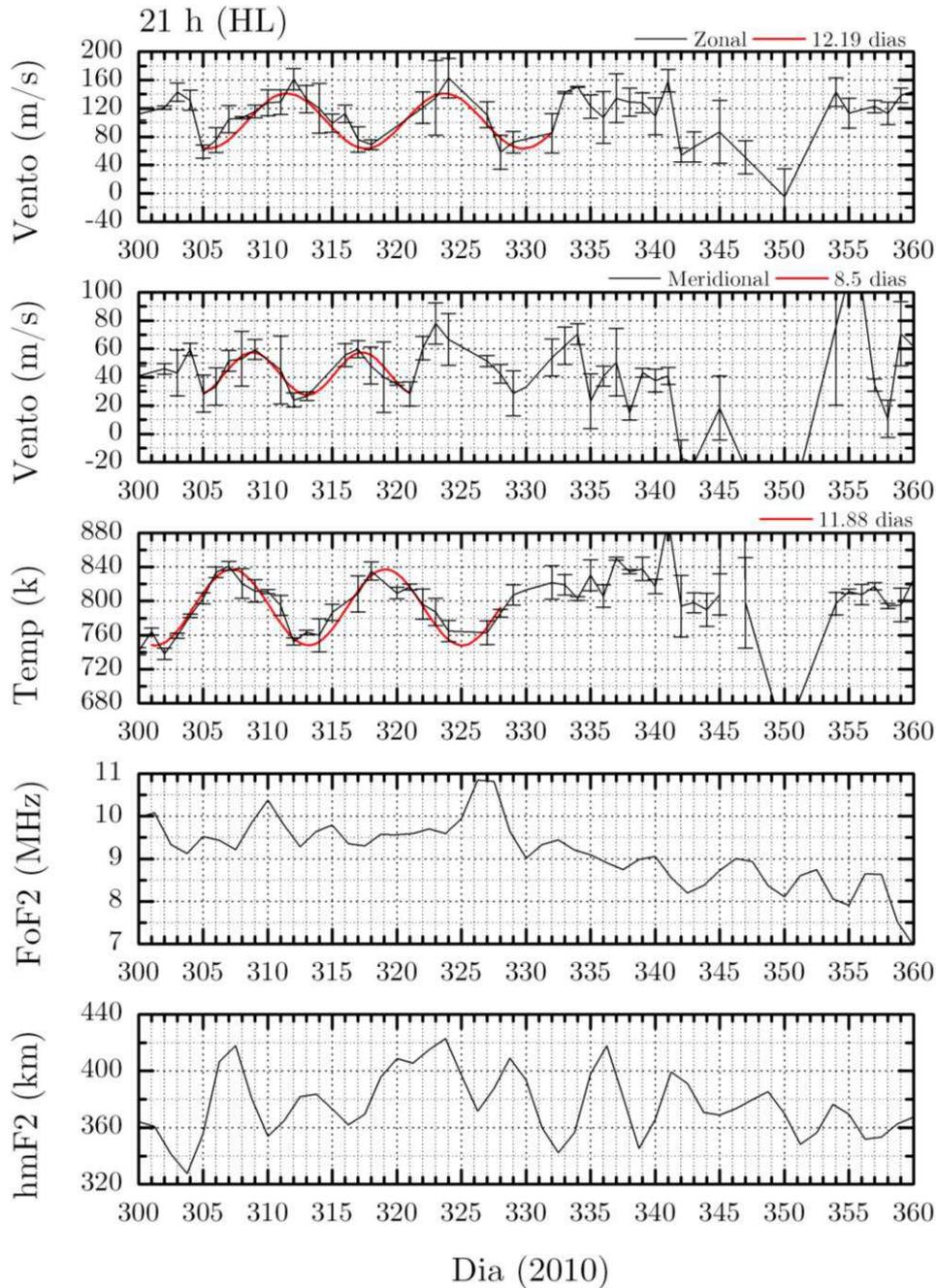


Figura 5.6 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 21 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 12,19, 8,5 e 11,88 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

No vento zonal e meridional em torno das 22 h (HL) apresentados na Figura 5.7, nota-se que entre os dias 305 e 332 os dados de vento zonal apresentam uma oscilação com o período da ordem de 12 dias, o mesmo pode ser visto entre

os dias 305 e 321 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 8.5 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 328 com um período em torno de 12 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor. Assim como nos dados às 21 h, os dados às 22 h parecem manter o comportamento oscilatório após o evento estudado, mas sem a mesma definição.

Na Figura 5.8, nos dados de vento zonal e meridional em torno das 23 h (HL) apresentados, é possível observar que entre os dias 305 e 329 os dados de vento zonal apresentam uma periodicidade da ordem de 10 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 305 e 321 nos dados de vento meridional, mas com um período em torno de 8 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 328 com um período em torno de 11 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

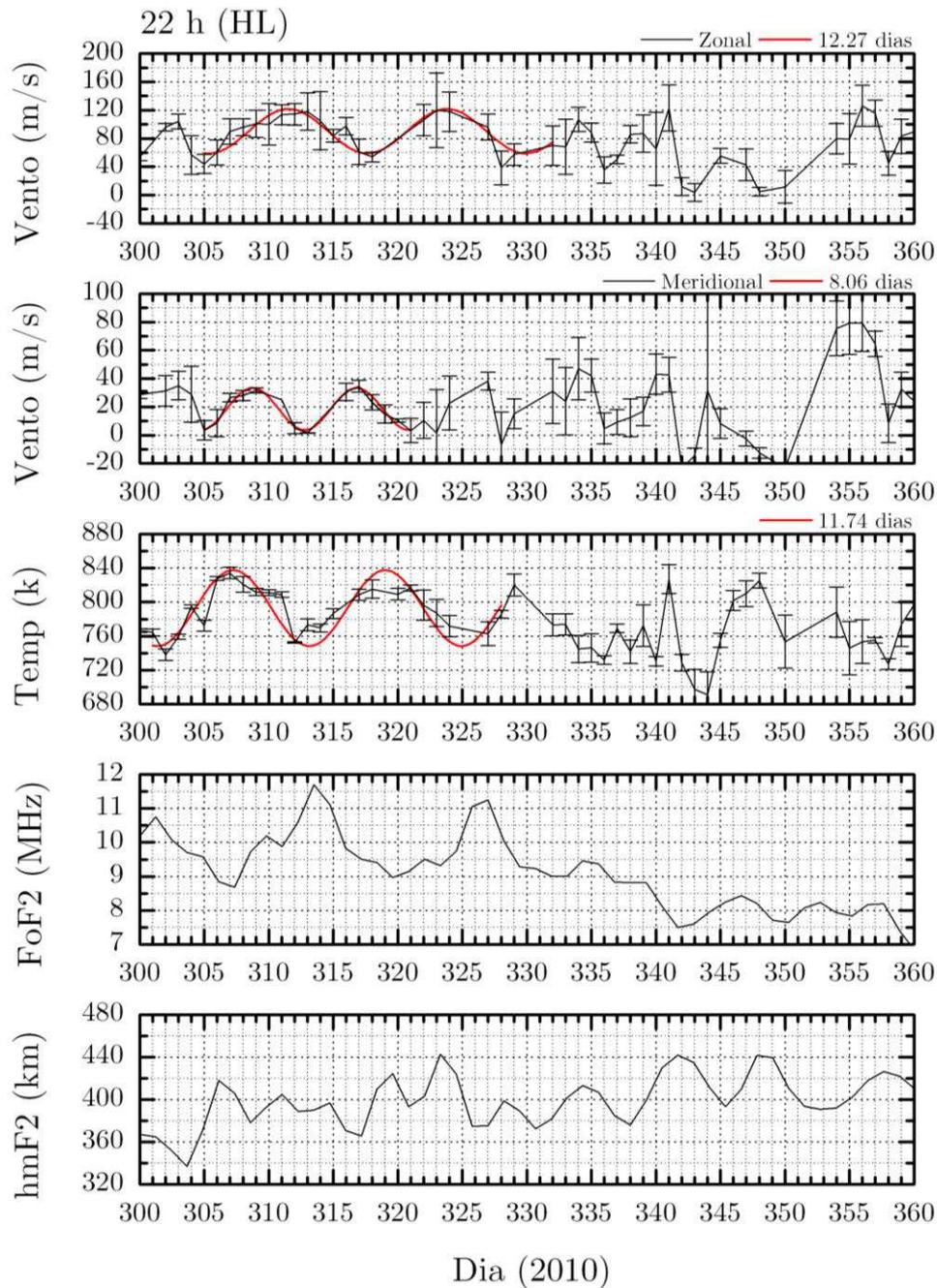


Figura 5.7 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 22 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 12,27, 8,06 e 11,74 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

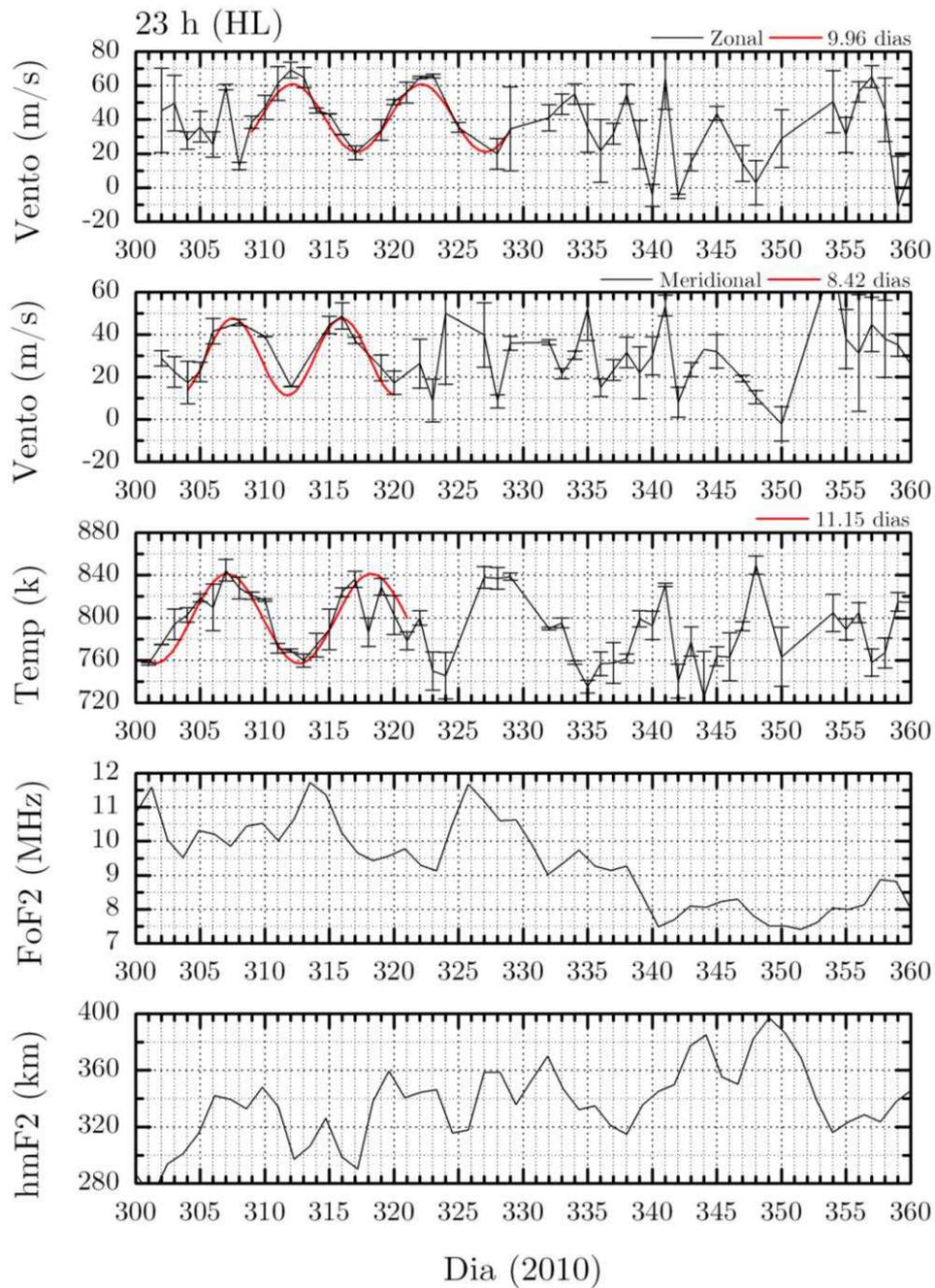


Figura 5.8 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 23 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 9,96, 8,42 e 11,15 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

Os dados de vento zonal e meridional em torno das 24 h (HL) apresentados na Figura 5.9, nota-se que entre os dias 308 e 329 os dados de vento zonal apresen-

tam uma oscilação com período da ordem de 10 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 304 e 320 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 8 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 324 com um período em torno de 11 dias.

Na Figura 5.10, é possível observar nos dados de vento zonal e meridional em torno das 25 h (HL) apresentados, que entre os dias 305 e 329 os dados de vento zonal apresentam um período da ordem de 8 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 305 e 321 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 8 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 328 com um período em torno de 11 dias.

Nos dados de vento zonal e meridional em torno das 26 h (HL) apresentados na Figura 5.11, nota-se que entre os dias 308 e 329 os dados de vento zonal apresentam uma oscilação com período da ordem de 8 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 304 e 320 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 8 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 300 e 324 com um período em torno de 11 dias.

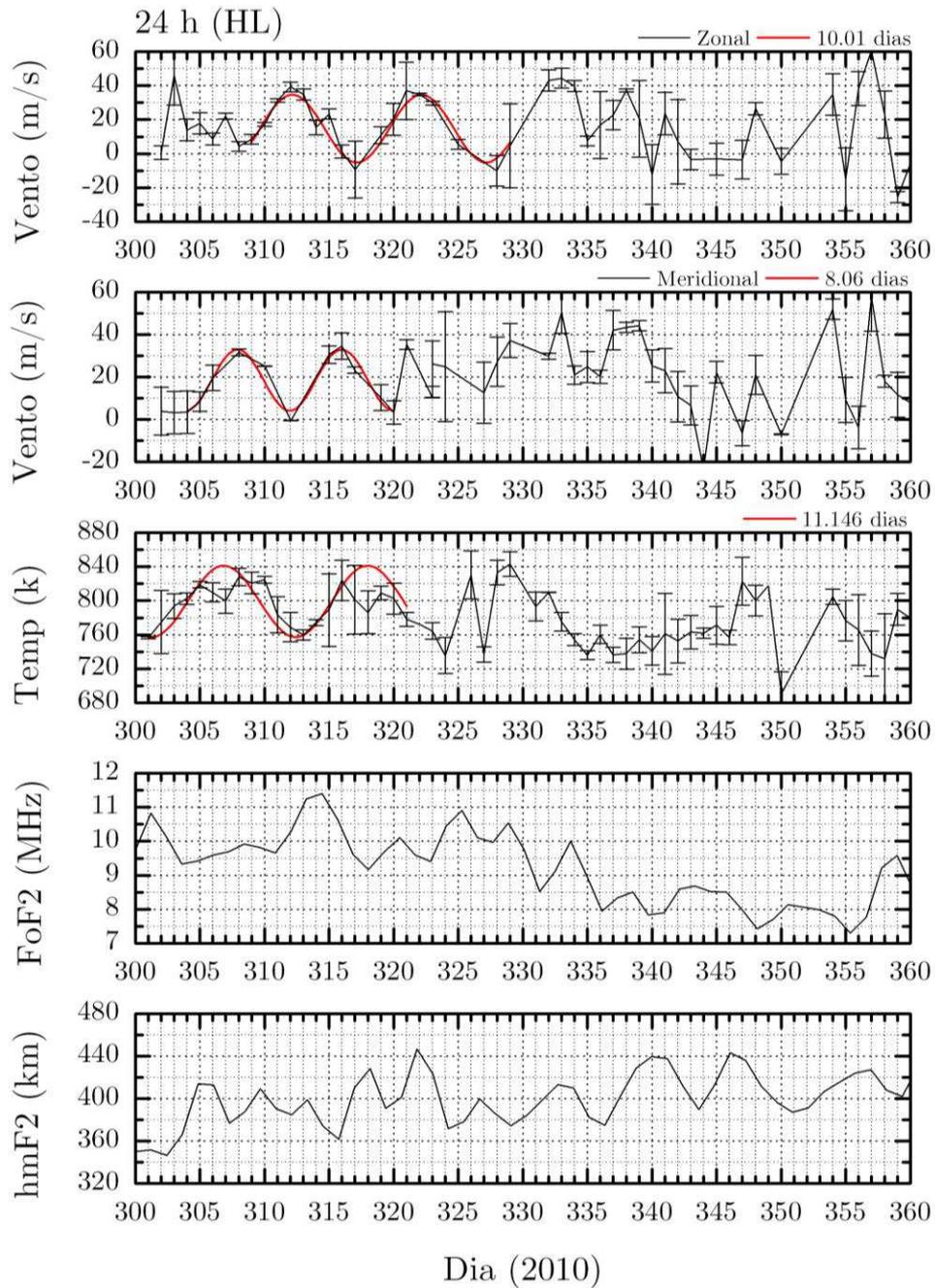


Figura 5.9 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 24 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 10,01, 8,06 e 11,146 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

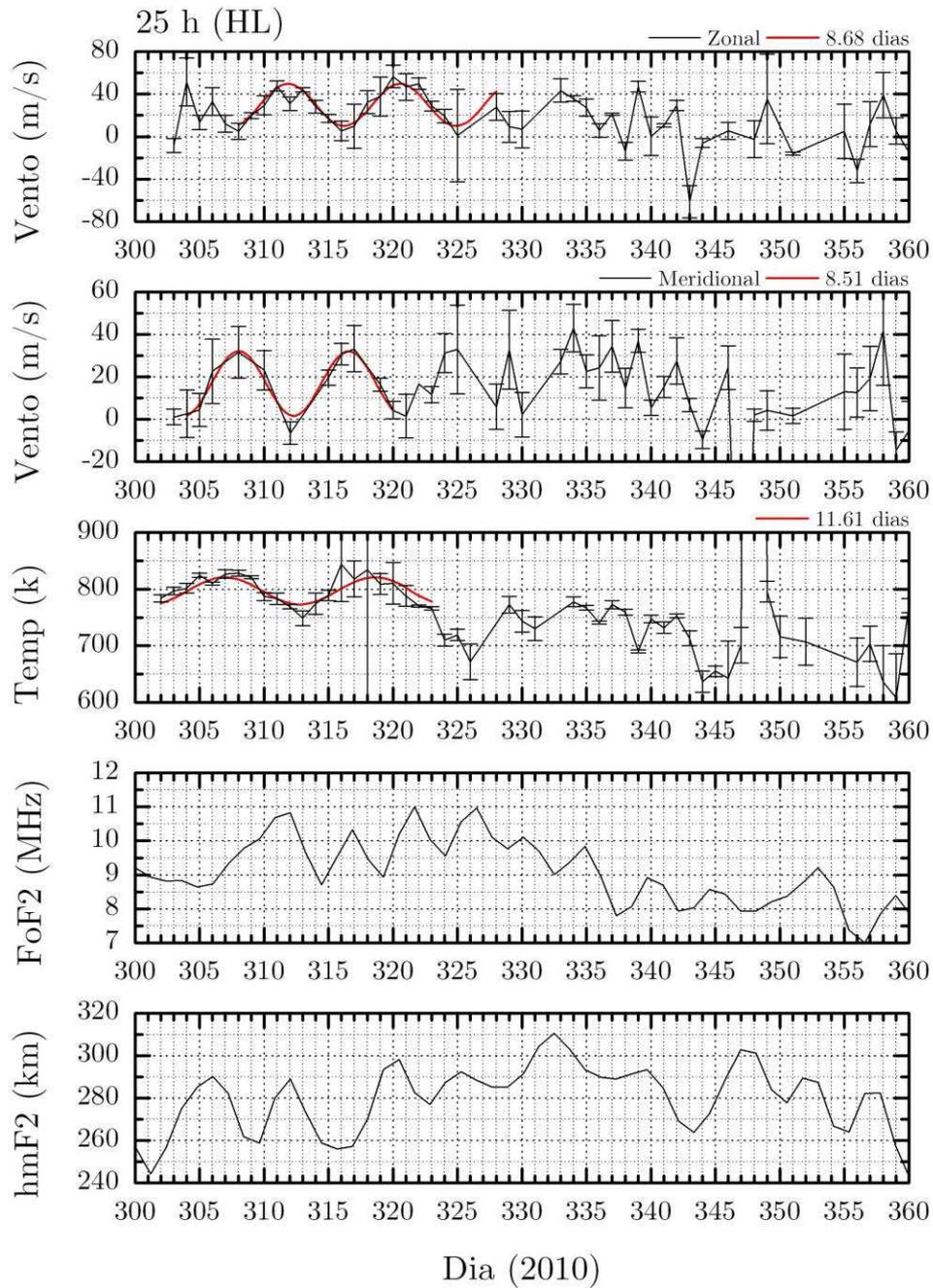


Figura 5.10 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 25 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 8,68, 8,44 e 11,61 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

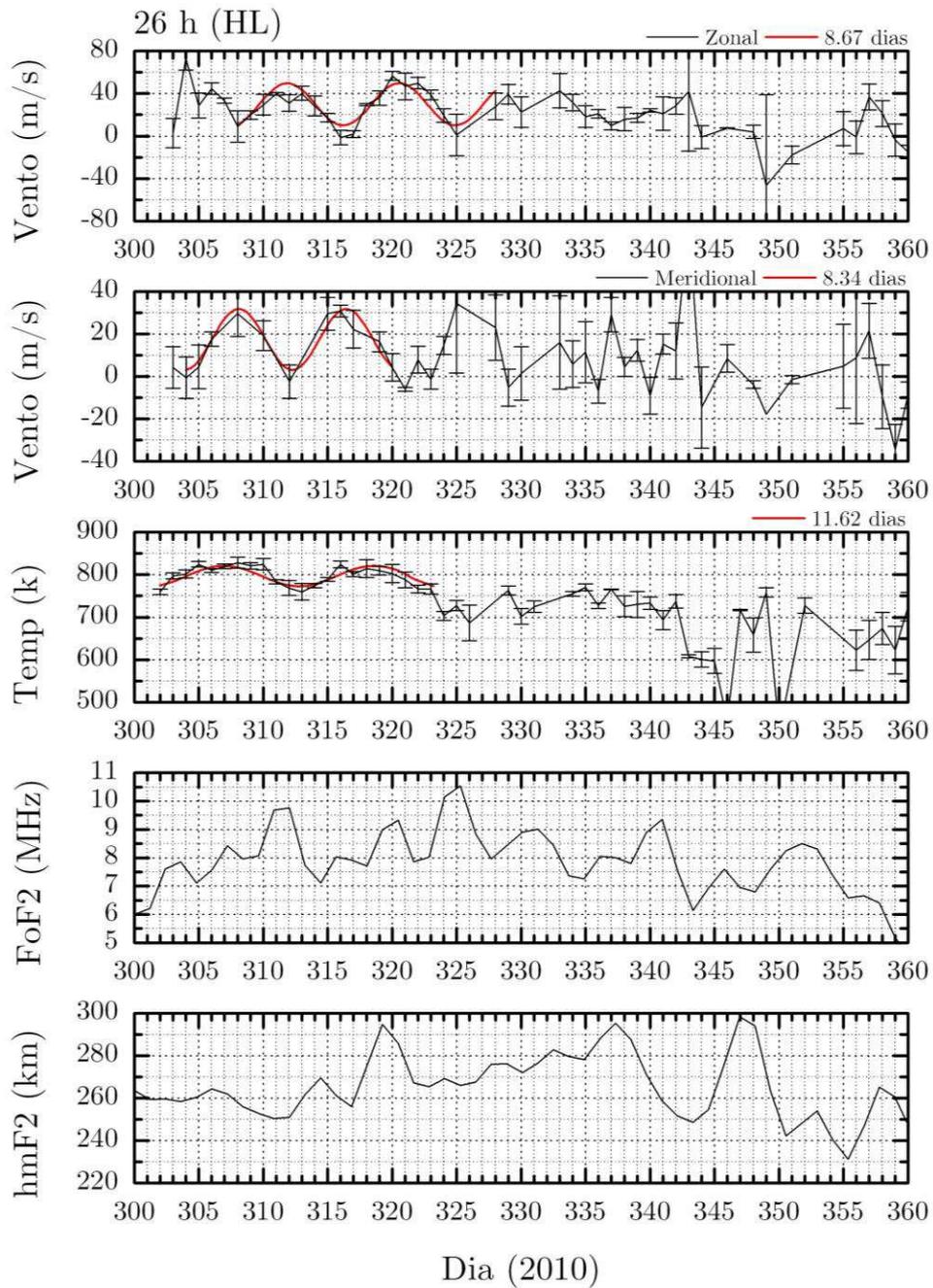


Figura 5.11 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 300-360 (27/10-26/12) de 2010, em torno das 26 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha vermelha representa uma curva de ajuste com períodos de 8,67, 8,20 e 11,36 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

A seguir a Figura 5.12 e 5.13 apresenta dados de Fazenda Ap e Dst para o ano de 2010, respectivamente. Análise espectral dos parâmetros de atividade magnética, na Figura 5.14 pode ser visto que as séries temporais do índice Ap apresentou oscilações em torno de 5-6 e 10-11 dias. Enquanto que na Figura 5.15, a análise para o índice Dst apresentou um espectro bastante impreciso, com um pico acentuado entre 6-10 dias.

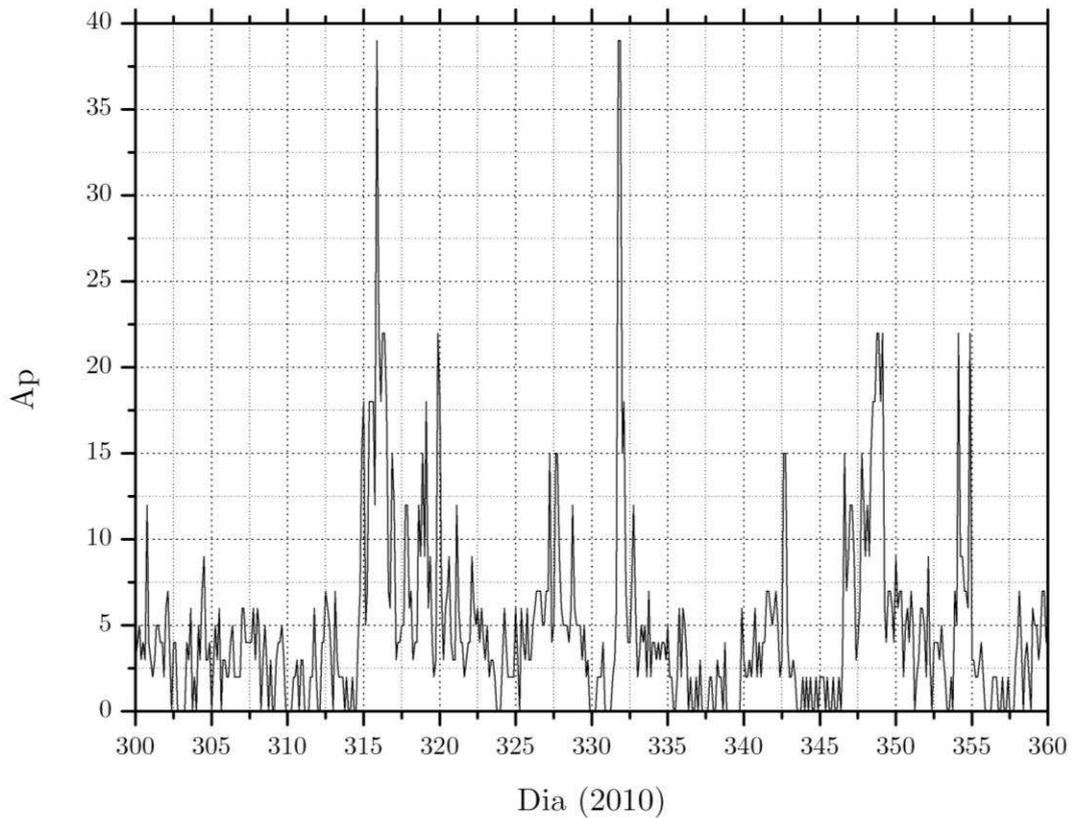


Figura 5.12 – Dados do índice Ap disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2010.

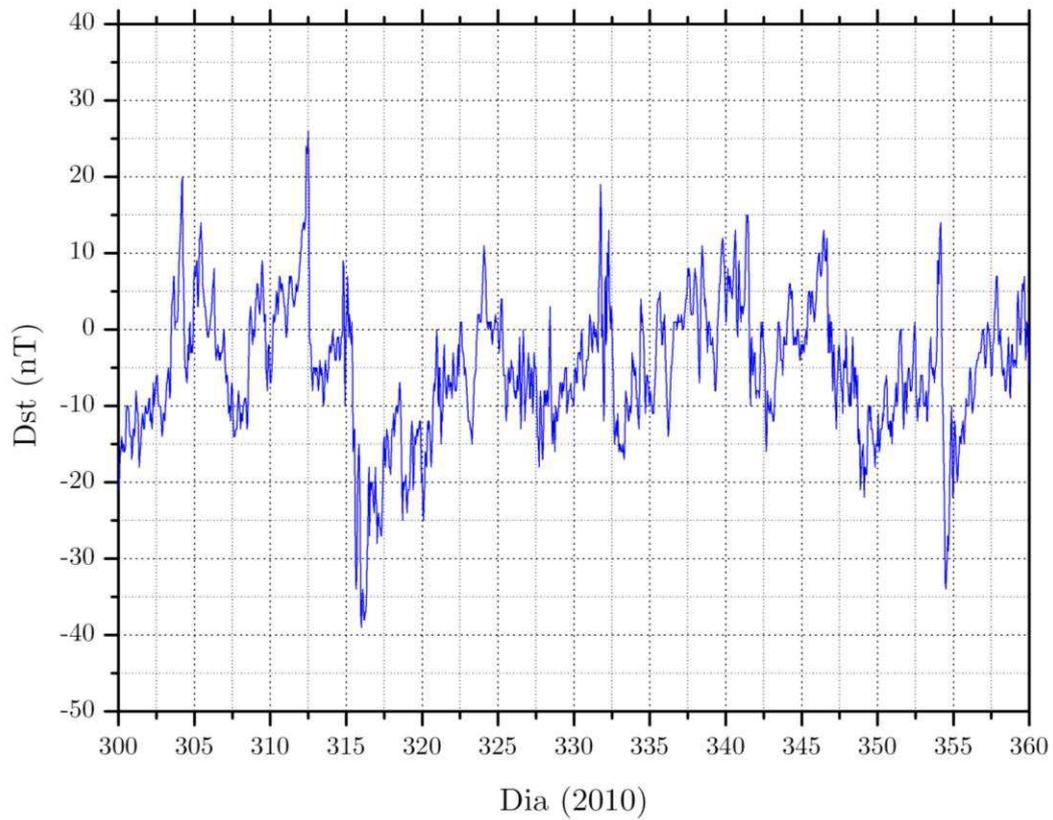


Figura 5.13 – Dados do índice Dst disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2010.

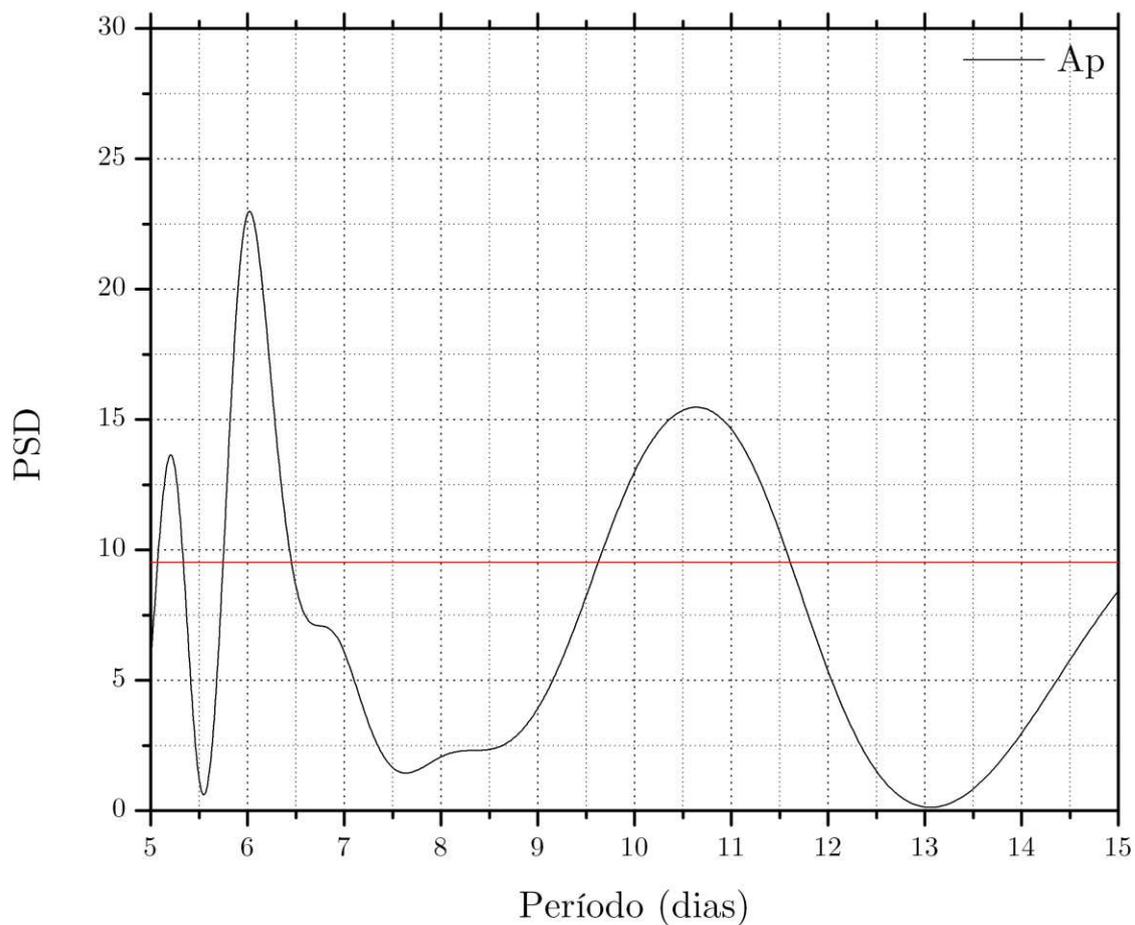


Figura 5.14 - Periodograma de L-S da série temporal do índice Ap disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para o mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

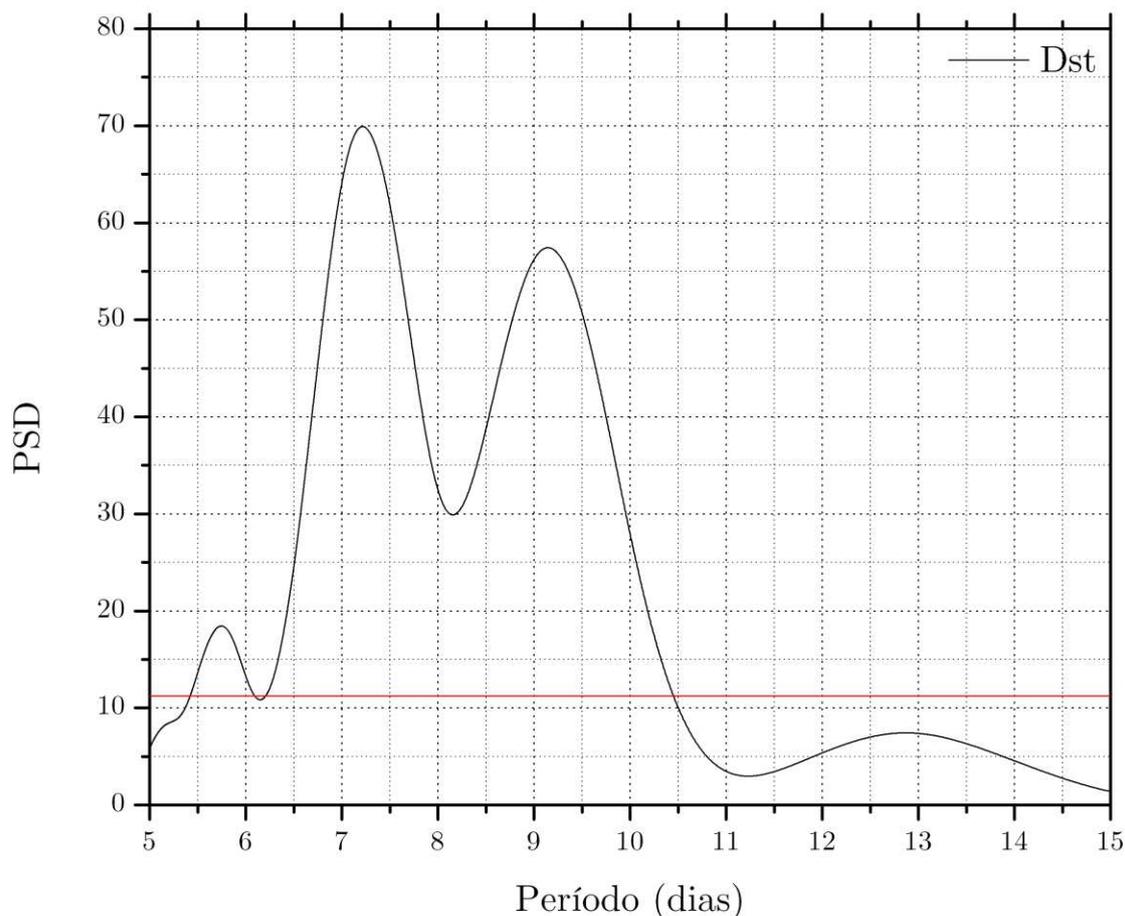


Figura 5.15 - Periodograma de L-S da série temporal do índice Dst disponível no site da universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

### 5.1.2 DADOS DE VENTO TERMOSFÉRICO - 2011

Na Figura 5.16 é a apresentado um gráfico para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano – 2011, dado em m/s. É possível observar que nos dados que há uma variação na intensidade nos dados de vento em função do dia. Note que, entre os dias 326-327 ocorreu uma maior intensidade nos dados, seguido por um mínimo entre os dias 329 e novamente uma intensificação nos dados de vento em torno do dia 332.

Submetendo a série temporal ao método do periodograma de L-S, também é possível observar na Figura 5.17 a presença de uma acentuada oscilação com período em torno de 7 dias, evidenciada pelo forte pico de energia espectral (PSD) associada a esta oscilação.

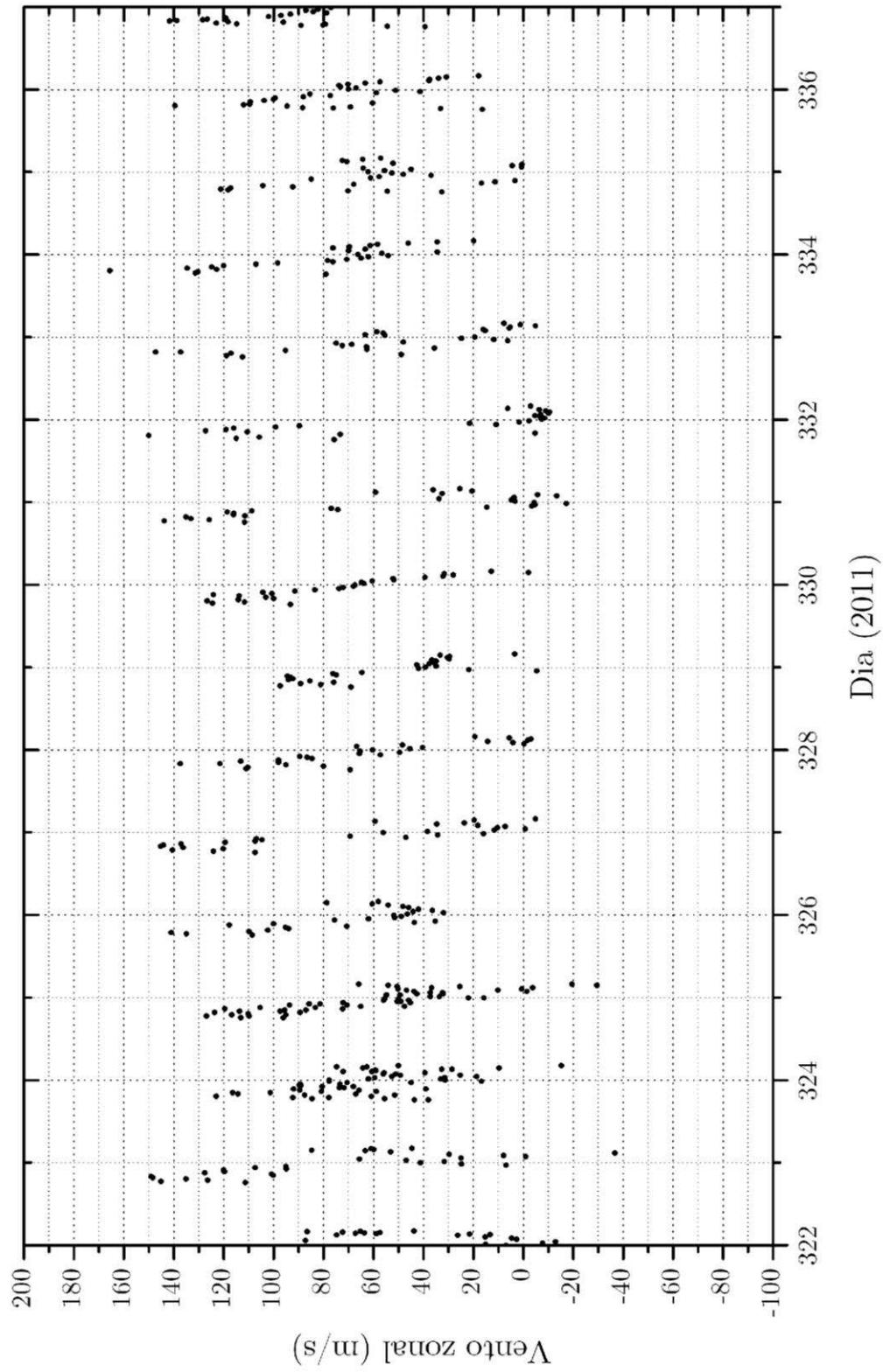


Figura 5.16 – Dados de vento zonal observado entre os dias 322-338 (18/11-04/12) de 2011 através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica modo cardeal.

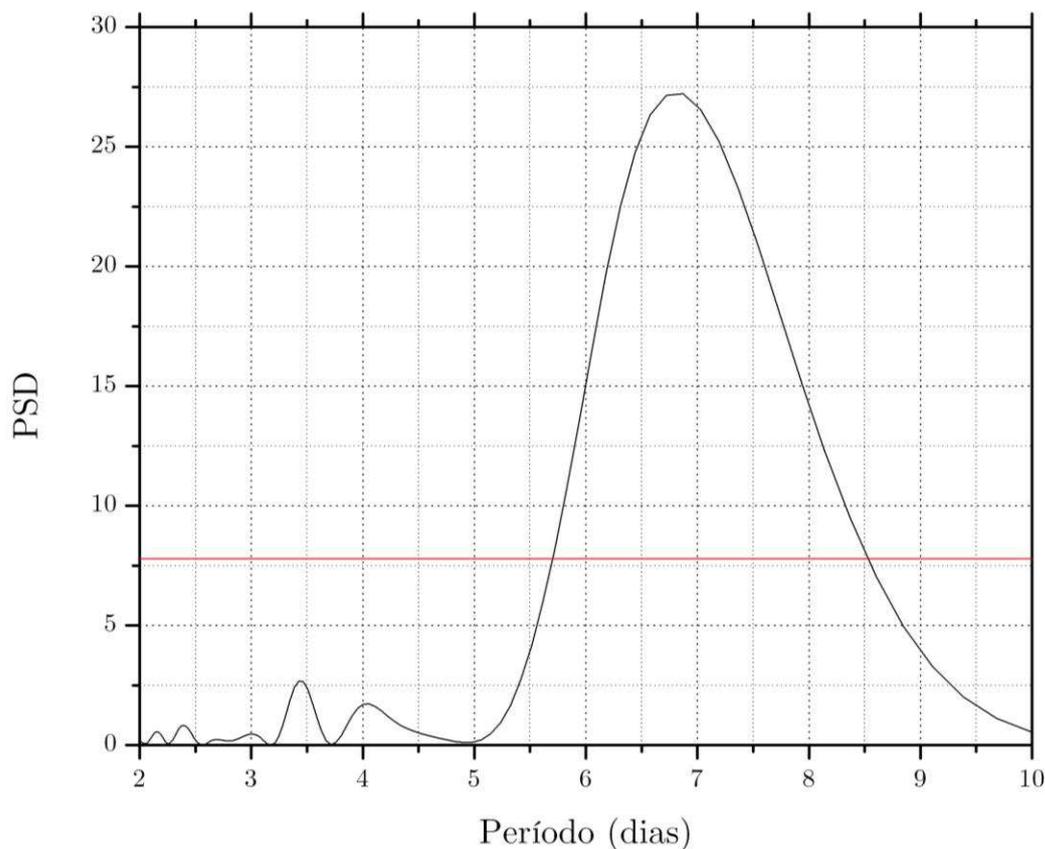


Figura 5.17 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento zonal em função do dia do ano – 2011. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

De modo análogo, na Figura 5.18 é apresentada um gráfico para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano – 2011, dado em m/s. Novamente, é possível observar que nos dados de vento há uma variação na intensidade nos dados de vento em função do dia. Note que, em torno do dia 343 ocorreu uma maior intensidade nos dados, seguido por um mínimo em torno do dia 347 e novamente uma intensificação nos dados de vento. Submetendo a série temporal ao método do periodograma de L-S também é possível observar na Figura 5.19 a presença de uma acentuada oscilação com período entre 9-10 dias, evidenciada pelo forte pico de energia espectral (PSD) associada a esta oscilação.

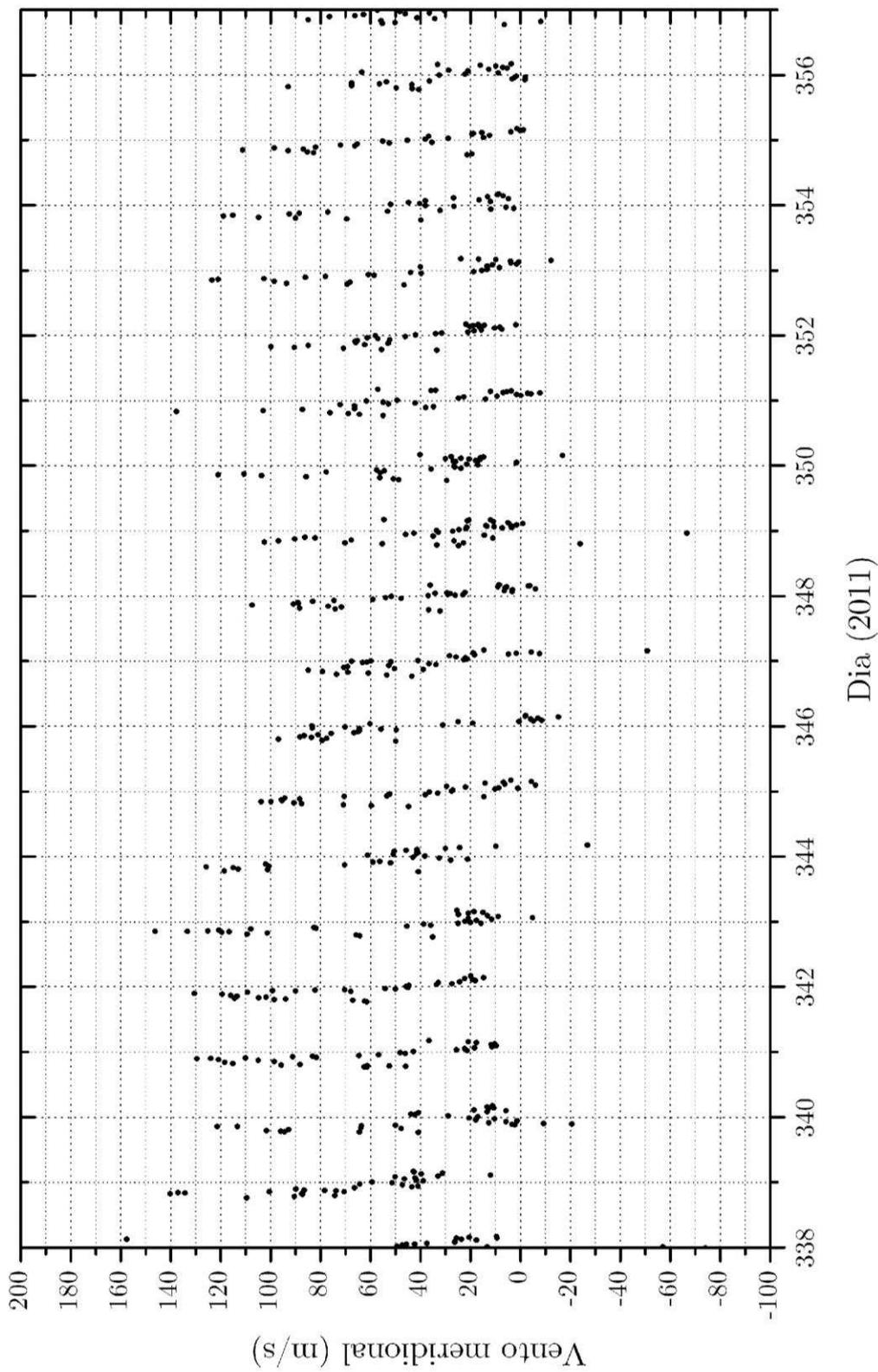


Figura 5.18 - Dados de vento meridional observado entre os dias 338-357 (04-23/12) de 2011 observados através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot utilizando a técnica modo cardeal.

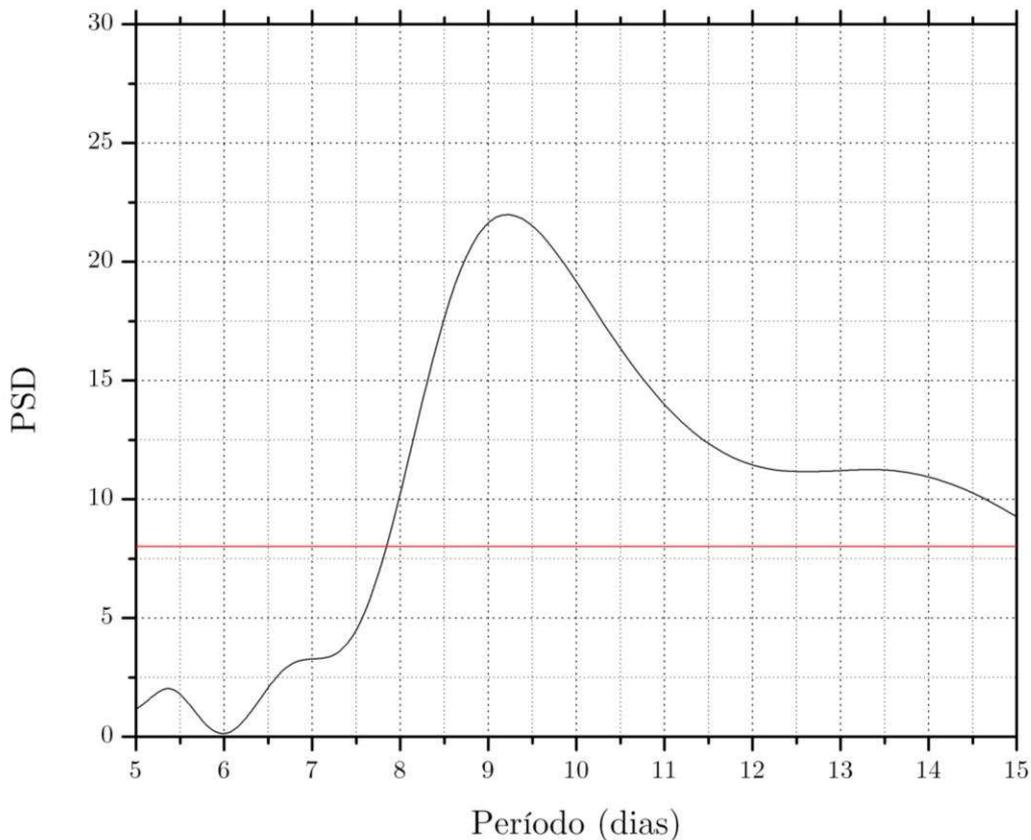


Figura 5.19 - Periodograma de L-S da série temporal dos dados para a intensidade do vento meridional em função do dia do ano – 2011. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

Utilizando metodologia descrita no início deste capítulo, em que foram utilizadas as médias como valores representativos para cada horário, a Figura 5.20 apresenta dados de vento zonal e meridional observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2010, em torno das 20 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot. Pode-se observar que entre os dias 324 e 336 os dados de vento zonal apresentam um comportamento oscilatório com uma periodicidade da ordem de dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 340 e 358 nos dados de vento meridional. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos em torno de 7 e 10 dias para os dados de vento zonal e meridional, respectivamente. Ainda na Figura 5.20, foram apresentados dados de temperatura e dados de FoF2 e hmF2 obtidos através de medida de ionossonda localizadas no INPE-Fortaleza. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 311 e 340 com um período em torno de 13 dias, o mes-

mo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

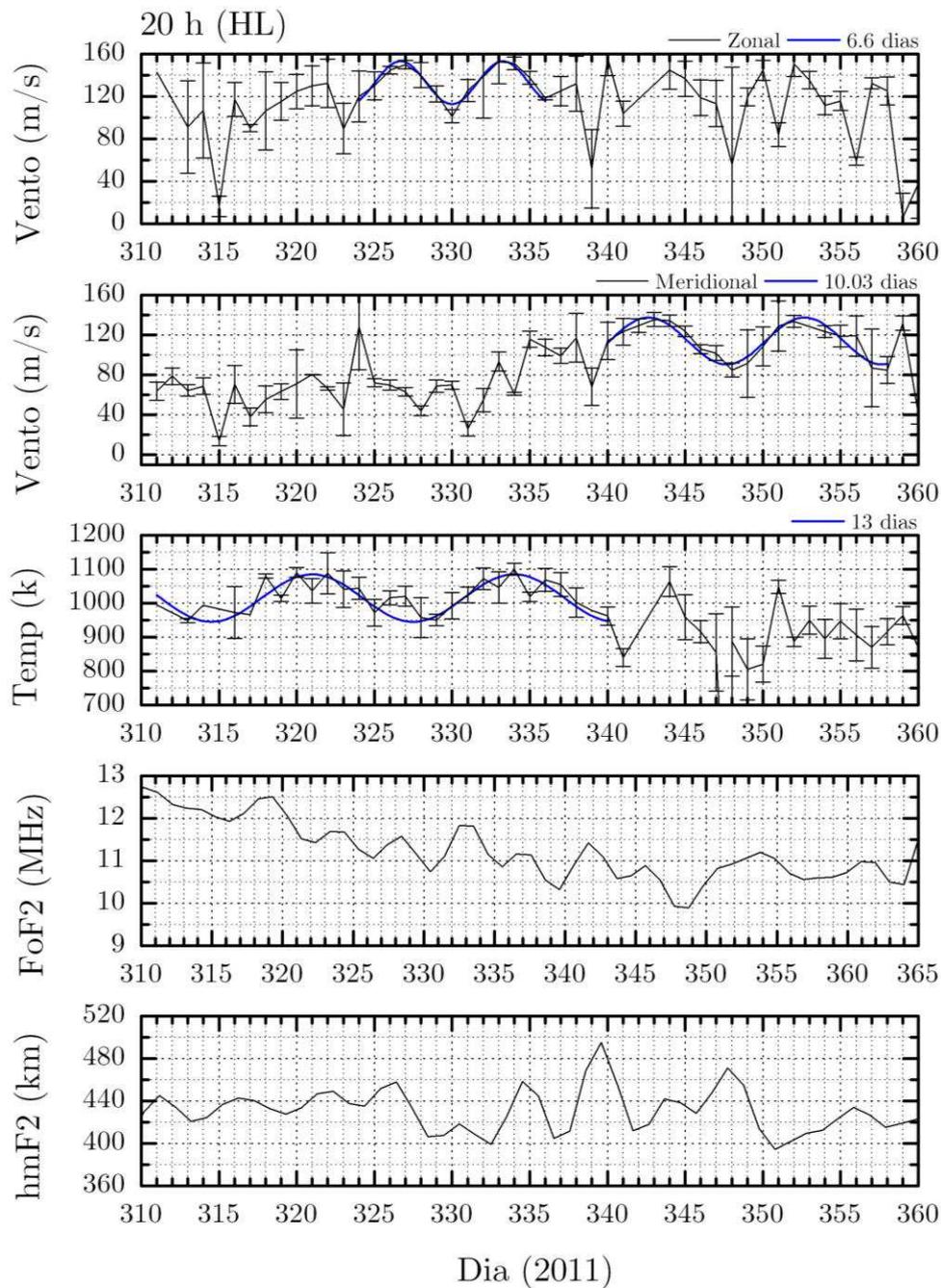


Figura 5.20 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 20 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,6, 10,03 e 13 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

A Figura 5.21 apresenta dados de vento zonal e meridional para o mesmo período de observação da Figura 5.20, mas em torno das 21 h (hora local). Pode-se observar que entre os dias 324 e 336 os dados de vento zonal apresentam uma periodicidade da ordem de 7 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 340 e 358 nos dados de vento meridional, mas com um período em torno de 10 dias. Com já foi mencionado, os dados de vento zonal e meridional apresentam oscilações que antecedem o dia do evento estudado, bem como posterior ao mesmo, embora sem ser bem definida. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 310 e 340 com um período em torno de 13 dias.

Analisando os dados de vento zonal e meridional em torno das 22 h (HL) apresentados na Figura 5.22, nota-se que entre os dias 324 e 336 os dados de vento zonal apresentam um período da ordem de 7 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 338 e 356 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 9 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 310 e 340 com um período em torno de 14 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

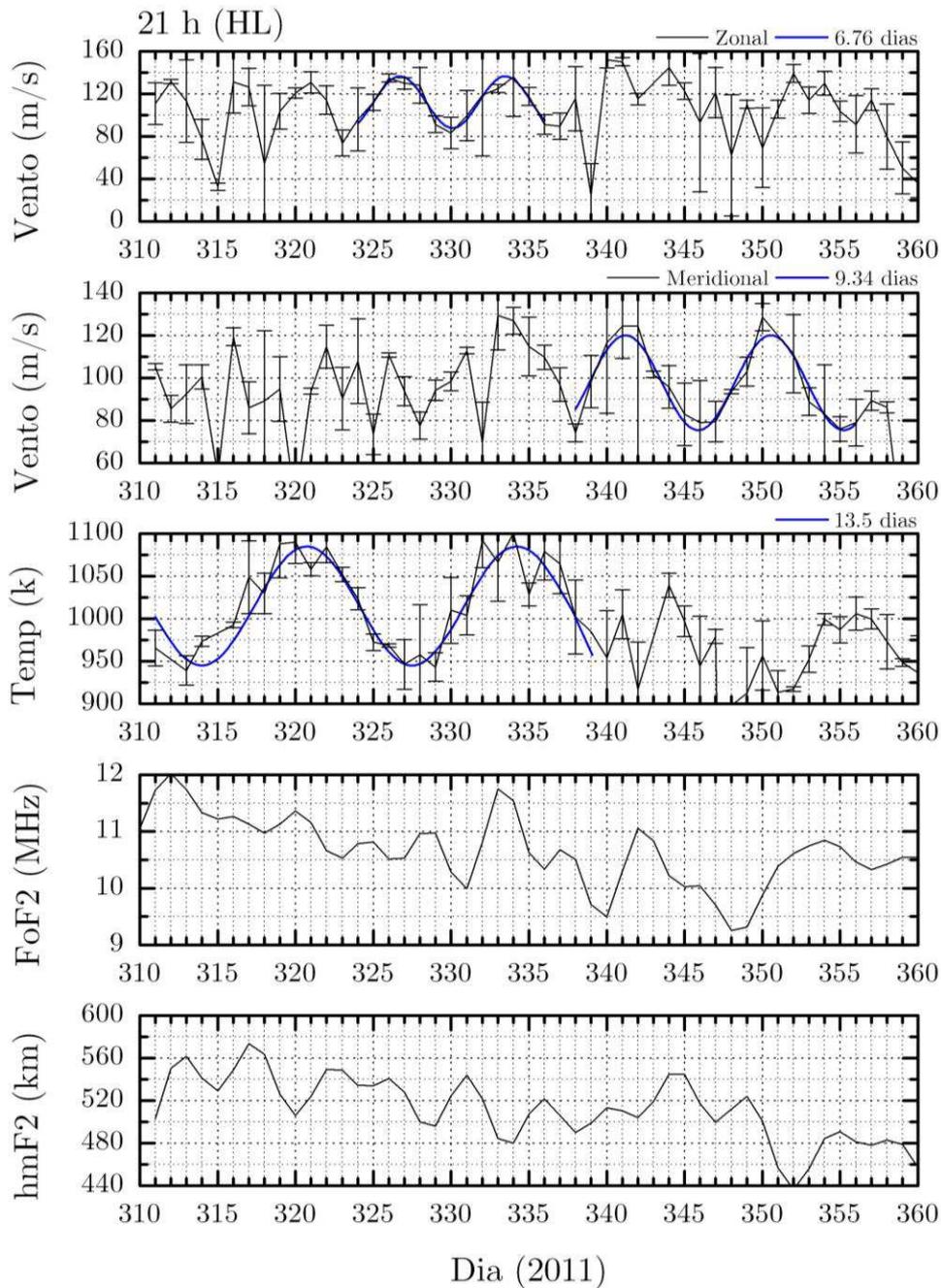


Figura 5.21 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 21 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,73, 9,34 e 13,5 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

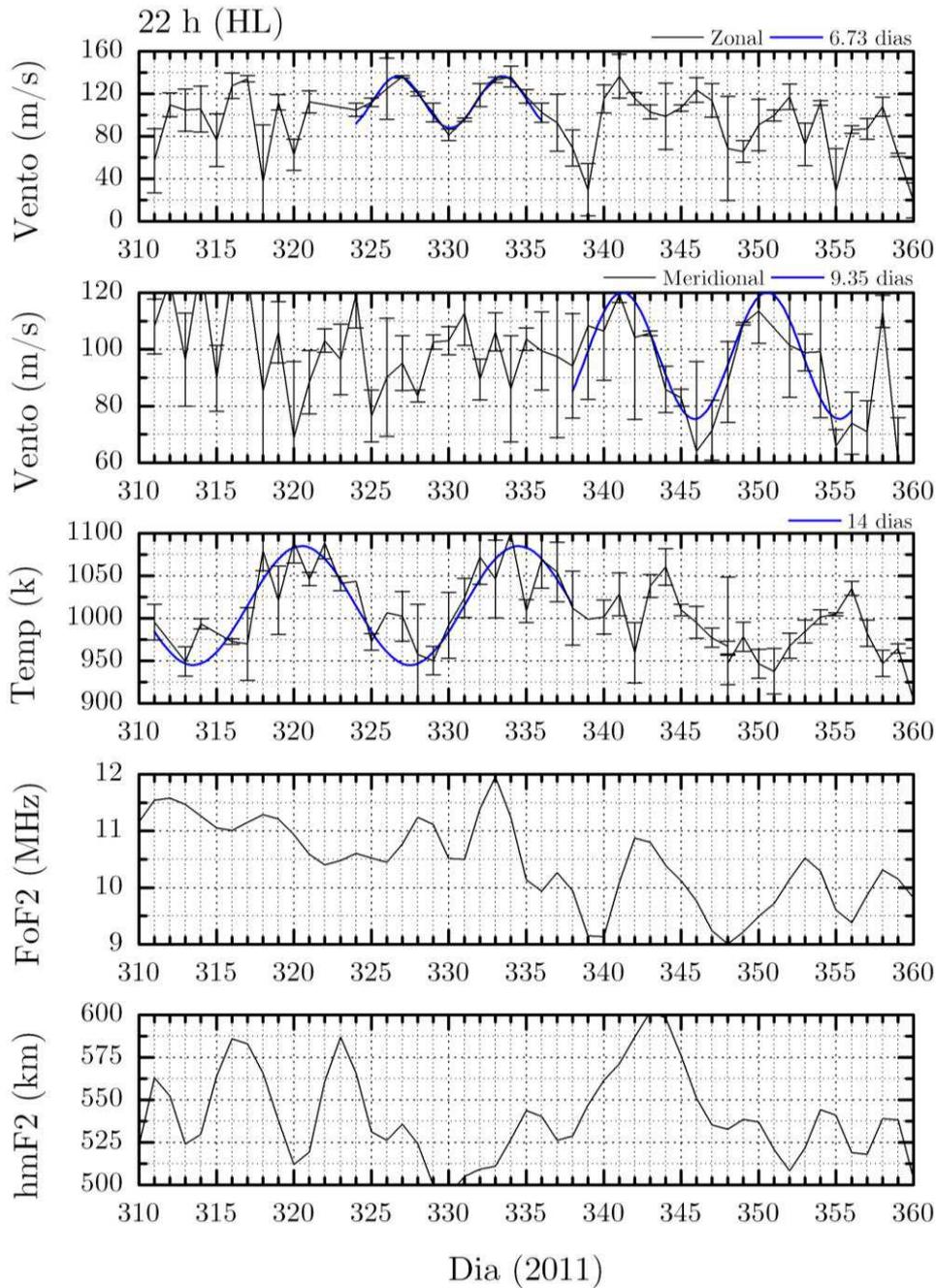


Figura 5.22 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 22 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 6,69; 9,35 e 14 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

Na Figura 5.23, nos dados de vento zonal e meridional em torno das 23 h (HL) apresentados é possível observar que entre os dias 324 e 337 os dados de vento

zonal apresentam uma peridiocidade da ordem de 7 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 340 e 337 nos dados de vento meridional, mas com um período em torno de 10 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 315 e 340 com um período em torno de 14 dias.

Nos dados de vento zonal e meridional em torno das 24 h (HL) apresentados na Figura 5.24, nota-se que entre os dias 324 e 337 os dados de vento zonal apresentam uma oscilação com período da ordem de 8 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 340 e 356 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 10 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 313 e 340 com um período em torno de 13 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

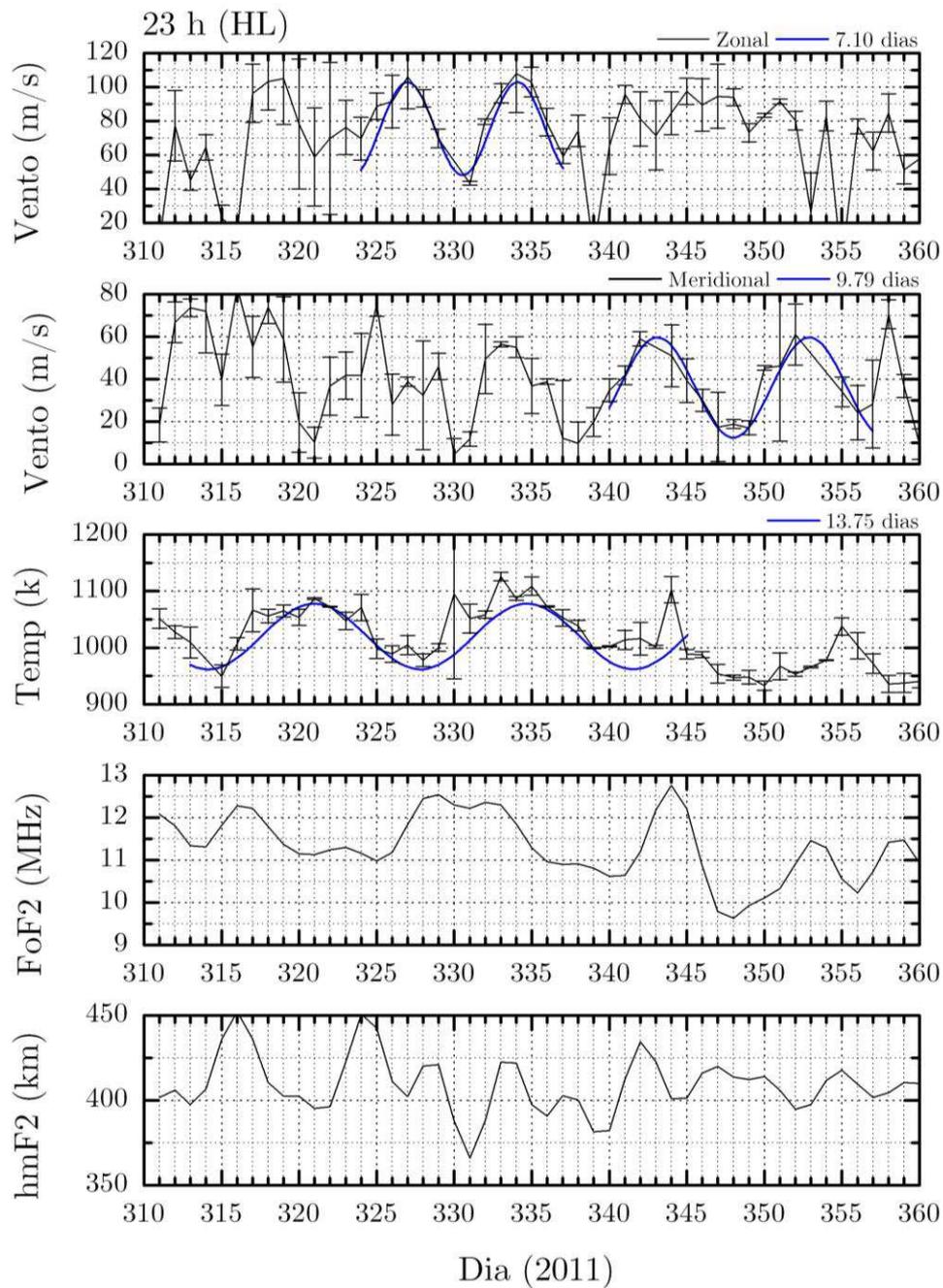


Figura 5.23 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 23 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,10, 9,79 e 13,75 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

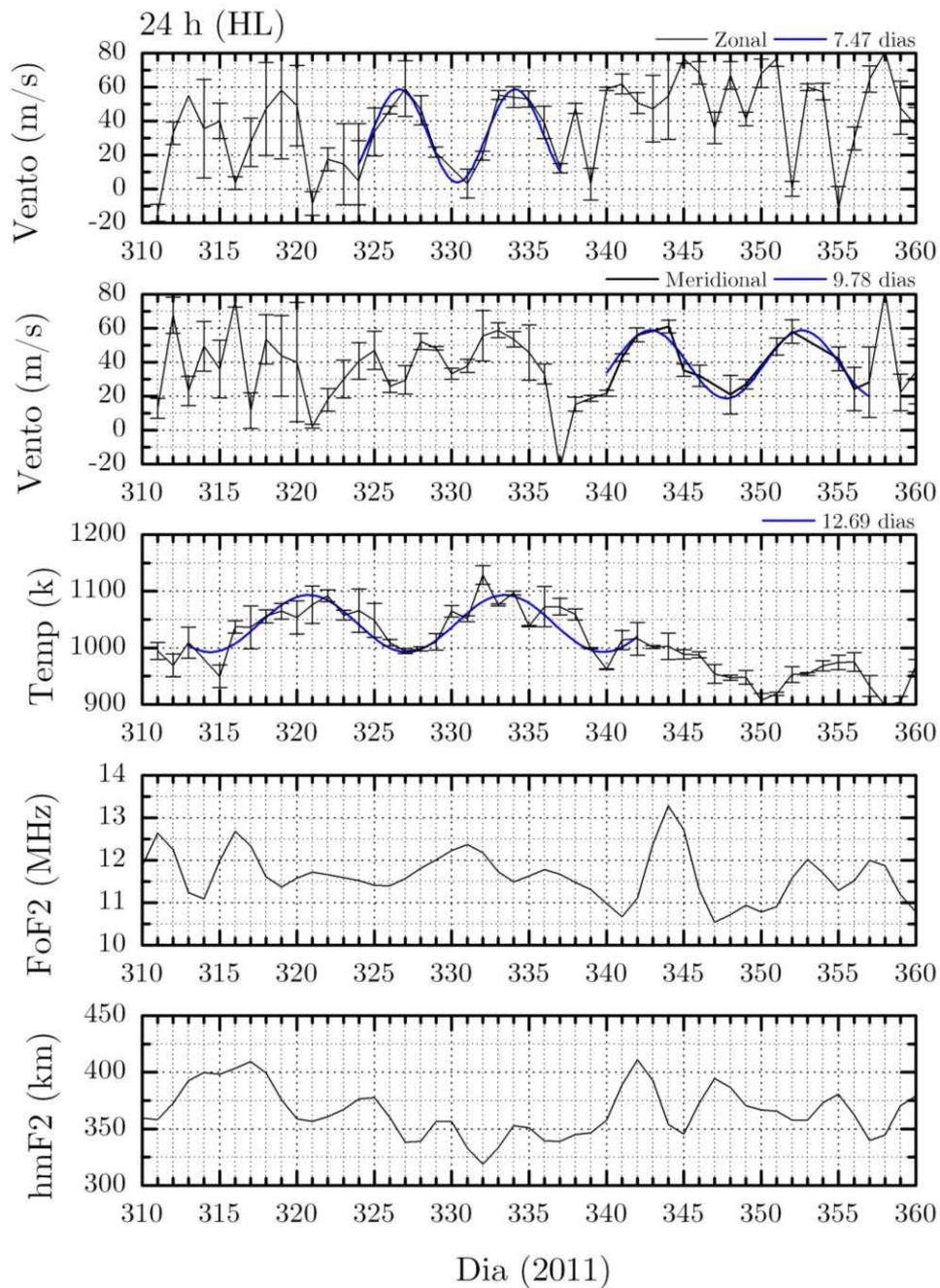


Figura 5.24 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 24 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,74, 9,68 e 12,69 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

Na Figura 5.25, nos dados de vento zonal e meridional em torno das 25 h (HL) apresentados é possível observar que entre os dias 324 e 337 os dados de vento zonal apresentam um comportamento oscilatório com período da ordem de 8 dias, o mesmo pode ser visto entre os dias 340 e 357 nos dados de vento meridional, mas com uma periodicidade em torno de 10 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 312 e 340 com um período em torno de 13 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

Os dados de vento zonal e meridional em torno das 26 h (HL) apresentados na Figura 5.26, novamente pode-se notar que entre os dias 324 e 337 os dados de vento zonal apresentam um com período da ordem de 7 dias, enquanto que os dados de vento meridional apresentou entre os dias 341 e 357 uma periodicidade em torno de 10 dias. Os dados de temperatura apresentam um comportamento oscilatório entre os dias 313 e 340 com um período em torno de 13 dias, o mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

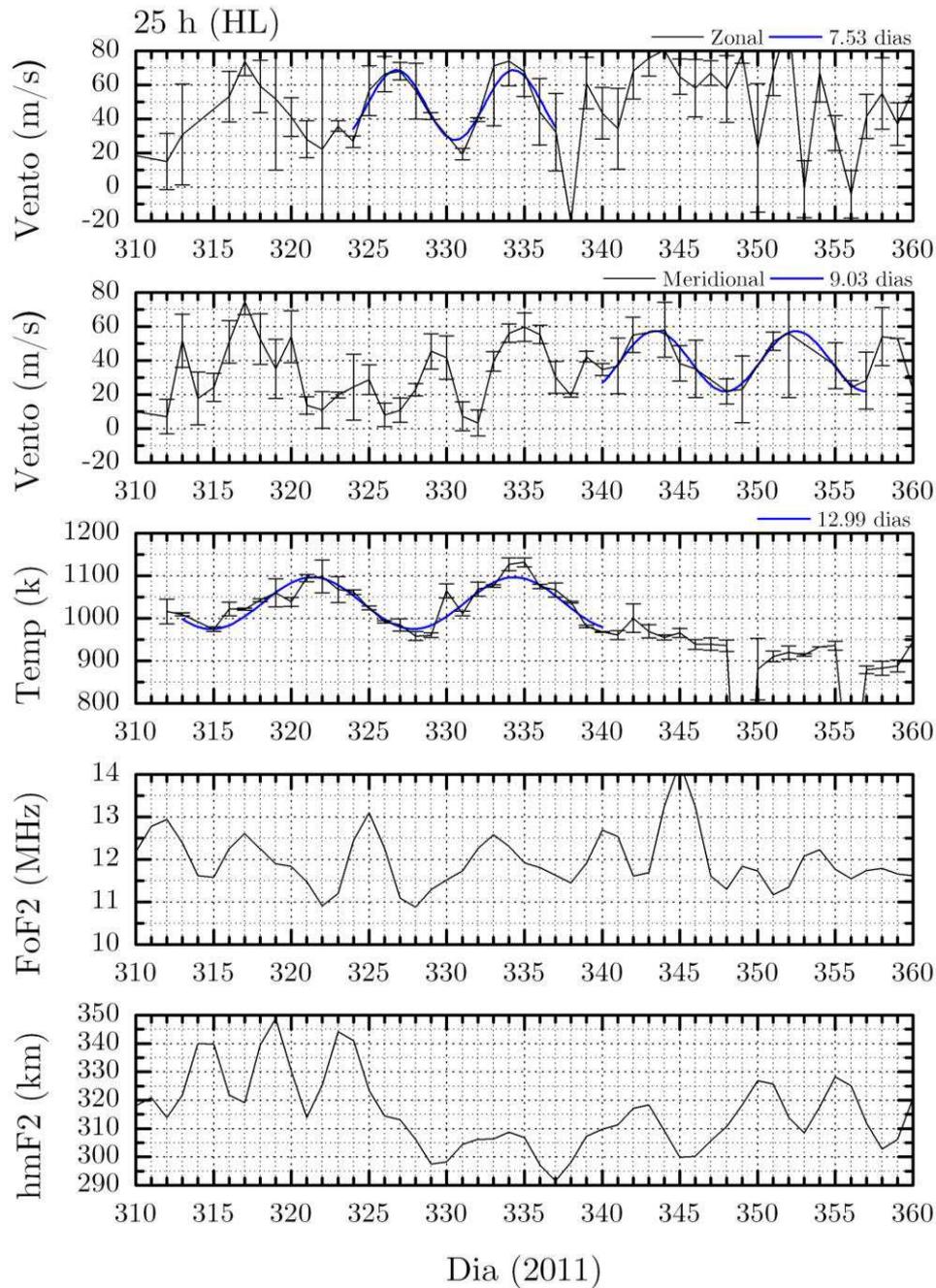


Figura 5.25 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 25 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,53, 9,03 e 12,99 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

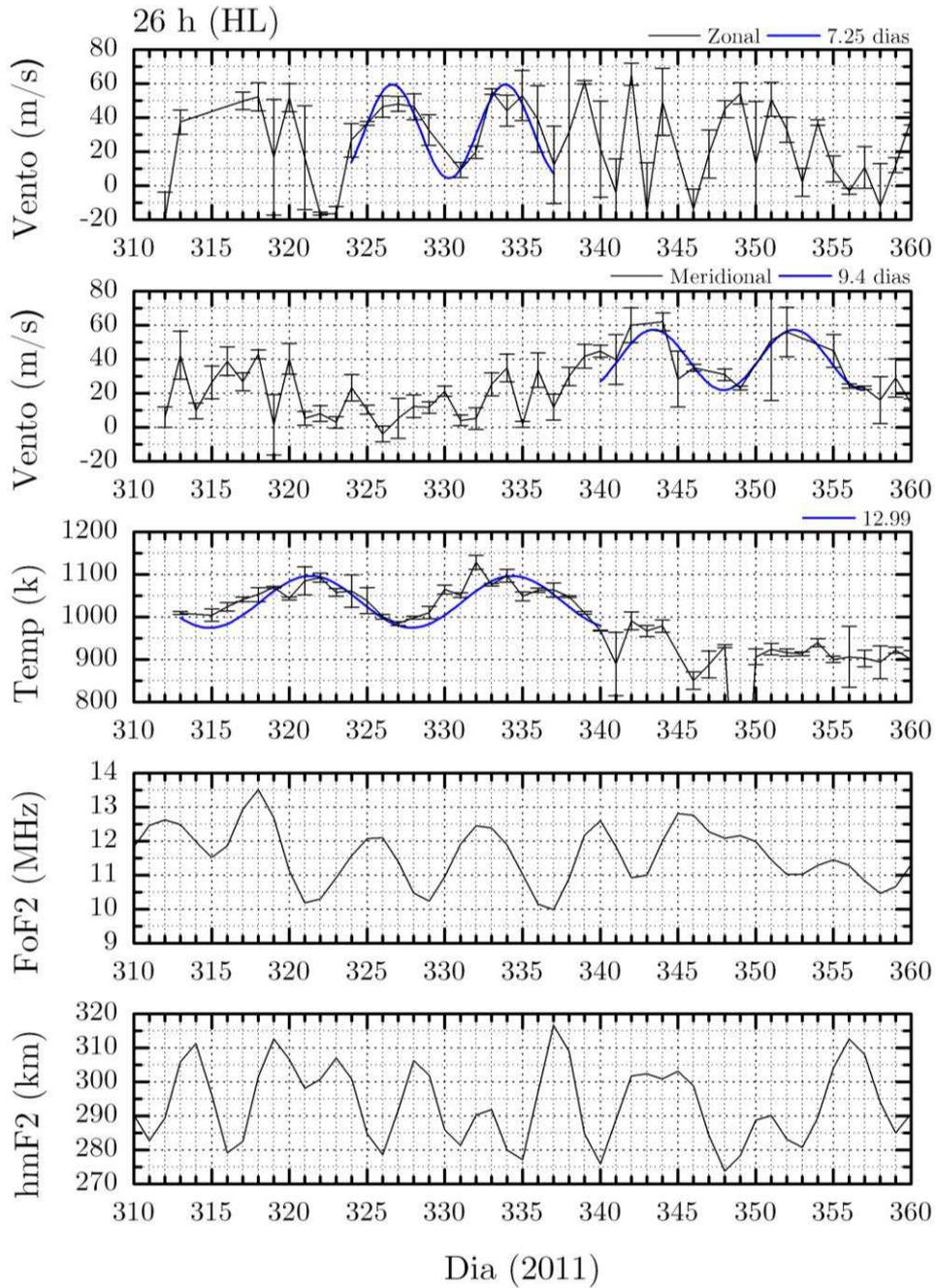


Figura 5.26 - Dados de vento zonal, meridional, temperatura, FoF2 e hmF2 observado entre os dias 310-360 (06/11-26/12) de 2011, em torno das 26 h (hora local), observado através de medidas do Interferômetro Fabry-Perot e ionosonda. A linha azul representa uma curva de ajuste com períodos de 7,25, 9,4 e 12,99 dias para os dados de vento zonal, meridional e temperatura, respectivamente.

A seguir a Figura 5.27 e 5.28 apresenta dados de Fazenda Ap e Dst para o ano de 2011, respectivamente. Fazendo a mesma análise com os parâmetros de atividade magnética, Na Figura 5.29 pode ser visto que as séries temporais do índice

Ap apresentou oscilações em torno de 9-10 dias. Enquanto que na Figura 5.30, a análise para o índice Dst apresentando um pico acentuado em torno 10 dias.

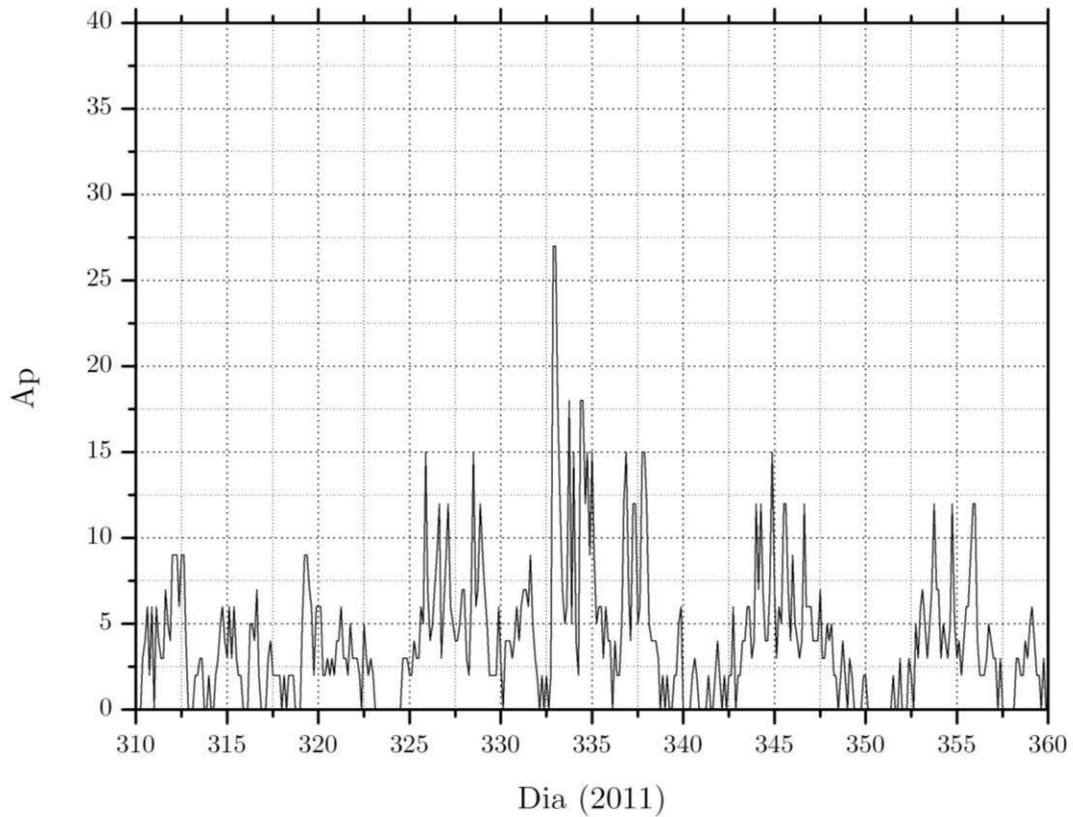


Figura 5.27 – Dados do índice Ap disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2011.

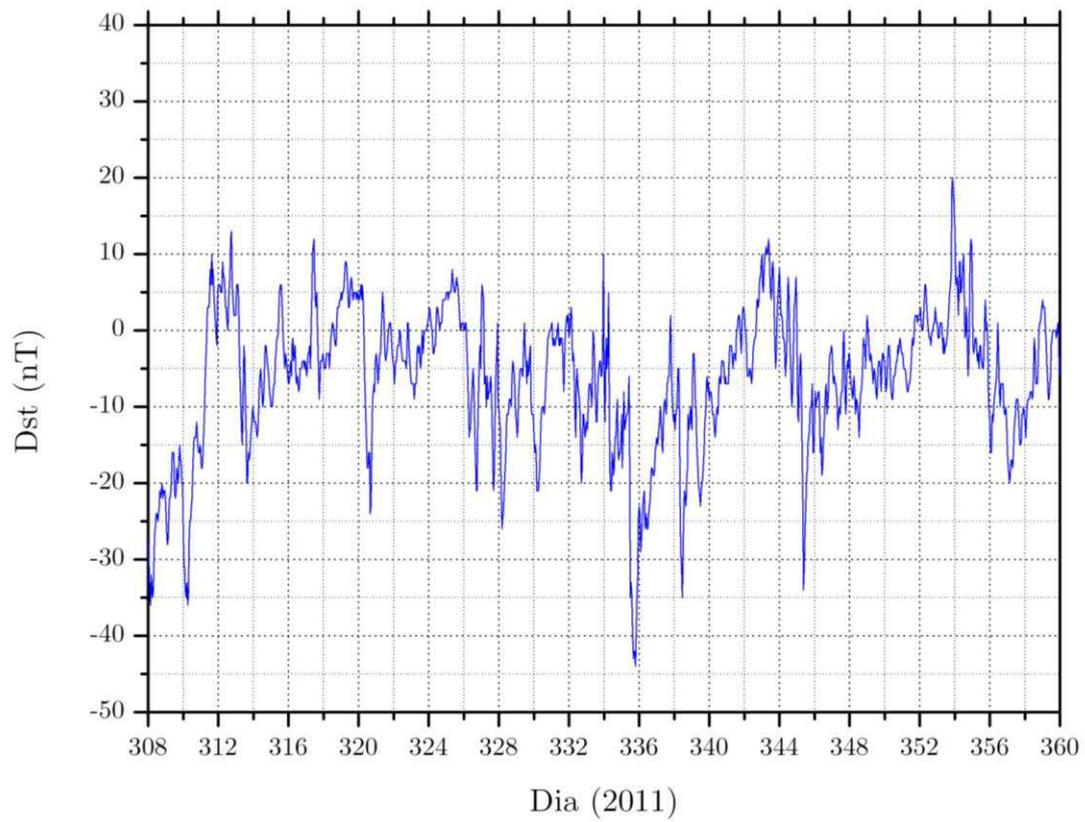


Figura 5.28 – Dados do índice Dst disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para o mesmo período dos dados de vento termosféricos 2011.

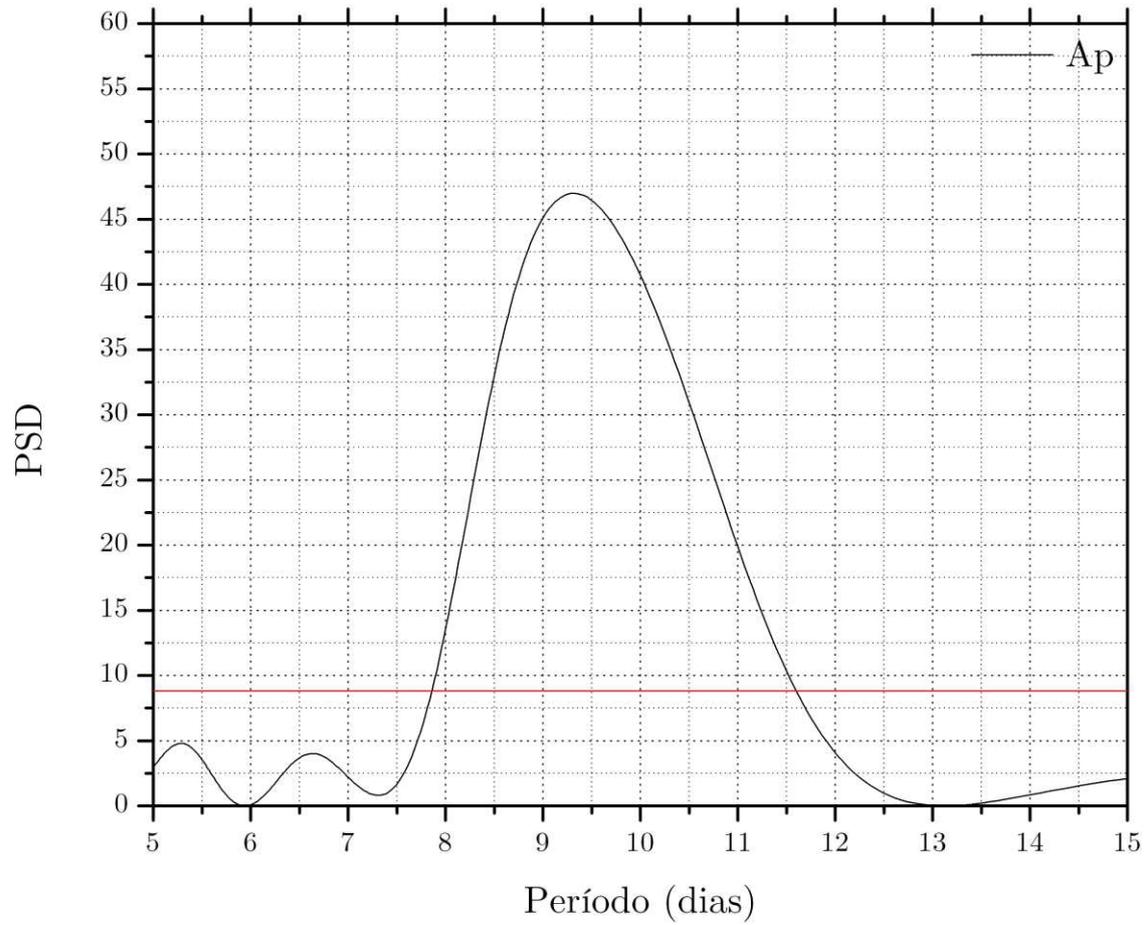


Figura 5.29 - Periodograma de L-S da série temporal do índice AP disponível no site da Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

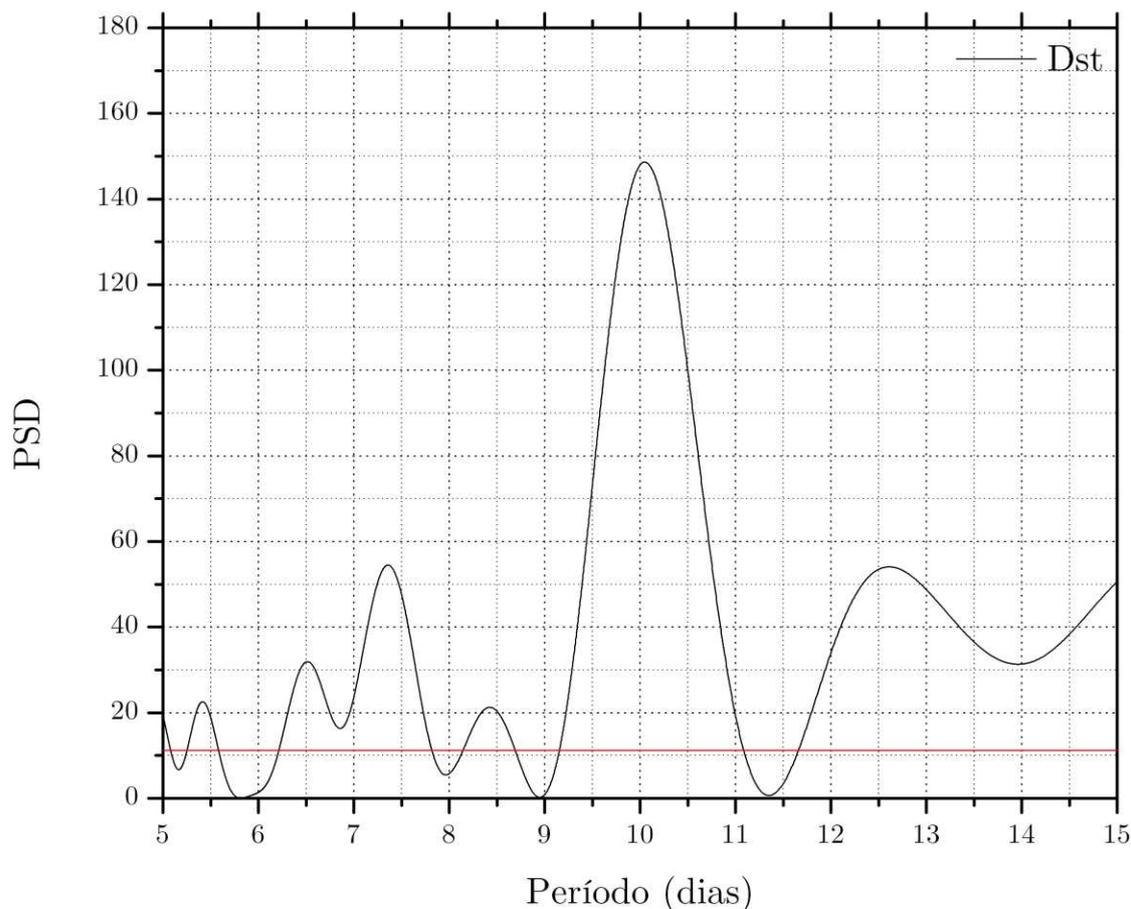


Figura 5.30 - Periodograma de L-S da série temporal do índice Dst disponível no site da universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional. A reta horizontal indica um nível de confiança de 95 %.

## 5.2 DISCUSSÕES

A ocorrência de ondas de escala planetária na mesosfera-termosfera-ionosfera vem sendo estudada por vários autores através de medidas de radar meteórico, radar MF, radar de espalhamento incoerente, fotômetro e ionossonda operando em diferentes regiões do globo terrestres (e. g. CHEN, 1992; FORBES, 1992, 1995 e 1996; FORBES e ZHANG, 1997; LASTOVICKA, 1997; JACOBI, 1998; ALTADILL et al., 1998, 2004; BORRIES et al., 2002; TAKAHASHI et al., 2002, 2012, 2013; ALTADILL e APOSTOLOV, 2003; LASTOVICKA et al., 2003, 2006; LIMA, 2004; FORBES et al., 1995; FAGUNDES et al., 2005; ABDU

et al., 2006; LIMA et al., 2006 e 2011; POGORELTSEV et al. 2007; PEDATELLA et al., 2009; ENGLAND et al., 2012 e LIU et al. 2012). No entanto, poucos trabalhos foram realizados utilizando dados de vento termosférico na altura de 250 km para região próxima ao nordeste brasileiro.

Recentemente Meriwether et al. (2011) fizeram uma climatologia dos ventos termosféricos equatoriais sobre Cajazeiras para um ano de dados, compreendida entre outubro de 2009 a setembro 2010, através de medidas de IFP utilizando a técnica de modo cardeal utilizada neste trabalho. Chapagain et al. (2012) utilizando dados de ventos termosféricos através de medidas de IFP e de um imageador *all sky* mostraram que existe uma boa relação entre dados de vento zonal termosférico e a velocidade de deslocamento zonal das bolhas de plasma equatoriais. Paulino (2012) utilizou dados de vento termosférico como banco de dados para calcular a propagação vertical de 26 ondas de gravidades de média escala utilizando a técnica de traçador de trajetória.

Mesmo existindo trabalhos envolvendo medidas de vento termosférico a 250 km de altura, não é possível encontrar bibliografia voltada pra estudar ocorrência de oscilações de larga escala em dados de vento na altura proposta, o que torna a discussão sobre os resultados apresentados aqui mais difícil. Com isso, faz-se necessário a utilização de trabalhos realizados em outras regiões da atmosfera e/ou em outras latitudes na realização de uma discussão.

A análise de dados de vento zonal e meridional da termosfera equatorial brasileira, obtidos através de medidas de Fabry-Perot, revelou a ocorrência de oscilações de escala planetária para o período de outubro, novembro e dezembro de 2010/2011. Para o ano de 2010, foram observadas oscilações entre 7 e 12 dias para dados de vento zonal e meridional, enquanto que os dados de temperatura apresentam oscilações entre 11-12 dias. Para o ano de 2011, foram observadas oscilações próximas de 6 e 10 dias para dados de vento zonal e meridional, respectivamente. Mesmo comportamento pode ser visto nos parâmetros ionosféricos, mas com um período menor.

Lima (2004) utilizando medidas de ventos horizontais obtidas entre abril de 1999 e abril de 2002, através de radar meteórico localizado em Cachoeira Paulista e das emissões OI (557,7), O2 (0,1), e OH (6-2) da luminescência atmosférica noturna, observadas entre janeiro de 1998 e dezembro de 2001, através de fotômetro multicanal localizado em São João do Cariri foram usadas na investigação da dinâmica de oscilações de escala planetária na região da alta mesosfera e baixa termosfera equatorial de baixas latitudes do hemisfério Sul. Os resultados das análises dos ventos de Cachoeira Paulista revelaram a presença de oscilações de escala planetária em várias ocasiões durante o período considerado. Dentre as oscilações identificadas nos ventos, as manifestações com períodos próximos de quase 10 dias foram reveladas nos ventos de Cachoeira Paulista, principalmente, nos solstícios de verão com amplitudes máximas entre 12 e 15 m/s.

As oscilações verificadas na componente zonal para o ano de 2010 (zonal/2010) e meridional para o ano de 2011 (meridional/2011) medido pelo Fabry-Perot, apresenta semelhança com o que foi obtido por Lima (2004). As amplitudes das oscilações encontradas nos dados de vento zonal/2010 e meridional/2011 apresentam valores maiores do que foi encontrado por Lima (2004). Foram encontradas amplitude entre 19,76-38,78 m/s e 14,33-20,04 m/s, para dados de vento zonal e meridional, respectivamente, para o ano de 2010. Enquanto que, foram encontradas amplitude de 20,02-27,52 m/s e 17,68-23,51 m/s, para dados de vento zonal e meridional, respectivamente, para o ano de 2011.

Lima (2004) também relata a ocorrência de oscilações próximas a 7 dias no final de novembro e início de dezembro de 2000. Oscilações estas, também observadas utilizando o Interferômetro Fabry-Perot para dados de ventos termosféricos.

Forbes et al.(1995) e Forbes (1996) observaram oscilações de escala de dias na região MLT (do inglês *Mesosphere and Lower Thermosphere*), mesosfera e baixa termosfera, em dados observados através de medidas de radar meteórico e MF, durante janeiro e fevereiro de 1979, em Obninsk, Rússia e Saskatoon, Canadá. Os trabalhos citados apresenta oscilações de  $\pm 10$  m/s com períodos próximos a

5, 10 e 16 dias, correspondentes a modos normais de Rossby com comprimento de onda zonal igual a 1. A evidência de ondas planetárias na MLT também é comprovada pela variação de parâmetros ionosféricos nas regiões D, E, e F. Em paralelo, os autores apresentam uma análise espectral da variação da componente horizontal do campo magnético medido em Huancayo, Peru, para os mesmos dias das medidas de radar. A análise espectral da variação horizontal do campo magnético apresenta a mesma característica espectral encontrada na análise dos dados de vento, ou seja, a análise espectral apresentou períodos próximos a 5, 10 e 16 dias, o que o autor sugere uma relação causa-efeito.

Pancheva e Lysenko (1988) apresentam dois mecanismos por meio dos quais, ondas planetárias com origem na baixa e média termosfera podem induzir efeitos no sistema termosfera-ionosfera. O primeiro mecanismo sugerido seria que o movimento vertical associado a ondas planetárias próximo de 100 km de altura poderiam gerar variações nas razões  $[O]/[N_2]$  e  $[O]/[O_2]$ , o que afetaria a taxa de recombinação da região F. O segundo mecanismo, seria o movimento do vento neutro com período de dias entre 100 e 170 km altura e amplitude suficiente para induzir campo elétrico, o qual modularia a altura da densidade de plasma da camada F. Hagan et al. (1993) e Forbes et al. (1995) com estudos de oscilações de 2 e 16 dias, respectivamente, não encontraram evidências que ondas de escala planetária possam penetrar diretamente na região de dínamo (100-170 km). O que sugere os seguintes cenários:

- Ondas planetárias estratosférica/mesosféricas são capazes de modular o acesso de ondas de gravidades a regiões mais altas da atmosfera, onde estarão sujeitas a efeitos de amortecimento, instabilidade convectiva e dissipação viscosa. Neste caso, a divergência do fluxo de momento de ondas de gravidade na região E poderiam funcionar como uma segunda fonte de ondas planetárias neste nível.
- Ondas planetárias poderiam modular a propagação de ondas de maré, o qual poderia participar da geração do campo elétrico a esta altura.

- Oscilações com períodos entre 2-20 podem ser ocasionados por vários outros mecanismos tais como: variação do fluxo solar, variação do aquecimento joule e etc.

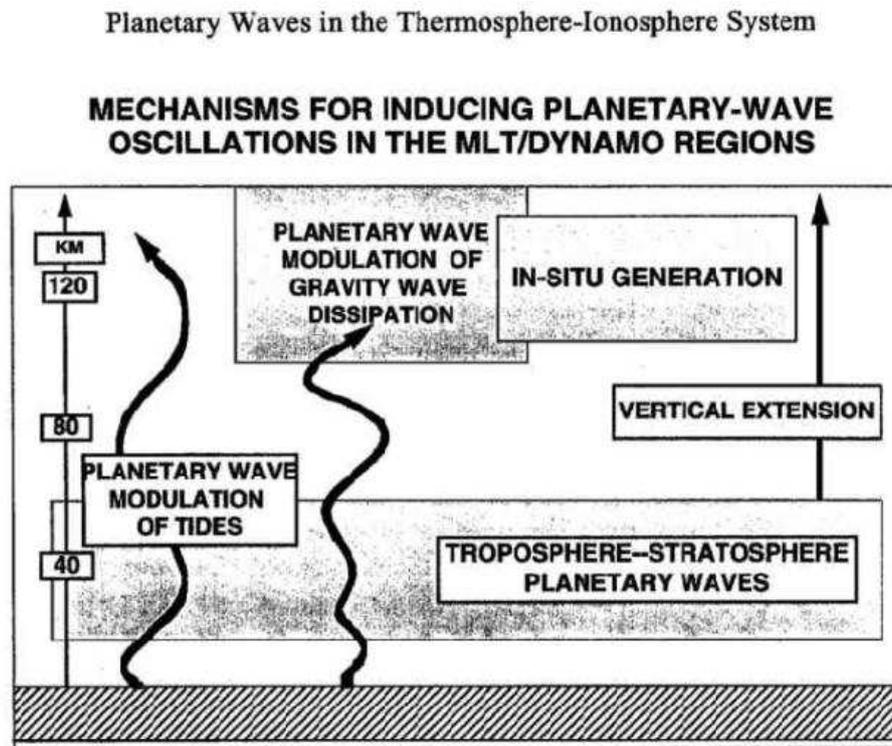


Figura 5.31 - Ilustração dos possíveis mecanismos de indução de ondas planetárias na região da MLT e de dínamo. Fonte: FORBES (1996).

Na Figura 5.31 pode ser visto uma ilustração dos possíveis mecanismos de indução de ondas planetárias na região da MLT e de dínamo segundo Forbes (1996).

Analisando dados de ionossonda e de atividade magnética para o mesmo período dos dados de ventos termosféricos obtidos pelo IFP, não foi possível evidenciar a mesma relação causa e efeito demonstrada nos trabalhos de Forbes et al.(1995) e Forbes (1996).

Seguindo a mesma proposta dos trabalhos acima, Fagundes (2005) utilizando sondagens ionosféricas da camada F sobre São José dos Campos, entre junho e setembro de 2003, apresenta uma análise da propagação de ondas de longos períodos advindas de regiões mais baixas da atmosfera e oscilações de origem solar

na ionosfera, e como estas oscilações são capazes de modular a região F. Analisando dados de ionossonda do tipo CADI (do inglês *Canadian Advanced Digital Ionosonde*) para o parâmetro de altura virtual da camada F, para 4 horas distintas de um dia de observação, apresenta oscilações com períodos próximos a 2, 5, 10, 16 e períodos entre 24-30 dias. Segundo o autor, as variações da altura virtual, para frequências fixas, apresentam grandes amplitudes ( $>50$  km). A análise espectral apresenta períodos entre 9-17 dias e 24-30 apresentam energia espectral intensa, principalmente durante o dia. As oscilações com períodos 2, 5, 10 e 16 dias encontradas durante o dia, estão relacionadas a ondas planetárias com origem troposférica. Os períodos entre 24-30 dias estão relacionadas com oscilação do Sol (27 dias). As oscilações encontradas durante observações noturnas, para períodos próximos a 2, 5 e 10 dias, estão relacionadas a distúrbios magnéticos. Resultado semelhante pode ser conferido nos trabalho de Lastovicka et al. (2006). Utilizando dados de FoF2 obtidos em duas estação no Japão, duas nos Estados Unidos e 4 na Europa central para o período de um ciclo solar (1979-1989), Ele utilizou transformadas wavelet, encontraram oscilações com períodos próximos a 5, 7, 10 e 16 dias com uma persistência de mais de 3 ciclos.

Investigando a ocorrência de ondas planetárias (2-18 dias) em dados de vento zonal e meridional na mesosfera sobre a Europa central, Jacobi (1998) fazendo a análise de dados de vento zonal e meridional entre 1983-1995, constatau oscilações com períodos próximos a 10 e 16 dias são mais frequentes do que períodos mais curtos. Jacobi (1998) também percebeu que, geralmente, a componente meridional é menos intensa do que a componente zonal. Oscilações com períodos próximos a 5 dias se apresentam mais frequente na primavera, enquanto que as oscilação próximas de 10 e 16 dias ocorreram mais no inverno do que no verão. O mesmo resultado pode ser visto nos dados de IFP, onde os dados de vento zonal são geralmente mais intensos e apresentam amplitudes maiores do que os valores encontrados nos dados de vento meridional.

Pedatella et al. (2009) utilizando medidas *in situ* de densidade eletrônica e do conteúdo eletrônico total, através de observações do satélite CHAMP e GPS,

respectivamente, estudaram como oscilações de quase 16 dias são capazes de influenciar a ionosfera em baixas latitudes, para o período de 1 de dezembro de 2005 a 1 de março de 2006. Em adição, o trabalho apresenta medidas de temperatura extraídas através de observações do satélite TIMED/SABER na região do dínamo, para o mesmo período estudado, em que é observado a ocorrência de oscilações com o mesmo período citado acima. Os autores mostram que o crescimento na temperatura zonal equatorial está relacionado com o crescimento na média zonal da densidade eletrônica e no conteúdo eletrônico total, dentro de um intervalo de  $\pm 10-20^\circ$  de latitude magnética. Tomando uma altura fixa (350 km), eles mostraram que as oscilações em dados de densidade eletrônica foram maiores de 45 % com relação ao *background*. Influências de ondas planetárias também foram observadas na região F.

Análise de parâmetro ionosféricos h'F e FoF2 obtidos em regiões equatoriais e de baixa latitudes, Takahashi et al. (2012) investigou a ocorrência de oscilações de 2 dias na região MLT da atmosfera. Através 3 anos de dados (2005-2007) verificou-se que existe claramente uma assinatura de ondas de 2 dias na ionosfera, o qual é mais evidente em dados de FoF2 do que em dados de h'F. O que sugere que oscilações de 2 dias na ionosfera sejam devidas a fortes oscilações no vento meridional termosférico geradas por ondas planetárias. Comportamento semelhante pode ser visto nos dados de IPF para o ano de 2011, onde a componente meridional apresentou a mesma característica espectral observada no parâmetro FoF2, para o mesmo período do ano.

## 6. CONCLUSÕES

Utilizando dados de ventos termosféricos (componentes zonal e meridional) observados através de medidas de dois Interferômetros de Fabry-Perot (IFP), localizados em Cajazeiras e São João do Cariri entre os meses de outubro a dezembro de 2010 e 2011, foi possível observar a ocorrência de oscilações de escala de dias na termosfera equatorial brasileira. Em paralelo, de modo a investigar possíveis mecanismos de geração destas oscilações encontradas nos dados dos ventos termosféricos, foram analisados dados de temperatura termosférica, dados de parâmetros ionosféricos tais como hmF2 e FoF2, observados através de medidas da ionossonda localizada no INPE-Fortaleza e dados de atividade magnética para os mesmo período dos dados de vento zonal e meridional.

As principais características encontradas para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2010, foram:

- Os dados de vento zonal e meridional apresentaram oscilação com períodos entre 7 e 12 dias;
- As oscilações observadas nos dados de temperatura apresentaram oscilações com período em torno de 11 e 12 dias;
- As oscilações observadas nos dados de vento zonal e meridional apresentaram amplitudes diferentes para as horas escolhidas. Os dados de vento zonal apresentaram amplitudes entre 19,76 e 38,78 m/s. Os dados de vento meridional apresentaram uma amplitude menor do que os dados de vento zonal, apresentando uma amplitude entre 14,33 e 20,04 m/s;
- A análise dos parâmetros ionosféricos hmF2 e FoF2 e de dados de atividade magnética para os mesmos intervalos de tempo dos dados de vento obtidos pelo IFP, apresentaram as oscilações com períodos da ordem de dias, sugerindo assim, uma relação de causa e efeito.

As principais características encontradas para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2011, foram:

- Os dados de vento zonal e meridional apresentaram oscilação com períodos entre 6 e 10 dias;
- As oscilações observadas nos dados de temperatura apresentaram oscilações com período em torno de 12 e 14 dias;
- As oscilações observadas nos dados de vento zonal e meridional apresentaram amplitudes diferentes para horários escolhidos. Os dados de vento zonal apresentaram uma amplitude entre 20,2 e 27,37 m/s. Os dados de vento meridional apresentaram uma amplitude menor do que os dados de vento zonal, apresentando uma amplitude entre 17,68 e 23,59 m/s;
- A análise dos dados dos parâmetros ionosféricos hmF2 e FoF2 e dados de atividade magnética para os mesmos intervalos de tempo dos dados de vento obtidos pelo IFP, apresentaram as oscilações com períodos da ordem de dias no dados de ventos termosféricos, sugerindo assim, uma relação de causa e efeito.

Como sugestão de trabalhos futuros, é possível investigar:

- A ocorrência simultânea de oscilações em outras localidades utilizando os interferômetros localizados em Cajazeiras, São João do Cariri, como também, os interferômetros localizados em Arequipa, Peru e Arecibo, Porto Rico;
- A ocorrência de ondas planetária em regiões mais baixas da atmosfera do que as estudadas neste trabalho. Com isso, seria possível verificar se as oscilações detectadas na termosfera seriam geradas devido a propagação de ondas vindas de regiões mais baixas da atmosfera;

- Presença de ondas de gravidade secundária neste período para investigar possíveis interações;
- Possíveis efeitos de penetração das oscilações via teoria do dínamo através de parâmetros ionosféricos de camadas inferiores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RATCLIFFE J. A. Physics of upper atmosphere. 1th ed., **Academic Press**, 1960.

CHAMBERLAIN J. W. e SOBOUTI, Y. Fluorescent Scattering in Planetary Atmospheres. I. Basic Theoretical Considerations. **Astrophysical Journal**, vol. 135, p.925, 1961.

KRASOVSKY, V.I. et al. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400., **Planet. Space Sci.**, 9, 883-915, 1962.

PETERSON, V. L. Fregion nightglow emissions of atomic oxygen: 1. **Theory. J. Geophys. Res.**, 71, 2255-2265, doi: 10.1029/JZ 071i009p02255. 1966.

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. **Astrophysics and Space Science**, v. 39, n. 02, p. 447-462, 1976.

SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. **The Astrophysical Journal**, v. 263, p. 835, dez. 1982.

KILLEEN, T. L. e HAYS, P. B. Doppler line profile analysis for a multichannel Fabry-Perot interferometer. **Applied optics**, v. 23, n. 4, p. 612, 15 fev. 1984.

HORNE, J. H. e BALIUNAS, S. L. A prescription for period analysis of unevenly sampled time series. **Astrophysical Journal**, Part 1, v. 302, n. 2, p. 757-763, 1986.

LINK, R. e COGGER, L. L. A reexamination of the O I 6300-Å nightglow. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. A9, p. 9883, 1988.

PANCHEVA, D. and LYSENKO, I. Quasi-two-day fluctuations observed in the summer F region electron maximum, **Bulgarian Geophys. J.**, XIV (2), 41–51, 1988.

Volland, H. Atmospheric tidal and planetary waves. **Dordrecht: Kluwer Academic Publ.**, 348p, 1988.

MENVIELLE, M. e BERTHELIER, A. The K-derived planetary indices: description and availability. **Reviews Geophysical Space Physics**, v. 29, p. 415-432, 1991.

CHEN, P. R. Two-day oscillation of the equatorial ionization anomaly. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A5, p. 6343, 1992.

FORBES, J. M. e LEVERONI, S. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 10, p. 981-984, 22 de maio 1992.

HOLTON, J. R. An introduction to dynamic meteorology. 3th ed., San Diego: **Academic Press**, v. 511p, 1992.

HAGAN, M. E. et al. Numerical investigation of the propagation of the quasi-2-day wave into the lower thermosphere, **J. Geophys. Res.**, 98, 23,193–23,205. 1993.

JOHNSTON, J. E. e BROADFOOT, A. L. Midlatitude observations of the night airglow: Implications to quenching near the mesopause. **Journal of Geophysical Research** (ISSN 0148-0227), vol. 98, no. A12, p. 21,593-21,603. 12/1993.

SOBRAL, J. H. A. et al. Determination of the quenching rate of the O(<sup>1</sup>D) by O(<sup>3</sup>P) from rocket-borne optical (630 nm) and electron density data. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A5, p. 7791, 1993.

TASCIONE, T. F. Introduction to the space environment. Krieger Publishing, cap. 5, p. 45-58, 1994.

FORBES, J. M. *et al.* Quasi 16-day oscillation in the mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. D5, p. 9149, 1995.

FORBES, J. M. Tidal and Planetary Waves. **geophysical monograph series**, v. VOL. 87, p. 67-87, 1995.

FORBES, J. M. Planetary waves in the thermosphere-ionosphere system. **Journal of geomagnetism and geoelectricity**, v. 48, n. 1, p. 91-98, 1996.

FORBES, J. M. e ZHANG, X. Quasi 2-day oscillation of the ionosphere: A statistical study. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 9, p. 1025-1034, jun. 1997.

LAŠTOVIČKA, J. Observations of tides and planetary waves in the atmosphere-ionosphere system. **Advances in Space Research**, v. 20, n. 6, p. 1209-1222, jan. 1997.

ALTADILL, D. et al. First observation of quasi-2-day oscillations in ionospheric plasma frequency at fixed heights. **Annales Geophysicae**, v. 16, n. 5, p. 609-617, 1998.

JACOBI, C. et al. Planetary wave activity obtained from long-period (2–18 days) variations of mesopause region winds over Central Europe (52 °N, 15 °E).

**Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 1, p. 81-93, jan. 1998.

MAEKAWA R. Observations of gravity waves in the mesopauseregion by multicolor airglow imaging. Kyoto. Master Thesis - Kyoto University, 64 p. 2000.

BORRIES, C. et al. Observation of large scale waves in the thermosphere-ionosphere system. **ESA's Second Swarm International Science Meeting**, v. 2, n. 1, 2002.

TAKAHASHI, H. et al. Equatorial planetary wave signatures observed in mesospheric airglow emissions. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics** 64, 1263–1272, 2002.

ALTADILL, D. e APOSTOLOV, E. M. Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere winds. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A11, p. 1403, 2003.

LAŠTOVIČKA, J. et al. Persistence of the planetary wave type oscillations in FoF2 over Europe. **Annales Geophysicae**, v. 21, p. 1543-1552, 2003.

MALTSEV, Y. P. The point of controversy in magnetic storm study (A review). In: Physics of Aurora Phenomena Annual Seminar, 18, Apatity, **Proceedings XVIII**. [S.1], p. 33-40, 2003.

ALTADILL, D. et al. Planetary and gravity wave signatures in the F-region ionosphere with impact on radio propagation predictions. **Annales of Geophysics**, v. 47, p. 1109-1119, 2004.

LIMA, L. M. Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul. 245p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP. 2004.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 771-787, jan. 2005.

FAGUNDES, P. R. et al. Observations of F layer electron density profiles modulated by planetary wave type oscillations in the equatorial ionospheric anomaly region. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. A12, p. A12302, 2005.

LAŠTOVIČKA, J. et al. Persistence of planetary wave type oscillations in the mid-latitude ionosphere. v. 49, n. 6, 2006.

LIMA, L. M. et al. 16-day Waves Observed in the Meteor Winds at Low Latitudes in the Southern Hemisphere. **Advances in Space Research**. doi:10.1016/j.asr.2006.03.033, v. 38, n.Online, p. 2615-2620, 2006.

POGORELTSEV, A. I. et al. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n. 17-18, p. 2083-2101, dez. 2007.

PEDATELLA, N. M. e FORBES, J. M. Modulation of the equatorial F-region by the quasi-16-day planetary wave. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 9, p. L09105, 8 maio. 2009.

HEDLUND P. R., Using a bistatic fabry-perot interferometer system to improve the estimation of thermospheric winds. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica e computacional, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.

LIMA, L. M. et al. Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 78-79, p. 99-107, abr. 2011.

MAKELA, J. J. et al. Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 13, p. 1-5, 7 jul. 2011.

MERIWETHER, J. W. et al. Climatology of the nighttime equatorial thermospheric winds and temperatures over Brazil near solar minimum. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. A4, p. 1-12, 30 abr. 2011.

CHAPAGAIN, N. P. et al. Comparison of nighttime zonal neutral winds and equatorial plasma bubble drift velocities over Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. A6, p. A06309, 7 jun. 2012.

ENGLAND, S. L. et al. On the signature of the quasi-3-day wave in the thermosphere during the January 2010 URSI World Day Campaign. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. A6, p. A06304, 5 jun. 2012.

LIU, G. et al. Signatures of the 3-day wave in the low-latitude and midlatitude ionosphere during the January 2010 URSI World Day campaign. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. A6, p. A06305, 6 jun. 2012.

PAULINO I S. Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera-ionosfera, Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 2012. 2012.

TAKAHASHI, H. et al. Ionospheric response to 2-day planetary wave in the equatorial and low latitude regions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 90-91, p. 164-171, dez. 2012.

TAKAHASHI, H. et al. Planetary wave induced wind and airglow oscillations in the middle latitude MLT region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, mar. 2013.

## APÊNDICE A - ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Segundo Tascione (1994) uma variedade de índices especifica a intensidade de um distúrbio geomagnético. São as diferenças entre a característica e a intensidade das variações magnéticas com a latitude que influenciam a escolha e a derivação dos índices geomagnéticos. Por exemplo, enquanto em latitudes médias, os índices para intervalos de 3 horas (Kp e Ap) em um dia são mais apropriados, na zona auroral, as escalas de tempo de uma hora ou menos é que são importantes e são encontradas nos índices do eletrojato auroral (AU, AL e AE). Já no Equador, consideram-se intervalos de uma hora e de 1 minuto, como se pode ver nas medidas dos índices Dst, Sym e Asy.

O índice K é um dos índices através dos quais se pode medir a atividade magnética na região sub-auroral, com um intervalo de medida das variações irregulares de 3 horas. Ele é usado como indicador do nível geral da atividade magnética causada pelo vento solar e é dado em uma escala quase-logarítmica, variando com os inteiros de 0 a 9. O índice Kp representa a intensidade da atividade magnética planetária observada nas regiões sub-aurorais e é dado em intervalos de 3 horas. O índice individual K, que é medido para cada um dos observatórios, contribui para as medidas em médias latitudes, aproximadamente entre 48° e 63°, e reflete a variação média de um componente do campo sobre intervalos de 3 horas, para cada estação. Através de uma escala de conversão é que o índice Kp quase-logarítmica é transformado para o índice linear Ap, que varia de 0 a 400 nT. Para mais detalhes de como o índice K é derivado, ver Menvielle e Berthelier (1991).

O índice que melhor identifica a ocorrência de uma tempestade é o índice Dst (do inglês, *Disturbance storm time index*). Este índice é derivado de quatro estações de magnetômetros de baixa latitude distribuídas em torno do mundo (Hermanus, Honolulu, Kakioka e San Juan). Os cinco dias mais calmos do mês são usados para calcular os valores médios anuais da componente H (componente horizontal) do campo magnético terrestre para formar a base para cada

estação e levar em conta as variações seculares. São as suas variações que identificam as fases em que uma tempestade é dividida. Medido em intervalos de 1 hora, conta com a contribuição de quatro grandes sistemas de corrente que estão presentes na magnetosfera: sistema de corrente na magnetopausa, a chamada corrente de Chapman-Ferraro, sistemas de corrente na cauda, as correntes de anel parciais e simétricas (MALTSEV, 2003).