



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Josefa Alves Gomes

**Caracterização das Ondas Planetárias nas Medidas
de Ventos por Radar de Meteoros na Estação na
Antártica Comandante Ferraz**

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Junho de 2023

Josefa Alves Gomes

Caracterização das Ondas Planetárias nas Medidas de Ventos por Radar de Meteoros na Estação Antártica Comandante Ferraz

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Dr. Lourivaldo Mota Lima

Campina Grande, Paraíba, Brasil

Junho de 2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM FISICA

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

JOSEFA ALVES GOMES

"Caracterização das ondas planetárias nas medidas de ventos por radar de meteoros na estação antártica Comandante Ferraz"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 30/06/2023

Lourivaldo Mota Lima
Presidente da Comissão e Orientador

Gabriela Coutinho Luna
Examinadora Interna

José Valentin Bageston
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **Lourivaldo Mota Lima, Usuário Externo**, em 12/07/2023, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GABRIELA COUTINHO LUNA, Usuário Externo**, em 19/07/2023, às 21:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ VALENTIN BAGESTON, Usuário Externo**, em 20/07/2023, às 11:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3536393** e o código CRC **4FDD521F**.

Referência: Processo nº 23096.047236/2023-98

SEI nº 3536393

A Deus e a toda minha Família.

Agradecimentos

- Agradeço principalmente ao meu orientador Dr. Lourivaldo MotaLima, Professor e Pesquisador do Departamento de Física/CCT da UEPB, pela sua paciência, atenção e orientação ao decorrer da pesquisa.
- A todos os professores desta Unidade Acadêmica que contribuíram com a minha formação.
- Gostaria de expressar minha imensa gratidão a todos os meus familiares e amigos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste mestrado. Em particular, gostaria de agradecer aos meus pais e avós, Geraldo Alves e Maria de Fátima, pelo incentivo e apoio nos estudos e na vida em geral. Também gostaria de agradecer aos meus pais biológicos, Edivan e Gerlânia, e aos meus filhos, Heitor e Iris Lorena, por encherem meus dias de amor e alegria. Um agradecimento especial ao meu esposo, Rheyo Richard Dias de Almeida, pelo apoio incondicional.
- A todos que, direta ou indiretamente, possibilitaram a conclusão deste trabalho.

“ É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota ”
(Theodore Roosevelt)

Resumo

As ondas planetárias são grandes estruturas horizontais, com períodos maiores que um dia, caracterizadas como ondas que sempre viajam de leste para oeste. Este trabalho apresenta um estudo das ondas planetárias identificadas em medidas de ventos compreendidas entre as altitudes de 82 km e 98 km na região da península Antártica, com o objetivo de caracterizar as ondas planetárias em altas latitudes usando dados de radar de meteoros. Utilizando uma abordagem observacional e comparativa e natureza aplicada, foram analisados os dados de ventos horários obtidos de fevereiro de 2011 a meados de fevereiro de 2012. O banco de dados utilizado para a pesquisa consiste em observações de vento do *Drake Antarctic Agile Meteor Radar (DrAAMER)*, instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz (62,1°S, 58,4°W), localizada na Ilha Rei George. Esses dados foram submetidos a técnicas de análise, como a Transformada de Wavelets, o Periodograma de Lomb-Scargle e a Análise Harmônica com o propósito de obter as amplitudes, o comprimento de onda vertical e a velocidade de fase das ondas. Foram observadas e caracterizadas as oscilações das ondas de 2, 4, 5 e 10 dias. Os resultados obtidos neste estudo confirmam, de acordo com a literatura, que as ondas de diferentes períodos desempenham papéis distintos em diferentes estações do ano. A onda de 2 dias é típica do verão austral, enquanto a onda de 4 dias desempenha um papel relevante durante o solstício de inverno. A onda de 5 dias ocorreu exclusivamente durante o verão austral, e a onda de 10 dias exibe características sazonais durante o inverno austral.

Palavras-chaves: Ondas planetárias, Radar de Meteoros, Estação Antártica Comandante Ferraz.

Abstract

Planetary waves are large horizontal structures, with periods longer than one day, characterized as waves that always travel from east to west. This work presents a study of planetary waves identified in wind measurements between altitudes of 82 km and 98 km in the Antarctic peninsula region, with the objective of characterizing planetary waves at high latitudes using meteor radar data. Using an observational and comparative approach and applied nature, hourly wind data obtained from February 2011 to mid-February 2012 were analyzed. The database used for the research consists of wind observations from the Drake Antarctic Agile Meteor Radar (DrAAMER), installed at the Comandante Ferraz Antarctic Station (62.1°S, 58.4°W), located on King George Island. These data were submitted to analysis techniques, such as the Wavelet Transform, the Lomb-Scargle Periodogram and the Harmonic Analysis in order to obtain the amplitudes, the vertical wavelength and the phase velocity of the waves. Wave oscillations of 2, 4, 5 and 10 days were observed and characterized. The results obtained in this study confirm, according to the literature, that waves from different periods play different roles in different seasons. The 2-day wave is typical of the austral summer, while the 4-day wave plays a relevant role during the winter solstice. The 5-day wave occurred exclusively during the austral summer, and the 10-day wave exhibits seasonal characteristics during the austral winter.

Keywords: Planetary waves, Meteor Radar, Commander Antarctic Station Ferraz.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 - Perfil de temperatura de latitude média. Com base na atmosfera padrão dos EUA. (1976).....	24
Figura 3.1 - Principais nomes Geográficos da Antártica.....	37
Figura 3.2 - A) Foto da Estação Comandante Ferraz e B) Mapa mostrando a região da Península da Antártica.....	38
Figura 3.3 - Antenas transmissoras do Radar DrAAMER.....	39
Figura 3.4 - Dados de ventos zonais (direita) e meridionais (esquerda) do dia 03 de fevereiro de 2011 à 24 de fevereiro de 2012.....	42
Figura 3.5 - Decomposição Senoidal do sinal em diferentes frequências; b) Decomposição Wavelet do sinal e diferentes escalas e deslocamentos.....	45
Figura 4.1 - Estrutura vertical do vento zonal médio sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para o período entre fevereiro de 2011 à janeiro de 2012.....	48
Figura 4.2 - Estrutura vertical do vento meridional médio sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para o período entre fevereiro de 2011 e janeiro de 2012.....	49
Figura 4.3 - Espectro Wavelet correspondente ao vento zonal e meridional medido na altitude de 91 km.....	50
Figura 4.4 - Periodograma de Lomb-Scargle da componente zonal de uma onda com período de 2 dias nos dias 10 de janeiro (dia 375, à esquerda) e 23 de janeiro (dia 388, à direita) de 2012.....	51
Figura 4.5 - Periodograma de Lomb-Scargle da componente meridional de uma onda com período de 2 dias nos dias 13 de janeiro (dia 378, à esquerda) e 19 de janeiro (dia 384, à direita) de 2012.....	52
Figura 4.6 - Evolução da estrutura vertical da Amplitude, para a componente zonal, da onda de 2 dias entre os dias 01 de janeiro à 4 de fevereiro de 2012 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.....	
Figura 4.7 - Evolução da estrutura vertical da Amplitude, para a componente meridional, da onda de 2 dias entre os dias 01 de janeiro à 4 de fevereiro de 2012 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.....	54

Figura 4.8 - Estrutura vertical da Fase de janeiro a fevereiro de 2012.....	55
Figura 4.9 - Periodograma de Lomb-Scargle da onda de 4 dias na componente zonal no dia, 170 (A) e dia 320(B).....	57
Figura 4.10 - Evolução da estrutura vertical da Amplitude da onda de 4 dias entre os dias 150 à 250, de junho -30 de maio a 7 de setembro de 2011- sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.....	59
Figura 4.11 - Evolução da estrutura vertical da Amplitude da onda de 4 dias entre os dias 300 à 350 - 27 de outubro a 16 de dezembro de 2011 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.....	59
Figura 4.12 - Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) de meados de junho a início de julho.....	61
Figura 4.13 - Estrutura vertical da Amplitude (A), Fase (B) da onda de 4 dias para o evento do mês de novembro.....	62
Figura 4.14 - Peridograma de Lomb-Scargle para a onda de 5 dias na componente zonal (A) e meridional (B)	65
Figura 4.15 - Evolução da estrutura vertical da amplitude da onda de 5 dias entre os dias 37 à 70, de junho - 6 de fevereiro a 11 de março de 2011- sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para as componentes zonal (superior) e meridional (inferior) do vento.....	66
Figura 4.16 - Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) da onda de 5 dias na componente zonal do vento,durante fevereiro de 2011.....	68
Figura 4.17 - Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) da onda de 5 dias na componente meridional do vento, durante fevereiro de 2011.....	68
Figura 4.18 - Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 10 dias na componente zonal – mês de outubro.....	71
Figura 4.19 - Evolução da estrutura vertical da amplitude da onda de 10 dias entre os dias 175 à 325, de 28 de maio à 22 de novembro - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para a componente zonal do vento.....	72
Figura 4.20 - Estrutura vertical do atraso Fase da onda de 10 dias na componente zonal do vento, em dois eventos – Julho e Outubro.....	73

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Elementos constituintes da Atmosfera do ar limpo e seco21

Tabela 4.1 - Velocidade de fase vertical e seus respectivos comprimentos de onda verticais para a ondas de 4 dias..... 61

Tabela 4.2 - Velocidade de fase vertical e seus respectivos comprimentos de onda verticais para a ondas de 4dias- mês de novembro63

Lista de abreviaturas e siglas

UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UAF	Unidade Acadêmica de Física
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
DrAAMER	Drake Antarctic Agile Meteor Radar
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
UWO	Universidade Western Ontario
MLT	Lower Thermosphere Mesosphere
MST	Mesosphere Stratosphere Troposphere
VHF	Very High Frequency
EACF	Estação Antártica Comandante Ferraz
PRF	Pulse Repetition Frequency

Lista de símbolos

g	Gravidade
p	Pressão
ρ	Densidade
t	Tempo
f	Parâmetro de Coriolis
u	Vento médio para leste
v	Vento médio para o norte
w	Vento médio na vertical
c	Velocidade da Luz
Ω	Taxa de rotação do planeta Terra
φ	Fase da onda
λ	Comprimento da vertical
R	Constante dos gases ideais
A	Amplitude da onda
C_v	Calor específico a volume constante
ζ	Vorticidade absoluta
ξ	Vorticidade Relativa
H	Altura Escalar
K	constante de Boltzman
T	Período da onda
D	Divergente Horizontal

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	20
2.1	Composição e Estrutura Vertical da Atmosfera.....	20
2.2	Ondas Atmosféricas.....	24
2.2.1	Geração das Ondas Planetárias – Ondas de Rossby.....	26
2.2.2	Ondas Planetárias em Regiões de Altas Latitudes.....	28
2.3	Equações Básicas.....	30
2.3.1	Equação da Conservação da massa.....	30
2.3.2	Equação do Movimento para Fluidos Compressíveis.....	31
2.3.3	Primeira Lei da Termodinâmica.....	32
2.3.4	A Lei dos Gases Ideais.....	34
3	METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO.....	35
3.1	Localização da Estação Comandante Ferraz - Antártica.....	35
3.2	Radar de Meteoros (o DrAAMER).....	37
3.3	Dados Utilizados.....	40
3.4	Técnica de Análise de Dados	42
3.4.1	Transformada de Wavelet – TW.....	42
3.4.2	Periodograma de Lomb-Scargle.....	44
3.4.3	Análise Harmônica.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	A onda de 2 dias.....	50
4.1.1	Periodograma de Lomb-Scargle.....	50
4.1.2	Amplitude, Fase e Comprimento de onda vertical.....	52
4.2	A onda de 4 dias.....	56
4.2.1	Periodograma de Lomb-Scargle.....	56
4.2.2	Amplitude, Fase e Comprimento de onda vertical.....	57
4.3	A onda de 5 dias.....	64
4.3.1	Periodograma de Lomb-Scargle.....	64
4.3.2	Amplitude, Fase e Comprimento de onda vertical.....	65
4.4	Onda de 10 dias.....	69
4.4.1	Periodograma de Lomb-Scargle.....	69
4.4.2	Amplitude, Fase e Comprimento de onda vertical.....	71
5	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 Introdução

O papel das ondas planetárias com grande amplitude na região da alta mesosfera e baixa termosfera tem sido objeto de estudos teóricos e observacionais recentes. Para coletar dados e analisar esses fenômenos, radares de meteoros e aproximações matemáticas são utilizados, permitindo uma compreensão mais completa da escala dos eventos de interesse.

Na atmosfera terrestre, há uma ampla variedade de movimentos ondulatórios que causam variações nos campos atmosféricos, devido a suas perturbações e desequilíbrios que são possíveis graças às forças restauradoras. Existem diferentes categorias de ondas atmosféricas, como ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias. De acordo com a sua natureza, elas podem ser divididas em ondas verticais transversas, que se propagam horizontalmente com deslocamentos verticais; horizontais transversas, que se propagam horizontalmente com deslocamento horizontal perpendicular à direção de propagação; e longitudinais, cujo deslocamento está na mesma direção da propagação. Ao combinar essas três ondas, formam-se os movimentos de ondas atmosféricas (Beer, 1975).

As ondas atmosféricas são movimentos ondulatórios que podem causar variações nos campos atmosféricos devido às suas perturbações. Elas podem se estender da baixa troposfera até a alta termosfera e são categorizadas como ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias, dependendo de sua natureza e período (Beer, 1975).

Entre as ondas atmosféricas, as ondas acústicas são governadas por forças de compressibilidade do ar, as ondas de gravidade são devidas à força da gravidade e as ondas planetárias devido às forças rotacionais. As principais ondas atmosféricas de interesse geofísico são categorizadas de acordo com seu período, como ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias (Lima, 2004).

As ondas de gravidade são perturbações ondulatórias transversas que se propagam horizontalmente e verticalmente na atmosfera, tendo períodos característicos desde minutos até dias e escala espacial desde alguns quilômetros até milhares de quilômetros. As marés atmosféricas, por sua vez, são oscilações em escala global, produzidas por uma combinação das ações gravitacionais do Sol e da Lua sobre a Terra e pela ação térmica do Sol. Elas podem ter períodos sub-harmônicos de um dia solar ou lunar e ainda podem ser migrantes ou não migrantes. As ondas planetárias/Rossby são ondas de escala planetária também sendo de grande estrutura horizontal, da ordem do diâmetro terrestre, com períodos maiores do que um dia.

Elas podem ser definidas como oscilações observadas nos campos atmosféricos, com períodos entre 2 e 20 dias (Lima, 2004; Beer, 1975).

As ondas atmosféricas apresentam diferentes movimentos ondulatórios, que podem ser classificados de acordo com sua natureza e período, afetando os campos atmosféricos de diversas formas. Portanto, estudar essas ondas é fundamental para compreender os processos atmosféricos e prever o tempo e o clima.

Além disso, a dinâmica da atmosfera é influenciada por vários fatores físicos, químicos e biológicos, sendo que a variação de altitude é um dos principais fatores que afetam as oscilações e perturbações atmosféricas. Nesse contexto, a região de interesse deste trabalho é a Antártica, especificamente a região onde se localiza o radar DrAAMER na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) a Noroeste da Península Antártica, que está localizada em uma das regiões mais sensíveis do planeta às mudanças globais, devido à sua posição geográfica e aos fatores como isolamento pelas massas d'água e altitude.

A Antártica é a região mais sensível do planeta às mudanças globais, devido à sua localização na Terra e à pouca radiação solar que recebe. O gelo cobre a maior parte da região e, no verão, apenas 2% do território não é coberto por ele. Além disso, outros fatores como o isolamento pelas massas d'água e a altitude também contribuem para a dinâmica da atmosfera na região (Machado et al., 2006).

As ondas planetárias são fenômenos atmosféricos que afetam significativamente a dinâmica da atmosfera em diferentes regiões e altitudes. De acordo com estudos realizados por Sassi et al. (1997), na região da Antártica, essas ondas têm um papel importante na diminuição do ozônio, enquanto em regiões próximas ao equador, acredita-se que sejam responsáveis pelas oscilações semianuais observadas na estratosfera e na mesosfera. As ondas planetárias também são responsáveis pelo aquecimento abrupto da estratosfera polar e influenciam a quebra do vórtice durante o final do aquecimento (Araújo, 2012).

Assim a presente pesquisa teve como objetivo geral caracterizar as ondas planetárias em altas latitudes através dos dados de radar de meteoros, visando responder à problemática: "Quais as características das ondas planetárias na região da Antártica?". Para atingir esse objetivo, foram realizados procedimentos de análise como identificação de perturbações em um intervalo de tempo, usando análise espectral, bem como a obtenção de parâmetros das ondas, através de ajustes para estimar valores de amplitude, fase e comprimento vertical da onda.

O capítulo dois apresenta os aspectos teóricos sobre a composição da atmosfera, processos de perturbações em latitudes altas e polares, e ondas planetárias na atmosfera terrestre. O capítulo três descreve o equipamento de coleta de dados e sua localização, além das técnicas utilizadas para obtenção dos resultados. No capítulo quatro, foram apresentados os resultados obtidos, permitindo concluir que as ondas planetárias na Região da Antártica possuem características peculiares que foram identificadas e analisadas (através dos dados coletados e técnicas da Transformada de Wavelet, Periodograma de Lomb-Scargle e Análise Harmônica) e comparadas com alguns estudos existentes. Essas informações podem ser úteis para futuras pesquisas e para compreensão dos processos atmosféricos em regiões polares.

2 Aspectos Teóricos

2.1 Composição e Estrutura Vertical da Atmosfera

A atmosfera é composta por diferentes camadas que se estendem verticalmente a partir da superfície da Terra. O limite inferior é definido como a superfície da crosta terrestre e oceânica, enquanto que o limite superior não é bem definido devido ao fato de que a atmosfera vai ficando mais rarefeita à medida que a altitude aumenta. Cerca de 99% da massa total da atmosfera está contida em uma camada que se estende por aproximadamente 32 km. Para se ter uma ideia da escala, vale lembrar que o raio da Terra é de cerca de 6.300 km (Dias et al., 2007). Compreender a composição e estrutura vertical da atmosfera é fundamental para entendermos os processos físicos e químicos que ocorrem nesse ambiente e como eles afetam o nosso planeta.

A composição da atmosfera varia de acordo com a altitude e, quando se trata de ar limpo e seco, ela é composta por diferentes espécies gasosas. Na Tabela 1, a seguir, é possível visualizar as principais espécies gasosas presentes na atmosfera.

Tabela 1 - Elementos constituintes da Atmosfera do ar limpo e seco. Fonte: Adaptado de Dias et al. (2007, p. 24)

Componentes	Concentração por unidade de volume (%)
Nitrogênio (N ₂)	78,09
Oxigênio (O ₂)	20,95
Argônio (Ar)	0,93
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,035
Neônio (N)	1,8 x 10 ⁻³
Hélio (He)	5,54 x 10 ⁻⁴
Metano (CH ₄)	1,7 x 10 ⁻⁴
Criptônio (Kr)	1,0 x 10 ⁻⁴
Hidrogênio (H ₂)	5,0 x 10 ⁻⁵
Xenônio (Xe)	8,0 x 10 ⁻⁶
Ozônio (O ₃)	1,0 x 10 ⁻⁶

A composição da atmosfera pode ser dividida em diferentes categorias, incluindo os gases permanentes, o vapor d'água e outros constituintes gasosos. O nitrogênio (N₂) é o gás mais abundante na atmosfera, com uma concentração de cerca de 78%, seguido pelo oxigênio

2.1 Composição e estrutura vertical da atmosfera

(O₂), que corresponde a aproximadamente 21% do volume do ar seco e limpo. Juntos, eles representam cerca de 99% da composição da atmosfera. No entanto, o restante de 1% dos gases atmosféricos desempenha um papel fundamental na dinâmica da atmosfera (Salby, 1995):

Embora apareçam muito em pequenas abundâncias, espécies vestigiais como vapor d'água e ozônio desempenham um papel fundamental no balanço energético da Terra por meio do envolvimento em processos radiativos. Visto que eles são criados e destruídos em determinadas regiões e estão ligados próximo da circulação através do transporte, estas e outras espécies menores são altamente variáveis. Por esta razão, tais espécies são tratadas separadamente dos constituintes atmosféricos primários, que são referidos simplesmente como "ar seco" (SALBY, 1995, p. 04, tradução nossa).

A citação de Salby (1995) destaca a importância das espécies vestigiais, como o vapor d'água e o ozônio, que apesar de estarem presentes em pequenas quantidades na atmosfera, têm um papel crucial no balanço energético da Terra através de processos radiativos. Essas espécies são criadas e destruídas em regiões específicas e estão intimamente relacionadas à circulação atmosférica, o que faz com que sua concentração varie bastante. Por esse motivo, elas são tratadas separadamente dos constituintes primários da atmosfera, que são referidos como "ar seco". Além disso, a presença de gases como vapor d'água, ozônio e dióxido de carbono é fundamental para a regulação da temperatura da Terra, uma vez que eles absorvem a radiação infravermelha emitida pelo solo.

Esses gases são capazes de reter o calor na atmosfera, o que pode levar ao aumento da temperatura média do planeta - fenômeno conhecido como aquecimento global. Para entendermos os processos atmosféricos, é essencial compreender a dinâmica das grandezas físicas que definem o estado da atmosfera, tais como pressão, densidade e temperatura. Essas grandezas são dependentes das coordenadas espaciais e do tempo (Holton, 2004). Compreender como elas se relacionam é fundamental para entendermos a atmosfera em sua totalidade.

A atmosfera terrestre pode ser dividida em diferentes camadas, de acordo com a sua estrutura e temperatura, que são elas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termosfera e Exosfera. Cada camada é separada por uma região de transição, e a Figura 2.1 apresenta a distribuição vertical anual média da temperatura e pressão atmosférica, com a identificação de cada camada.

2.1 Composição e Estrutura Vertical da Atmosfera

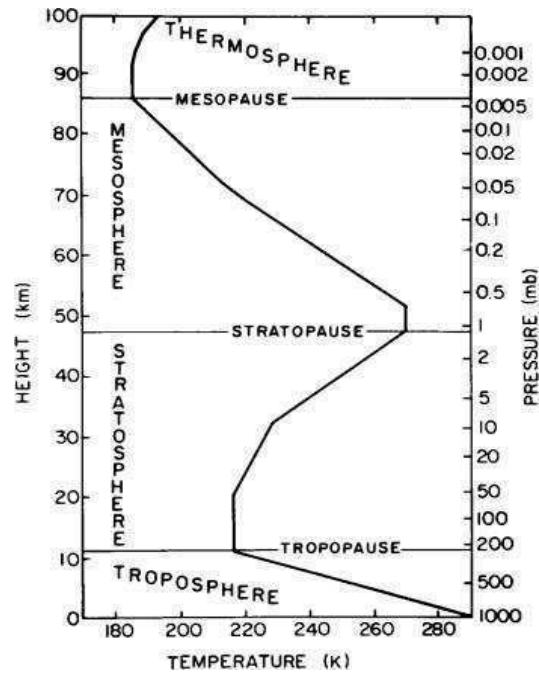


Figura 2.1 - Perfil de Temperatura de Latitude Média. Com Base na Atmosfera Padrão dos EUA.
Fonte: Adaptado de Andrews et al. (1987, p. 02).

A estrutura vertical da atmosfera é classificada com base nas propriedades físicas que variam com a altitude, principalmente o gradiente de temperatura. A medida que a altitude aumenta, a temperatura pode aumentar ou diminuir, dependendo do nível de absorção de radiação no infravermelho pelos gases atmosféricos, como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e vapor d'água (H₂O).

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera, estendendo-se desde a superfície até uma altitude média de 11 km, embora essa altitude possa variar de 8 km nas regiões polares a 16 km nos trópicos. Essa região é mais fina, uma vez que mais de 90% da massa atmosférica está concentrada nela.

A temperatura na troposfera diminui à medida que a altitude aumenta, com um gradiente térmico médio de 279,65 K (6,5°C) por quilômetro. Em outras palavras, a temperatura diminui em 279,65 K a cada quilômetro de altitude, até atingir a tropopausa, que é considerada a camada limite da troposfera, localizada a aproximadamente 17 km de altitude no equador. A temperatura na tropopausa é de aproximadamente 218,5 K (-54,65°C).

2.1 Composição e Estrutura Vertical da Atmosfera

A tropopausa marca a transição para a camada seguinte da atmosfera, a estratosfera. Nessa região, o ar ascendente atinge seu limite e se espalha para os lados, já que o ar se torna mais leve e quente. É também na tropopausa que começa a formação de nuvens e outras condições meteorológicas, pois o ar quente é mais denso que o ar frio.

A estratosfera é a segunda camada da atmosfera, situada acima da tropopausa. Nessa camada, as partículas de ar se movem predominantemente na horizontal, em vez de verticalmente como ocorre na troposfera. Ela se estende de cerca de 7 a 17 km de altitude até cerca de 50 km. A temperatura nessa camada aumenta à medida que a altitude aumenta, chegando a mais de 260 K (-13,15°C) em cerca de 50 km.

Ao contrário da troposfera, a estratosfera é considerada uma camada estável, com poucos movimentos convectivos ou outros fenômenos atmosféricos que ocorrem na camada inferior. Por essa razão, ela é uma região adequada para o tráfego aéreo. Além disso, a estratosfera é uma região relativamente limpa em termos de poluição e outros contaminantes, uma vez que os gases e vapores presentes na superfície terrestre não conseguem alcançar essas altitudes, sendo o ozônio (O_3) uma componente importante que ajuda a proteger a terra dos efeitos nocivos da radiação ultravioleta.

O Ozônio (O_3) é o principal responsável pela correlação entre temperatura e altitude na atmosfera. Isso ocorre porque ele absorve os raios ultravioletas e, por meio de reações fotoquímicas, impede que essas radiações atinjam a troposfera, aumentando a temperatura nessa camada. Vale destacar que as moléculas de ozônio estão em constante formação e decomposição na estratosfera, graças à ação da radiação ultravioleta. Quando essa radiação atinge as moléculas de gás oxigênio (O_2), ela a quebra em dois átomos de oxigênio (O), que posteriormente se combinam com outras moléculas de oxigênio para formar o ozônio (O_3).

Após a estratosfera, encontramos a estratopausa, uma camada em que a temperatura se mantém constante. Acima da estratopausa está a mesosfera, a terceira camada da atmosfera, que se estende até cerca de 90 km de altitude. Nessa camada, a temperatura diminui com a altitude devido à diminuição da pressão e da presença de radiação que atua como um importante mecanismo de resfriamento. Assim, a temperatura pode alcançar valores tão baixos quanto 180 K (-93,15°C) ou menos em torno de 90 km de altitude. A mesosfera é também a camada em que ocorrem os fenômenos luminosos noturnos, como as auroras boreais e austrais, devido à interação entre as partículas solares e os gases atmosféricos.

A diminuição da temperatura com o aumento da altitude na mesosfera ocorre devido a diferentes fatores, como a baixa concentração de moléculas e a redução do calor advindo da camada de ozônio presente na estratosfera (Andrews et al., 1987). Além disso, é necessário considerar os estudos sobre os processos dinâmicos decorrentes dos movimentos ondulatórios e do momentum para explicar essa queda de temperatura. A mesosfera é uma região em que a interação entre a atmosfera e a radiação solar assume um papel importante, e esses processos dinâmicos são fundamentais para entender como ocorrem os fluxos de calor e a distribuição da temperatura nessa camada.

Após a mesosfera, encontra-se a mesopausa, seguida da Termosfera, que se estende acima de 90 km sem limite superior definido. Nessa região, a temperatura aumenta rapidamente com a altitude, alcançando cerca de 1.473 K (1.199,85°C). Esse aumento é resultado da absorção de radiação de ondas curtas (com comprimento de onda em torno de 200nm, ou seja, aproximadamente 2×10^{-7} m) pelas espécies atômicas e iônicas presentes na camada. A quantidade de radiação absorvida é o principal fator que determina a temperatura nessa região, conforme destacado em estudos como o de Dias et al. (2007).

A exosfera, a camada mais externa da atmosfera, se caracteriza pela extrema rarefação do ar, tornando as colisões entre as moléculas pouco frequentes. Acima da termosfera, essa região se estende por volta de 550 km, permitindo que satélites artificiais orbitem a Terra nessa área. Além disso, não há registro de absorção de radiação nessa camada da atmosfera, conforme destacado em estudos como o de Dias et al. (2007).

Essa complexa interação entre processos físicos e químicos que ocorrem simultaneamente na atmosfera, juntamente com a interação com a superfície terrestre, faz com que a atmosfera seja um sistema de extrema complexidade.

2.2 Ondas Atmosféricas

As ondas em fluidos são fenômenos físicos que ocorrem quando há uma perturbação em um meio que se propaga através dele. Elas são geradas por oscilações harmônicas das partículas do fluido, que se propagam através de diferenças de fase entre as partículas adjacentes. Dependendo da direção das oscilações em relação à direção de propagação, as ondas podem ser classificadas em transversais ou longitudinais. Na superfície dos fluidos, as ondas transversais

e longitudinais ocorrem de forma combinada, formando padrões complexos que podem ser observados em oceanos, lagos e rios.

Estudos realizados por Volland (1988) mostram que a atmosfera terrestre é capaz de comportar um amplo espectro de movimentos ondulatórios, cujos períodos se estendem da ordem de segundos até a escala de anos. A compreensão desses movimentos ondulatórios é importante não apenas para a meteorologia, mas também para outras áreas, como a aviação, a navegação e a previsão do tempo. Além disso, há uma vasta literatura científica sobre o tema, que abrange desde estudos teóricos sobre a física das ondas até análises mais aplicadas sobre como podem ser detectadas e monitoradas em diferentes escalas espaciais e temporais.

Segundo Volland (1988), as ondas atmosféricas são resultado de perturbações que provocam oscilações e um desequilíbrio nos campos atmosféricos a partir de estados básicos, sendo possível graças às forças restauradoras presentes na atmosfera. Essas ondas se propagam no espaço e no tempo, tanto na direção horizontal quanto vertical e são capazes de alcançar regiões da alta atmosfera. Vale ressaltar que as ondas são geradas na baixa atmosfera e apresentam oscilações locais.

As ondas atmosféricas são geradas a partir de perturbações que desequilibram o ar, seja por meio de movimentos mecânicos, como quando o ar é deslocado sobre terrenos elevados, ou por convecção, quando o ar é aquecido. Quando essas ondas transferem seu momento, ocorre uma comunicação entre diferentes regiões, permitindo que a convecção tropical, por exemplo, influencie na circulação extratropical. Essa relação entre diferentes regiões é descrita por Salby (1995) e evidencia a complexidade das interações entre as ondas atmosféricas e a circulação atmosférica em escala global.

Com base nas características das oscilações, como seus períodos e dimensões espaciais, Holton (1992) e Beer (1975) classificam as ondas atmosféricas em três categorias de acordo com os interesses geofísicos: ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias. Além disso, em relação à natureza da propagação e do deslocamento, elas podem ser divididas em três classes: ondas verticais transversais, que se propagam na horizontal com deslocamento na vertical; ondas horizontais transversais, que se propagam na horizontal e apresentam deslocamento horizontal perpendicular à propagação; e ondas longitudinais, que têm a mesma direção de propagação e deslocamento.

A dinâmica das ondas planetárias nas regiões polares é um tópico de grande interesse na meteorologia e na climatologia. Estudos de Andrews et al. (1987), Holton (1992) e

2.2 Ondas Atmosféricas

Lubken(1999), remete as ondas planetárias como sendo perturbações na atmosfera que afetam a circulação de grande escala, e que possuem um papel fundamental na dinâmica atmosférica e climatologia das regiões polares. Essas ondas são geradas por vários fatores, como a variação da temperatura e da pressão atmosférica, e propagam-se na atmosfera superior, acima da troposfera.

2.2.1 Geração das Ondas Planetárias – Ondas de Rossby

As ondas planetárias, existem apenas em meio rotativo, em frequências baixas. Em geral, ondas planetárias são referidas como ondas de Rossby, em homenagem a C. G. Rossby, que estabeleceu uma conexão com os fenômenos climáticos. A onda de Rossby é um padrão de movimento atmosférico que ocorre devido à variação do efeito β , que é a mudança do parâmetro de Coriolis com a latitude.

Essas ondas ocorrem em uma escala sinótica horizontal e são caracterizadas pela alternância entre áreas de vorticidade ciclônica (rotação no sentido horário) e anticiclônica (rotação no sentido anti-horário) à medida que se propagam (Shimizu, 2012). A força restauradora das ondas de Rossby é fornecida pela variação da força de Coriolis com a latitude, que os liga diretamente com à rotação da Terra (Salby, 1995), que atua para restabelecer o equilíbrio quando a vorticidade é perturbada.

As ondas planetárias são de grande estrutura horizontal, com períodos maiores que um dia, caracterizada como uma onda que sempre viaja de leste para oeste. Um dos fatores que promovem o desenvolvimento das ondas de Rossby é o aquecimento adiabático tropical, que ocorre devido à compressão adiabática do ar à medida que é forçado a subir na atmosfera tropical, sendo a compressão adiabática um processo em que um gás é comprimido sem troca de calor com o ambiente externo, o que leva ao aumento da pressão e temperatura do ar conforme é forçado a subir na atmosfera tropical. Esse aquecimento é equilibrado pelo movimento vertical ascendente e divergência em altos níveis da atmosfera, resultando em uma perturbação no campo de vorticidade absoluta (Shimizu, 2012).

2.2.1 Geração das Ondas Planetárias- ondas de Rossby

A vorticidade é uma medida da tendência do cisalhamento do vento em um determinado ponto da atmosfera em induzir rotação. Existem diferentes tipos de vorticidade que são considerados: vorticidade planetária, vorticidade relativa, vorticidade absoluta e vorticidade barotrópica. Cada uma delas aborda diferentes aspectos da rotação atmosférica e tem suas próprias características e aplicações.

- A vorticidade planetária (f) está associada a rotação da terra – Parâmetro de Coriolis

$$f = 2 \Omega \sin \phi \quad (2.1)$$

Com Ω sendo a Taxa de rotação angular da Terra; ϕ é o ângulo em relação a latitude.

- A vorticidade relativa (ξ) é associada ao cisalhamento do campo do vento tridimensional como observado na equação 2.2.

$$\nabla \times V = i \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) + j \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + k \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

A vorticidade relativa é a tendência do fluido em induzir rotações e é calculada pelo rotacional do campo de velocidade do vento, sendo u o vento médio na direção leste-oeste; v o vento médio da direção norte-sul e w o vento médio na direção vertical. Como em escala sinótica, interessa apenas a componente vertical da vorticidade k , então a vorticidade relativa para a escala sinótica horizontal pode ser expressada como:

$$\xi = k \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

-A vorticidade Absoluta é definida como o rotacional do vetor de velocidade total do fluido. Essa medida leva em conta a soma entre a vorticidade relativa (ξ) (rotação induzida pelo cisalhamento do vento) e a vorticidade planetária (f) (rotação induzida pelo movimento vertical ascendente ou descendente).

$$\zeta = f + \xi \quad (2.4)$$

- A vorticidade Barotrópica segundo (Shimizu, 2012) pode ser escrita como a derivada parcial da vorticidade absoluta em relação ao tempo adicionada ao produto escalar entre o vetor velocidade do fluido e o gradiente da vorticidade absoluta sendo igual a menos o produto entre a vorticidade absoluta e o divergente. A equação 2.5 mostra como as perturbações na vorticidade são transportadas e como são afetadas pelas circulações atmosféricas.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + V \cdot \nabla \zeta = - \zeta D \quad (2.5)$$

Sendo V o vento e D é a divergência horizontal; $D = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$. Pode-se inferir que o lado esquerdo da equação descreve a propagação das ondas de Rossby, enquanto o termo do lado direito representa a forçante dessas ondas.

2.2.2 Ondas Planetárias em Regiões de Altas Latitudes

Em regiões de latitudes altas, as ondas planetárias são particularmente importantes, pois afetam a circulação atmosférica e podem causar variações significativas nas temperaturas locais. No Ártico e Antártica, essas ondas podem gerar padrões climáticos distintos, como a formação de vórtices polares e a ocorrência de eventos de aquecimento estratosférico repentino, afetando a distribuição de gases na atmosfera superior.

As regiões polares foram objeto de estudo em pesquisas destacadas por Alexander et al. (2010), Hartmann (1976), Chshyolkova et al. (2005), Manney et al. (2005), Pancheva et al. (2008); Lubken (1999) e Chshyolkova et al. (2006). Nessas pesquisas, as ondas planetárias foram abordadas como perturbações que se propagam na atmosfera e exercem influência na circulação de grande escala.

De acordo com Lubken (1999), as ondas planetárias são particularmente importantes nas regiões polares durante o verão, quando ocorre a chamada "noite polar". Nessa época, as condições atmosféricas favorecem a propagação das ondas, que podem gerar uma série de efeitos, como a turbulência e a formação de camadas instáveis na mesosfera.

As ondas planetárias foram caracterizadas por apresentarem um período relativamente longo, variando de alguns dias a algumas semanas, e possuírem uma dimensão espacial

2.2.2. Ondas Planetárias em Regiões de Altas Latitudes

considerável, podendo se estender por milhares de quilômetros. Essas ondas se propagam na atmosfera superior, acima da troposfera, e sua geração é influenciada por diversos fatores, abrangendo variações de temperatura e pressão atmosférica.

As ondas planetárias são perturbações atmosféricas que se propagam verticalmente a partir de fontes localizadas na troposfera, a camada atmosférica mais baixa. Essas ondas podem ser geradas por diferentes processos troposféricos, como variações na topografia, diferenças de temperatura entre regiões adjacentes ou forçantes externas, como frentes meteorológicas e correntes de jato.

A conexão entre as ondas planetárias troposféricas e estratosféricas está relacionada à propagação vertical dessas ondas na atmosfera. Estudos realizados, como o de Alexander et al. (2010), demonstraram que as perturbações das ondas planetárias troposféricas podem se propagar para a camada estratosférica, localizada acima da troposfera.

Alexander et al. (2010), usaram dados de temperatura do satélite COSMIC GPS-RO para investigar a atividade das ondas planetárias na estratosfera do Ártico e da Antártica de setembro de 2006 a março de 2009. No estudo foram analisadas tanto ondas estacionárias quanto as ondas viajantes, examinando suas amplitudes, períodos e distribuição vertical em pequena escala e os resultados revelaram melhorias significativas nas amplitudes das ondas planetárias durante os invernos em ambos os hemisférios.

Alexander et al. (2010), destaca que as ondas planetárias de grande amplitude desempenham um papel significativo na dinâmica da atmosfera média durante o inverno. A interação dessas ondas com o fluxo médio zonal é um fator importante no funcionamento da estratosfera nessa estação. É observado que as amplitudes das ondas planetárias são maiores no Hemisfério Norte em comparação com o Hemisfério Sul, devido a forças de aquecimento térmico mais intensas.

Portanto, as ondas planetárias desempenham um papel crucial na dinâmica atmosférica das regiões polares. Sua interação com o fluxo médio zonal influencia diretamente a circulação de grande escala e as variações de temperatura. As características das ondas planetárias, como suas amplitudes, períodos e propagação vertical, foram investigadas em estudos recentes, como o de Alexander et al. (2010).

2.3 Equações básicas

O estudo dos movimentos atmosféricos é realizado a partir das equações hidrodinâmicas e termodinâmicas, ditas equações primitivas. Sendo que, a mistura de gases na baixa e média atmosfera (geralmente considerada até aproximadamente 50 km de altitude) pode ser tratada como um gás ideal único de peso molecular constante (considerando a atmosfera terrestre composta predominantemente por nitrogênio, oxigênio e outros gases em proporções constantes). As leis básicas da hidrodinâmica e termodinâmica deste gás atmosférico podem ser representadas por: Equações da Conservação da massa; Equação do movimento para fluidos compressíveis; Primeira Lei da Termodinâmica e Lei dos Gases Ideais.

2.3.1 Equação da conservação da massa

Considerando um elemento de volume com dimensões em x , y e z , fixos no espaço e um fluido passando por ele com velocidade \vec{v} e densidade ρ variando com a posição \vec{r} com o tempo t . A entrada de massa líquida na direção x , por unidade de tempo, é a diferença entre aquela massa líquida que entra e sai das outras duas direções.

Na direção x , y e z , a taxa de variação do fluxo de massa em relação às coordenadas é expressa por:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho \vec{v}) \Delta V = \frac{\partial}{\partial t} \rho \Delta V \quad (2.6a)$$

$$-\frac{\partial}{\partial y} (\rho \vec{v}) \Delta V = \frac{\partial}{\partial t} \rho \Delta V \quad (2.6b)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} (\rho \vec{v}) \Delta V = \frac{\partial}{\partial t} \rho \Delta V \quad (2.6c)$$

Sendo $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$. Considerando então o gradiente nas direções x , y e z , sendo igual a taxa de aumento da massa e produto da densidade pelo volume

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{v}) \Delta V = \frac{\partial}{\partial t} \rho \Delta V \quad (2.7)$$

2.3.1. Equação da conservação da massa

O elemento de volume é fixo então ΔV é constante. Assim, a conservação da massa estabelece que a taxa da densidade de um fluido adicionada com o divergente do fluxo de massa é igual a diferença da produção pela perda de calor a volume constante.

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = P - L \quad (2.8)$$

Sendo que P representa a produção e L a perda de calor a volume constante. Considerando que a quantidade de produção de calor, a volume constante, seja igual a quantidade de perda ($P=L$) a equação 2.8 é reescrita como:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.9)$$

Sendo a equação 2.9 uma forma alternativa da equação da continuidade. Para escoamentos com compressibilidade pequena, tem-se que a variação temporal de ρ pode ser expressa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.10)$$

Sendo c a velocidade do som.

2.3.2 Equação do movimento para fluidos compressíveis

A equação de Navier - Stokes é baseada na segunda Lei de Newton e descreve o movimento de um fluido viscoso. A expressão da segunda lei de Newton considerando um volume de controle de massa constante que se move com o fluido é:

$$\sum \vec{F} = \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (2.11)$$

Tem-se $\sum \vec{F}$ representando a soma das forças vetoriais que atuam no fluido em movimento. A massa contida no volume de controle produzindo a aceleração substantiva $\frac{D\vec{v}}{Dt}$ na direção da força resultante. Nos fluidos em escoamento viscoso a pressão não é a mesma em

2.3.2. Equação do movimento para fluidos compressíveis

todas as direções, em um volume de controle (no limite ponto) a força externa de superfície pode ser desdobrada em uma componente normal e outra tangencial à superfície (Coimbra, 2015).

A equação de Navier-Stokes, também conhecida como equação do movimento para fluidos compressíveis, descreve o comportamento de um fluido em movimento. Ela estabelece um equilíbrio entre as diversas forças que atuam sobre uma pequena parcela desse fluido, levando em conta um sistema de coordenadas que acompanha a rotação da Terra.

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{F} \quad (2.12)$$

Equação advinda da segunda lei de Newton aplicada em um fluido com volume em $\delta V = \delta x \delta y \delta z$ e densidade ρ que é razão da massa pelo volume então pode ser escrita como $\delta \vec{F} = (\rho \delta V) \vec{a}$; Sendo $\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt}$; ($\delta \vec{F}$ é a representação da soma de todas as forças atuando no fluido, essas forças são as: $-2\vec{\Omega} \times \vec{v}$ (Força de Coriolis, por unidade de massa); $-\frac{1}{\rho} \nabla p$ (Força devida ao gradiente de pressão, por unidade de massa); \vec{F} (forças não conservativas) e \vec{g} (força devida à gravidade, por unidade de massa). Lembrando que: $\vec{\Omega}$ é a taxa de rotação angular da Terra e p é a pressão.

Temos ainda a derivada substantiva ou derivada material.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \quad (2.13)$$

A mesma representa a taxa de, a mesma em relação ao tempo, após o movimento e deve ser em contraste com $\frac{\partial}{\partial t}$ Adicionado ao divergente da velocidade.

2.3.3 Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica é um princípio fundamental que descreve a conservação de energia em um sistema fechado, como uma massa de ar contida em um cilindro com um pistão móvel em uma das extremidades, podendo ser escrita como:

$$dU = dQ - dW \quad (2.14)$$

É possível perceber desta forma que dU é a taxa de variação infinitesimal da energia interna do sistema, dQ a energia térmica e dW o trabalho realizado ou cedido sobre/pelo o sistema termodinâmico. Como está explícito nas equações a seguir:

$$dU = C_v dT \quad (2.15a)$$

$$dQ = T dS \quad (2.15b)$$

$$dW = p dV \quad (2.15c)$$

Substituindo as equações 2.15a, 2.15b e 2.15c em 2.14 tem-se então:

$$C_v dT = -p dV + T dS \quad (2.16)$$

Desta forma, tirando o diferencial em função do tempo, a equação 2.16 fica da seguinte forma:

$$C_v \frac{dT}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + T \frac{dS}{dt} \quad (2.17)$$

Segundo Andrews (2010) e Salby (1995), para a massa unitária do gás ideal, o volume pode ser escrito como, $V = 1/\rho$ e $dS = \frac{dq}{T}$, então:

$$C_v \frac{dT}{dt} = -p \frac{d\left(\frac{1}{\rho}\right)}{dt} + T \frac{dq/T}{dt} \quad (2.18)$$

Deixando tudo em função de $\frac{dT}{dt}$, obtém-se

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{p}{C_v} \frac{d\left(\frac{1}{\rho}\right)}{dt} - \frac{dq}{C_v dt} \quad (2.19)$$

Esta é uma forma da Primeira Lei da Termodinâmica, usada na física atmosférica. Esta equação torna-se mais simples quando expressa em sistema de coordenadas log-pressão, em que, $Z = -H \ln \frac{P}{P_s}$, P_s é uma pressão de referência padrão, sendo $H = \frac{KT}{Mg}$ sendo H é a altura de eslara e K a constante de Boltzman.

2.3.4 A Lei dos Gases Ideias

Diversas variáveis diferentes são usadas para descrever a concentração de traços gasosos na atmosfera. Para uma boa aproximação, a atmosfera se comporta como um gás ideal (ou perfeito), com cada mol de gás obedecendo a lei dos gases ideais:

$$PV = nRT \quad (2.20)$$

Sendo P é a pressão, V é o volume, n é o número de mols, R a constante universal do gases e T é a temperatura absoluta. O número de mol e a densidade são respectivamente,

$$n = \frac{m}{M} \quad (2.21)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.22)$$

Substituindo as equações 2.22 e 2.23 e em seguida na 2.20 tem-se:

$$PV = \frac{\rho \cdot V}{M} RT \quad (2.23)$$

Para a massa unitária do gás ideal a lei dos gases ideias é representada por

$$P = \rho RT \quad (2.24)$$

A mistura de gases na baixa e média atmosfera pode ser tratada como um único gás ideal de peso molecular constante. Essas quatro equações descrevem o comportamento da atmosfera em movimento

3 Metodologia e Instrumentação

A metodologia é um conjunto de procedimentos e técnicas que devem ser seguidos para a construção do conhecimento, com o objetivo de investigar uma questão científica, comprovar sua validade e demonstrar sua utilidade nos diferentes contextos da sociedade. Podemos entender o método como um caminho ou processo a ser percorrido para atingir um determinado objetivo, e a ciência busca essencialmente a aquisição de conhecimento (PRODANOV & FREITAS, 2013).

Com base em Prodanov & Freitas (2013), os métodos científicos são divididos em duas categorias: abordagem e procedimentos. A abordagem abrange as bases lógicas e investigativas adotadas na pesquisa, enquanto os procedimentos referem-se aos meios técnicos utilizados na investigação. Em relação aos procedimentos, destacam-se dois métodos: o observacional e o comparativo. A observação consiste em observar atentamente um fenômeno, seja em tempo real ou no passado, sem interferir ou manipular o objeto de estudo. Já o método comparativo envolve o estudo das semelhanças e diferenças entre diferentes elementos ou contextos, com base em estudos teóricos já existentes.

A pesquisa em questão possui uma abordagem aplicada, cujo objetivo é gerar conhecimento para a aplicação prática e solução de problemas específicos. Ela se concentra em verdades e interesses locais (PRODANOV & FREITAS, 2013). Nesse contexto, a pesquisa analisa os dados de ventos horários coletados entre fevereiro de 2011 e meados de fevereiro de 2012 pelo radar de meteoros da Estação Comandante Ferraz.

3.1 Localização da Estação Antártica Comandante Ferraz

O banco de dados utilizado nesta pesquisa é composto por observações de vento obtidas a partir do *Drake Antarctic Agile Meteor Radar (DrAAMER)* via colaboração entre Brasil, Estados Unidos e da Universidade Western Ontario (UWO), no Canadá. O radar foi instalado na estação entre fevereiro e março de 2010. A Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), localizada na Ilha Rei George, a noroeste da Península Antártica (62,1°S, 58,4°W).

A Figura 3.1 apresenta os principais nomes geográficos da Antártica. Essa representação cartográfica destaca os topônimos mais relevantes na região, proporcionando uma visão geral da distribuição e localização dos lugares na Antártica.

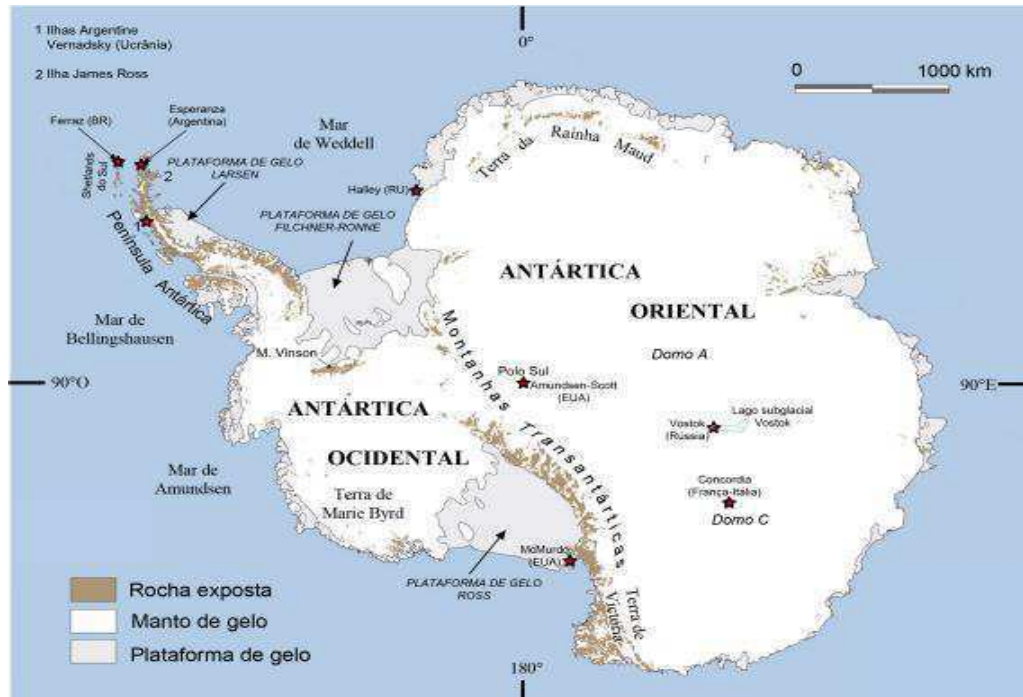


Figura 3.1 - Principais nomes geográficos da Antártica. Fonte: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA) - U.S. Geological Survey (<http://lima.usgs.gov/>).

A Península Antártica é uma cordilheira que se estende por mais de 2.500 km no sentido norte-sul, com uma altitude média de 1.500 m. Essa região é caracterizada pela ocorrência de efeitos meteorológicos significativos. A presença das chamadas "correntes de jato", localizadas a uma altitude de aproximadamente 8 km, juntamente com ventos fortes nessas latitudes, resulta em um padrão sinuoso que circunda o planeta e frequentemente afeta diretamente as condições climáticas na superfície da Península Antártica (Machado et al., 2006).

Ao norte da Península Antártica, a temperatura média é próxima de 0°C. Nessa região está localizada a Ilha Rei George, que possui uma área de 1.140 km². Seu eixo principal se estende por 79 km no sentido (SW-NE), enquanto a largura máxima é de aproximadamente 30 km, com orientação (SSE-N). A Ilha Rei George está situada a cerca de 1.000 km a sudeste da extremidade meridional da América do Sul e 130 km a nordeste da Península Antártica (Machado et al., 2006).

Na Ilha Rei George está situada a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), a estação brasileira de pesquisas na Antártica. A Figura 3.2 mostra a localização da Estação.

3.1 Localização da Estação Comandante Ferraz



Figura 3.2 – A esquerda mostra o mapa da região da Península da antártica, a direita a Estação Antártica Comandante Ferraz. Fonte: Foto do Google Earth (esquerda) e cedida gentilmente por José Valentin Bageston 2023 (direita).

A Figura 3.2 apresenta duas imagens relacionadas à Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). A imagem da direita retrata a própria estação, sendo uma imagem real da estrutura e instalações da EACF de 2023. Essa estação é a base de pesquisa do Brasil na Antártica e desempenha um papel fundamental na condução de estudos científicos e observações na região. Já a imagem a esquerda mostra um mapa específico da Península Antártica, destacando a localização da EACF e fornecendo uma visão geográfica mais ampla da área circundante.

3.2 Radar de Meteoros DrAAMER

O Brasil aderiu ao Tratado da Antártica em 1975, tornando-se membro consultivo em 1983. Sua primeira expedição à Antártica ocorreu no verão de 1982-1983. A Estação Antártica Comandante Ferraz foi inaugurada em fevereiro de 1984 e passou a ser permanentemente ocupada a partir de fevereiro de 1986. Em 2012, um incêndio devastador ocorreu na estação, resultando na destruição de 70% de suas instalações e na perda trágica de dois militares. Como resultado, novas adaptações foram realizadas e uma nova instalação para a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) foi inaugurada em 14 de janeiro de 2020 (Mattos, 2020).

O Radar de Meteoro, localizado na EACF é o DrAAMER- O mesmo está situado 62,1°S e 58,4°W. Foi instalado entre fevereiro e março de 2010 na Base Antártica Brasileira Comandante Ferraz. O DrAAMER utiliza a técnica de radar (*RADio Detection And Ranging*) e é uma ferramenta extremamente poderosa no estudo dos meteoros.

Através dessa técnica, o DrAAMER é capaz de identificar meteoros produzidos por partículas com massas incrivelmente pequenas, da ordem de grandeza de 10^{-6} gramas. Essa capacidade de detecção é significativamente superior àquela alcançada por outras técnicas, que geralmente identificam meteoros produzidos por partículas mais massivas.

O sistema DrAAMER foi projetado com o objetivo específico de possibilitar uma definição de alta resolução do campo de vento em larga escala e ter potencial sensibilidade aos fluxos de momento das ondas de gravidade. Isso foi alcançado por meio de uma técnica aprimorada baseada na generalização do uso de feixe duplo (Fritts, 2012). Na Figura 3.3, pode-se observar as antenas transmissoras utilizadas deste sistema.



Figura 3.3 - Antenas transmissoras do Radar DrAAMER. Fonte: Cedida gentilmente por José Valentin Bageston.

O DrAAMER utiliza uma configuração inovadora de antenas transmissoras, o radar utiliza uma antena transmissora composta por oito Yagis cruzados de três elementos, dispostos em um círculo de diâmetro de 24,4 metros. Essa configuração direciona a maior parte da potência emitida em oito feixes distribuídos a cada 45° azimutal, com pico de potência ocorrendo em torno de 35° abaixo do zênite. Essa abordagem possibilita uma detecção e estudo aprimorados dos meteoros. Ao concentrar a potência em direções específicas, aumenta-se a probabilidade de captar os ecos meteóricos nessas regiões do céu.

Além disso, ao direcionar a potência em ângulos fora do zênite (entre 15° e 50°), o DrAAMER é capaz de detectar uma ampla variedade de trajetórias de meteoros (Fritts et al., 2012), permitindo um estudo mais abrangente das suas características, como velocidade, altitude e direção. Essa configuração, combinada com alta sensibilidade e múltiplos feixes, também possibilita a detecção de meteoros de menor tamanho.

O DrAAMER é um radar VHF (*Very High Frequency*) all-sky, que é um instrumento projetado para monitorar o céu em busca de sinais de meteoros. Os parâmetros do radar e sua capacidade de medição segundo (Fritts et al., 2012) inclui:

- Frequência do radar de 36,9 MHz e larguras de banda que variam de 35 a 125 kHz;
- Potência de pico do transmissor de 30 kW;
- Oito antenas transmissoras, tipo Yagi, de três elementos em um círculo de 24,4 m de diâmetro, com fases opostas uma à outra;
- Cinco antenas receptoras Yagi em cruz assimétrica;
- Comutador de transmissão e recepção (T/R)
- Opção de faseamento do transmissor;
- Opções de codificação de pulso, frequência de repetição de pulso (PRF) e integração;
- Flexibilidade suficiente de definição de potência e feixe;

O sistema emprega um código de 2 bits e um PRF de 1730 Hz, integração em quatro amostras e amostragem de meteoros em altitudes de 70 a 110 km (Fritts et al., 2012). Isso significa que, o código de 2 bits refere-se a uma técnica de codificação usada no radar para distinguir entre diferentes tipos de alvos ou ecos de retorno. PRF significa "*Pulse Repetition Frequency*" (Frequência de Repetição de Pulsos), que é a taxa na qual os pulsos de radar são emitidos, no DrAAMER, o PRF é ajustado para 1730 Hz, o que significa que são emitidos 1730 pulsos por segundo.

A integração em quatro amostras refere-se a uma técnica utilizada para combinar informações de múltiplas amostras de retorno do sinal de radar. A amostragem de meteoros em altitudes específicas refere-se à coleta de dados do radar em uma faixa de altitudes específica. No caso do DrAAMER, ele é capaz de amostrar e coletar informações sobre os meteoros em altitudes que variam de 70 a 110 km, o que abrange uma parte significativa da atmosfera onde esses fenômenos ocorrem.

3.3 Dados utilizados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados através de observações por radar de meteoros na EACF, localizada próximo a península Antártica, durante o período de fevereiro de 2011 a fevereiro de 2012. Essas informações sobre os ventos foram gentilmente compartilhadas pelo INPE com o grupo de Física da Atmosfera da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), e foram utilizadas como base principal de dados no desenvolvimento deste estudo.

Conforme afirmado por Barbosa (2021), a pesquisa via técnica de rádio meteoros sempre se mostrou interessada nos ventos da atmosfera superior (alta mesosfera e baixa termosfera). Quando o vento é eletricamente neutro, as partículas são transportadas em trilhas de meteoros, exibindo mudanças em seus movimentos. Esse fenômeno possibilita a realização de cálculos para determinar a velocidade e as componentes dos ventos em cada altitude em que os meteoros são detectados. As velocidades dos ventos podem ser determinadas por meio de uma combinação das velocidades radiais de cada meteoro detectado em todo o céu. Sendo que a ação do vento sobre a trilha de um meteoro pode ser percebida através do deslocamento Doppler da frequência (Δf) no eco recebido. Esse deslocamento está relacionado à velocidade radial do vento. A equação utilizada para calcular a velocidade radial é a seguinte:

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \Delta f \quad (3.1)$$

Sendo λ o comprimento da onda do radar. Caso o vento sopra na direção oposta ao radar, a frequência do sinal refletido diminui, resultando em um deslocamento para o vermelho. Por outro lado, quando o vento sopra na direção do radar, a frequência do sinal refletido aumenta, resultando em um deslocamento para o azul. Portanto, observando e analisando esse deslocamento, é possível estimar a velocidade do vento ao longo da trilha do meteoro. As componentes zonal e meridional do vento são estimadas usando as medidas de velocidades na direção radial. Essas medidas são agrupadas em intervalos de tempo e de alturas específicos. Para este caso em particular, os ventos horários foram obtidos em seis níveis de altura diferentes, centrados em 82, 85, 88, 91, 94 e 98 km, como ilustrado na Figura 3.4.

Esses valores de velocidade radial são utilizados para calcular a componente zonal (leste-oeste) e meridional (norte-sul) do vento em cada nível de altura considerado. Essa abordagem permite uma análise detalhada dos padrões de vento em diferentes altitudes, fornecendo informações sobre a distribuição e variação do vento ao longo da atmosfera.

A Figura 3.4 mostra as componentes dos ventos zonais (direita) e meridionais (esquerda) do dia 03 de fevereiro de 2011 à 24 de fevereiro de 2012, para as altitudes entre 82 km e 98 km.

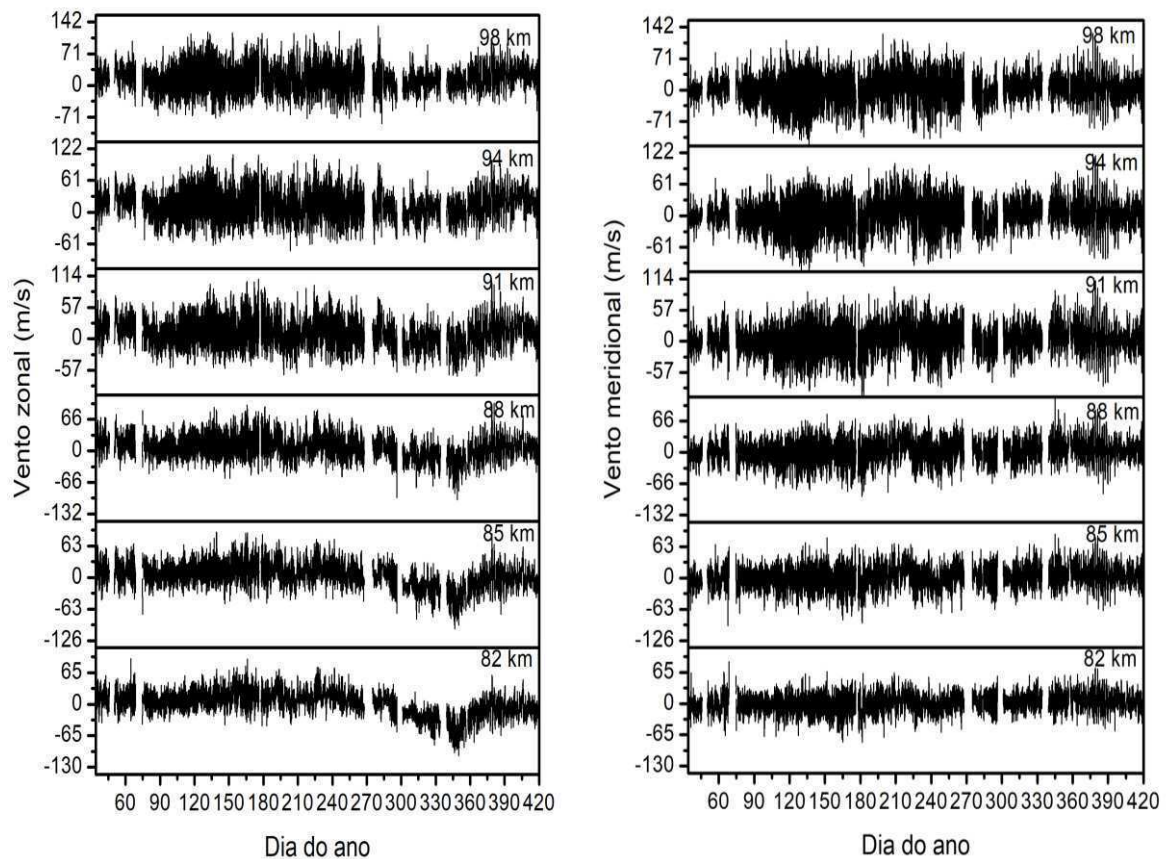


Figura 3.4 – Dados de ventos zonais (direita) e meridionais (esquerda) do dia 03 de fevereiro de 2011 à 24 de Fevereiro de 2012.

Para estimar as componentes do vento em cada intervalo de altitudes, é aplicado um ajuste dos mínimos quadrados. Essa técnica utiliza um estimador que minimiza a soma dos quadrados dos erros entre os dados observados e o modelo, buscando maximizar o grau de ajuste. O procedimento é repetido sucessivamente para cada segmento de dados em um determinado intervalo de altitudes. Isso resulta na obtenção de séries temporais de ventos horários para cada camada, considerando intervalos de altitudes distinto.

3.4 Técnicas de análise dos Dados

Na era da informação em que vivemos, a análise de dados desempenha um papel crucial no desenvolvimento do conhecimento significativos a partir de conjuntos de dados cada vez maiores e mais complexos. Dentre as várias técnicas disponíveis, três abordagens se destacam na análise de dados temporais e espectrais: a Transformada Wavelet, o Periodograma de Lomb-Scargle e a Análise Harmônica.

A transformada wavelet, também conhecida como análise wavelet, é uma técnica que permite analisar dados em diferentes escalas de tempo e frequência. Ela oferece uma abordagem especialmente útil na detecção de eventos, tendências temporais e padrões irregulares. O periodograma de Lomb-Scargle é uma técnica amplamente utilizada para análise espectral de dados irregulares ou não uniformemente amostrados. Ele permite estimar a densidade espectral de potência, revelando componentes periódicas ocultas nos dados.

A análise harmônica é uma abordagem tradicional para a decomposição e modelagem de séries temporais com componentes periódicas. Ela envolve a identificação e ajuste de harmônicos sinusoidais, permitindo a caracterização de padrões recorrentes e sazonalidades em dados. Assim, nesta seção, será explorado de forma mais detalhada sobre essas três técnicas de análise de dados e suas características.

3.4.1 Transformada de Wavelet – TW

É uma transformada linear que pode ser utilizada na análise de sinais não estacionários para obter informações das variáveis em frequência desses sinais e para detectar suas estruturas temporais e sua localização no tempo (Oliveira, 2008). As TW são funções matemáticas que selecionam dados em seus diferentes componentes e obtém cada componente com uma resolução adequada apresentando vantagem em relação a análise de Fourier.

A TW foi desenvolvida por Jean Morlet e Alex Grossman em 1981, constituindo uma nova base de estudo relacionando sinais diversos, desde frequências elétricas até análise de sinais em previsões de eventos. Os estudos sobre teorias de análises de frequência iniciou-se com Jean Fourier em 1807, denominadas de series de Fourier. A Série de Fourier trata-se de uma serie matemática representada como soma de senos e cossenos quando há uma curva que tenha movimentos periódicos repetitivos.

A Transformada de Fourier - TF decompõe um sinal em termos das funções base seno e cosseno. Series de Fourier são utilizadas no estudo de sinais periódicos, enquanto que Transformadas de Fourier são utilizadas no estudo de sinais não periódicos. A TF é uma transformada integral que expressa a função em termos de bases senoidais, como pode-se observar na equação:

$$f(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\Pi wx} dx \quad (3.2)$$

Com a TF é possível decompor o conteúdo espectral de uma série como a soma das contribuições individuais de cada frequência presente na série. A TF analisa um sinal no domínio da frequência, decompondo-o em suas componentes harmônicas fornecendo informações sobre as frequências presentes no sinal, mas não fornece detalhes sobre a localização temporal dessas frequências.

A principal diferença entre a TF e aTW é a capacidade de fornecer informações localizadas no tempo já que a TW é uma técnica mais flexível que permite análises tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. Esta utiliza uma família de funções chamadas wavelets, que são pequenas ondas localizadas no tempo, para decompor um sinal em diferentes escalas e posições temporais.

Essa abordagem permite capturar informações detalhadas sobre o sinal em diferentes escalas de tempo, revelando tanto as frequências quanto as características temporais do sinal. Enquanto a TF é mais adequada para sinais estacionários e periódicos, TW é particularmente útil para analisar sinais não estacionários, transientes ou com mudanças abruptas no tempo, pois é capaz de identificar características temporais em diferentes escalas.

A Figura 3.5 mostra a representação de uma Transformada de Fourier- decomposição senoidal em diferentes frequências e a Transformada Wavelet – decomposição do sinal e diferentes escalas e deslocamentos.

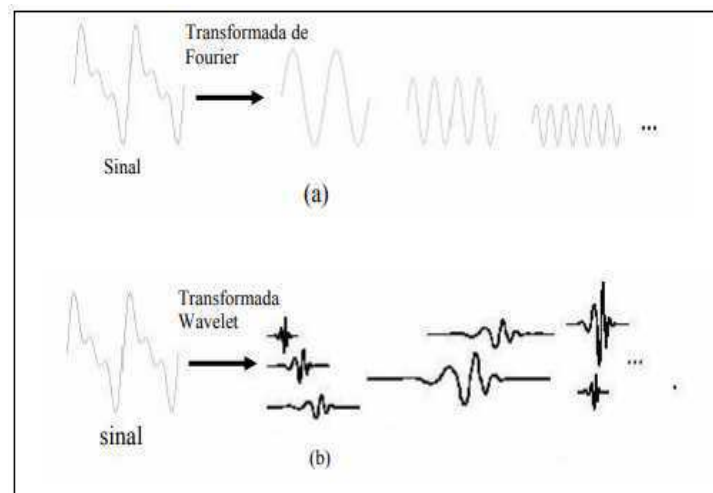


Figura 3.5 – (a) Decomposição Senoidal do sinal em diferentes frequências; (b) Decomposição Wevelet do sinal e diferentes escalas e deslocamentos. Fonte: Adaptado de Oliveira (2008, p. 23).

Na figura 3.5 (a) esta apresentando uma representação da transformada de Fourier, onde afirma que a apresentação de qualquer curva que periodicamente repita ela mesma pode ser representada como a soma das oscilações de seno e/ou co-senos. A Figura 3.5 (b) apresenta a representação da Transformada de Wavelet mostrando a decomposição do sinal em escalas de tempo diferentes, permitindo uma análise precisa e adaptativa das características temporais do sinal, mesmo sem apresentar periodicidade. Assim a TW apresenta a propriedade de dupla localização - em frequência e em tempo - que são características base da utilização de *Wavelet* em análise de sinais.

3.4.2 Periodograma de Lomb-Scargle - L-S

O Periodograma de Lomb-Scargle é uma ferramenta poderosa utilizada na análise de séries temporais irregulares, ou seja, não espaçadas igualmente. Essa técnica foi desenvolvida por Lomb (1976) e posteriormente aprimorada por Scargle (1982). Sendo empregada para identificar periodicidades em séries temporais não amostradas em intervalos de tempo constantes.

No trabalho de Filho (2010) é ressaltada a evolução dos estudos sobre o periodograma, abordando diversos avanços e contribuições significativas nessa área. Essas contribuições incluem as de: Schuster (1898); Fisher (1929); Lomb (1976); Press (1992) e Scargle (1982).

Na busca pela identificação de periodicidades em dados meteorológicos, Schuster (1898) introduziu o periodograma, baseado na Transformada de Fourier. Sua abordagem permitiu analisar a presença de padrões periódicos em séries temporais. Fisher (1929) fez uma contribuição importante ao derivar a distribuição de probabilidade do periodograma na sua forma original, mostrando que essa distribuição não requer um conjunto de dados extremamente grande para ser aplicada de forma confiável.

Lomb (1976) demonstrou que o método do periodograma era equivalente a um ajuste de mínimos quadrados de ondas senoidais, o que possibilitou uma melhor compreensão de como as oscilações periódicas podem ser identificadas e caracterizadas nesse contexto. Press (1992) apresentou uma abordagem numérica para a aplicação do periodograma, fornecendo uma receita prática para calcular o espectro de frequência. No entanto, seu trabalho não especificou quantas e quais frequências poderiam ser obtidas, deixando essa questão em aberto.

Scargle (1982) realizou uma análise pioneira ao investigar inicialmente a frequência de uma onda cujo período é a metade do comprimento total da série temporal. Ele mostrou que as demais frequências seriam múltiplas desse comprimento de onda, até um número de frequências igual ao maior número inteiro imediatamente menor do que $N_0/2$, onde N_0 é o número total de pontos na série.

Assim, o periodograma clássico é calculado como a norma quadrática da Transformada Discreta de Fourier. No entanto, a definição específica do periodograma Lomb-Scargle é utilizada para estimar a contribuição de uma determinada frequência (ω) na composição de todo o sinal em uma série temporal $X(t_i)$, sendo o valor de $i = 1, 2, 3 \dots N_0$.

Uma diferença fundamental entre o periodograma Lomb-Scargle (L-S) e a análise de Fourier é a forma como os dados são ponderados. Enquanto a análise de Fourier pondera os dados com base no espaçamento uniforme entre as amostras, o método Lomb-Scargle pondera os dados com base nos pontos individuais. Isso significa que o L-S estima as componentes senoidais e cosenoidais apenas nos pontos em que os dados são realmente amostrados, levando em consideração a natureza não uniforme do espaçamento entre as amostras (Gomes, 2013).

3.4.3 Análise Harmônica

As amplitudes e as estruturas de fases referentes as oscilações foram obtidas através de análise harmônica. A análise harmônica é um método amplamente utilizado para estudar fenômenos periódicos ou quase periódicos. Para que seja possível estabelecer uma relação entre

os fenômenos analisados nos domínios do tempo e da frequência, é necessário que o comportamento da grandeza no domínio do tempo seja periódico. Isso significa que a grandeza se repete em intervalos de tempo iguais a T , onde T é o período que contém um ciclo completo do sinal com frequência f . Sendo $f = 1/T$, onde T é o período.

Um ponto importante é identificar em quais condições se torna mais conveniente analisar um sinal no domínio da frequência.

A representação do domínio tempo é dado pela função:

$$x(t) = A \operatorname{sen}(2\pi ft - \varphi) \quad (3.3)$$

Sendo a representação $x(t)$ a posição, A é a amplitude da onda, f é a frequência da onda, t é o tempo e φ é a fase da onda.

Assim, para processamento dos dados com essa técnica foi realizado considerando-se uma janela contendo 12 dias de dados das séries com uma amostra 24 dias. Para a caracterização das ondas de 2, 4,5 e 10 dias, foi sendo realizado o ajusta da quantidade de janelas. A estrutura vertical da amplitude e fase dos sinais periódicos, foram estimados com as séries temporais de ambas as componentes (zonais e meridional) em cada altitude.

Em suma, foram utilizadas três técnicas principais para analisar os dados: primeiramente, a Wavelet foi empregada para identificar as assinaturas dos períodos das ondas existentes nos dados; em seguida, o Periodograma de Lomb-Scargle foi utilizado para discriminar o período da onda, confirmar a sua existência e basear-se na análise espectral; por fim, a análise harmônica foi empregada para obter as evoluções temporais da estrutura vertical da amplitude e determinar o comprimento vertical da onda e, assim, sua velocidade de fase.

4 Resultados e Discussão

Neste estudo, os resultados foram obtidos a partir dos dados de ventos previamente mencionados, que foram coletados por meio de observações realizadas por radar de meteoros na estação Comandante Ferraz. Esses dados dizem respeito à região localizada entre 82 e 98 km de altitude na atmosfera da Antártica.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a evolução temporal das estruturas verticais dos ventos médios, obtidos entre fevereiro de 2011 e janeiro de 2012, nas componentes zonal e meridional. Os contornos em vermelho representam os ventos zonais para leste e os ventos meridionais para norte, enquanto que os contornos em azul representam os ventos zonais para oeste e os ventos meridionais para sul.

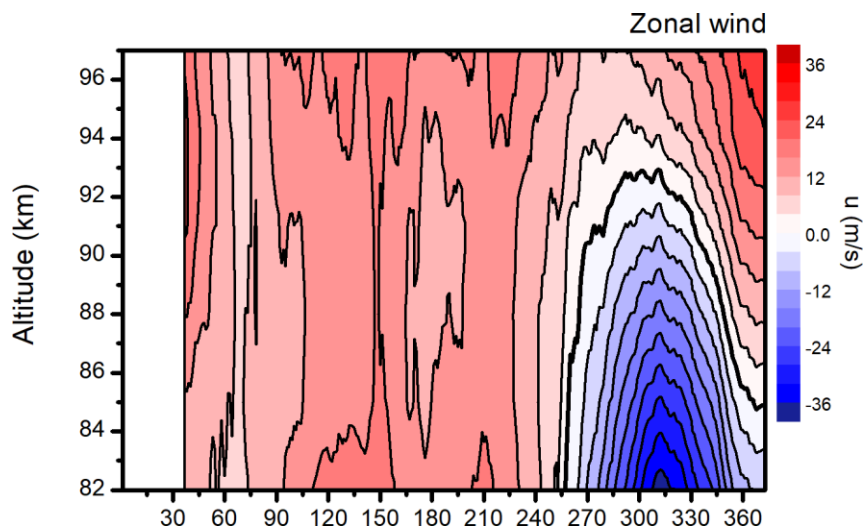


Figura 4.1 – Estrutura vertical do vento zonal médio sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para o período entre fevereiro de 2011 e janeiro de 2012.

Durante o período de fevereiro de 2011 até meados de setembro de 2011, os dados indicaram que o vento zonal (movimento horizontal do ar no sentido leste-oeste) na região estudada estava apontando para leste. Porém, a partir de meados de setembro de 2011, houve uma mudança na direção do vento zonal, que passou a apontar para oeste em altitudes abaixo de 94 km. Essa mudança durou até o início de janeiro de 2012, quando o vento atingiu velocidades em torno de -36 m/s em altitudes abaixo de 84 km.

Na Figura 4.2, é possível ver a representação dos ventos meridionais. No início do período observado (fevereiro), o vento aponta para o sul, e essa direção é mantida até o final de junho. Durante todo o mês de julho, o vento muda sua direção e passa a apontar para o norte.

Em seguida, ocorrem mudanças na direção do vento, com movimentos para o sul em altitudes acima de 90 km e para o norte até o final de outubro. A partir de novembro de 2011 e até o início de 2012, a direção predominante do vento é para o norte.

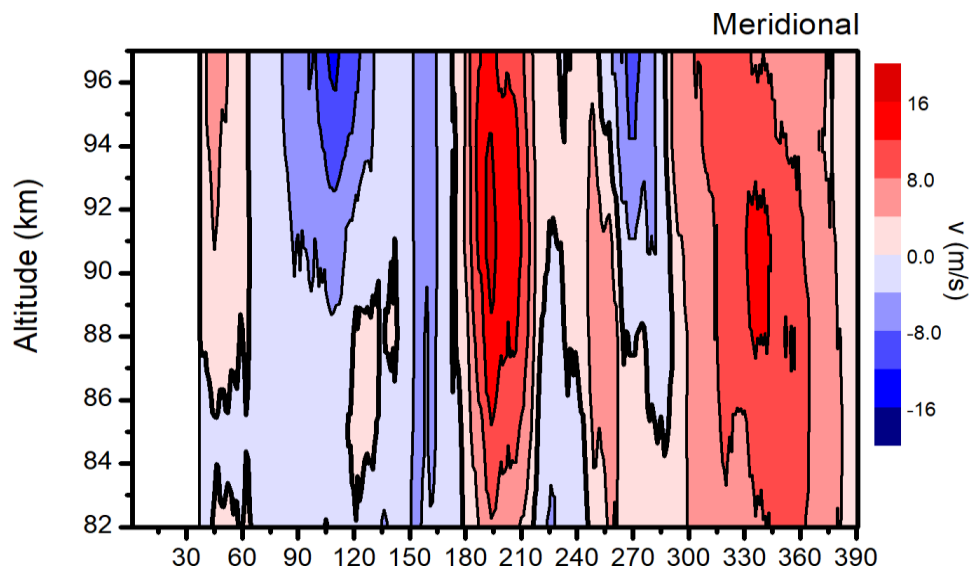


Figura 4.2 – Estrutura vertical do vento meridional médio sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para o período entre fevereiro de 2011 e janeiro de 2012.

É importante destacar que a mudança na direção do vento zonal em meados de setembro de 2011 coincide com as mudanças nos ventos meridionais observadas em agosto do mesmo ano. Essas mudanças foram registradas até o início de 2012 e podem indicar uma possível influência de fenômenos atmosféricos sazonais ou outros processos dinâmicos na região. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 sugerem uma dinâmica complexa dos ventos na região estudada e abrem possibilidades para estudos futuros sobre as causas dessas variações. Após a construção das séries temporais das medidas de vento, foram analisadas através da aplicação da transformada Wavelet, com o objetivo de identificar possíveis assinaturas de ondas planetárias presentes nos dados. Essa técnica foi aplicada nas séries temporais correspondentes às altitudes entre 82 e 98 km. No entanto, em algumas situações, foi necessário utilizar dados interpolados devido à presença de falhas nas séries temporais dos dados de vento.

A Figura 4.3 apresenta o resultado da aplicação da Wavelet, mostrando a representação da energia espectral

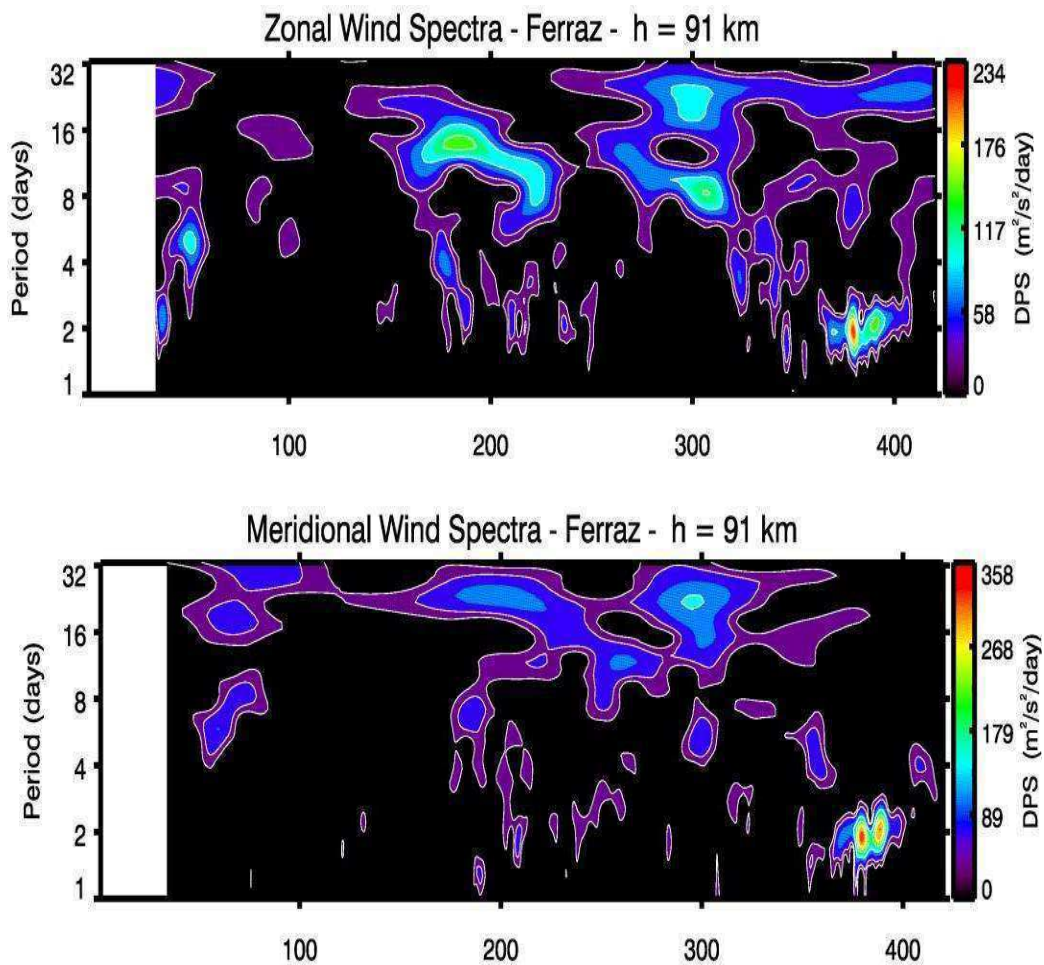


Figura 4.3 - Espectro wavelet correspondente ao vento zonal e meridional medido na altitude de 91 km.

A Figura 4.3, exibe os espectros de energia do vento zonal e meridional. Observa-se que, no caso do vento zonal, há um espectro de energia significativo entre junho e agosto de 2011, com ondas de períodos entre 8 e 16 dias. Esse espectro volta a aparecer entre outubro e novembro do mesmo ano, também com um nível de significância considerável. Além disso, é possível identificar energia espectral referente a períodos próximos a 5 dias no início de fevereiro, e períodos próximos a 4 dias em junho e novembro.

Já em relação ao vento meridional, o espectro de energia apresenta dados significativos apenas para períodos de mais de 16 dias em meados de outubro de 2011, e de 2 dias em janeiro de 2012. É importante ressaltar que, para obter esses resultados, foi necessário a utilização da transformada Wavelet nas séries temporais dos dados de vento obtidos.

4.1 A onda de 2 dias

4.1.1 Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 2 dias

O gráfico de Lomb-Scargle é ferramenta poderosa para analisar séries temporais irregulares e extrair informações de seus componentes de frequência. Quando a densidade espectral de uma frequência particular ultrapassa o nível de significância, significa que a amplitude dessa frequência é estatisticamente significativa e, portanto, pode indicar uma oscilação real na série de dados. Associando o gráfico de PSD com o período (dias), pode-se utilizar o conceito de frequência, que é o inverso do período. A frequência é medida em ciclos por unidade de tempo (por exemplo, ciclos por dia), enquanto o período é medido em unidades de tempo.

Os gráficos do Periodograma de Lomb-Scargle apresentados nesta seção são representações da análise da periodicidade da onda de 2 dias nos componentes zonais e meridionais. Ou seja, são gráficos de densidade espectral de uma série temporal. O pico no período de 2 dias indica que existe uma oscilação na série temporal com um período máximo para a onda de 2 dias em ambas os componentes de ventos zonais e meridionais.

A Figura 4.4 são apresentados os resultados para o Periodograma da componente zonal do vento referentes a dois intervalos de dias em janeiro e fevereiro de 2012.

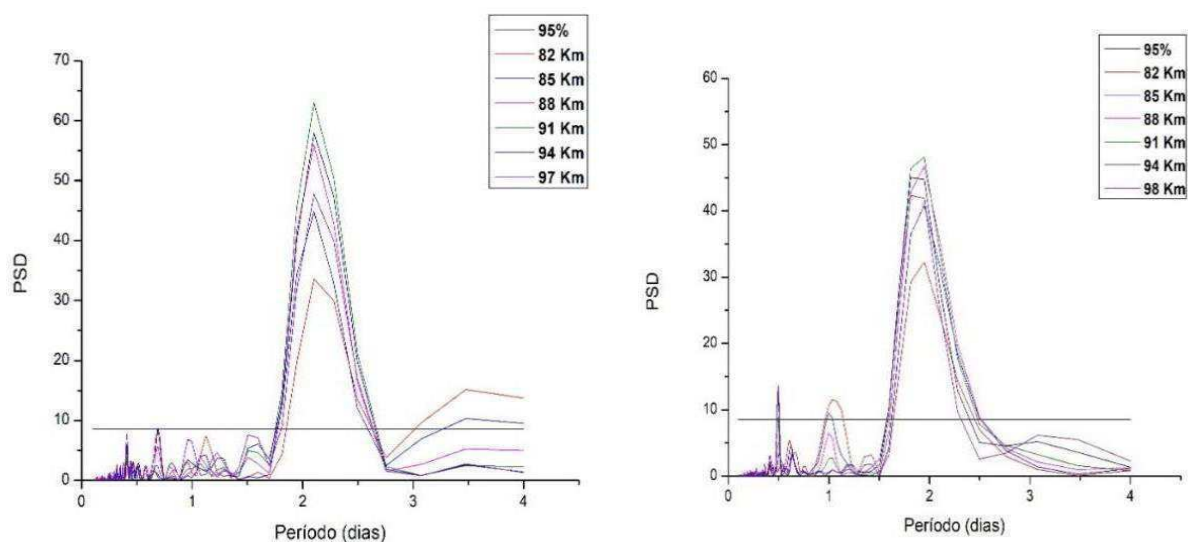


Figura 4.4 – Periodograma de Lomb-Scargle da componente zonal de uma onda com período de 2 dias nos dias 10 de janeiro (dia 375, à esquerda) e 23 de janeiro (dia 388, à direita) de 2012.

4.1.1 Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 2 dias

As diferentes cores nos gráficos representam a densidade de energia para cada altitude. A linha horizontal em preto indica o nível de confiança de 95%, ou seja, apenas as frequências com densidade de energia acima dessa linha são consideradas significativas.

No gráfico a esquerda da Figura 4.4, a energia espectral para o período em torno de 2 dias está presente em todas as altitudes observadas, com pico acima do nível de significância. Esse dia específico (10 de janeiro, dia 375) foi selecionado porque a periodicidade das ondas foi previamente identificada na Wavelet. Nesse caso, foi observado que havia uma onda com período de 2 dias nessa época do ano na Antártica, o que motivou a escolha desse dia para a análise do Periodograma. Além disso, é importante destacar que essa onda também foi observada no dia 23 de janeiro (dia 388). Assim a mesma foi observada no início e final de janeiro para ambas as componentes.

É apresentado na Figura 4.5, o Periodograma de Lomb-Scargle para a componente meridional em dois dias distintos de janeiro de 2012; 13 de janeiro (dia 378, à esquerda) e 19 de janeiro (dia 384, à direita), para a componente meridional.

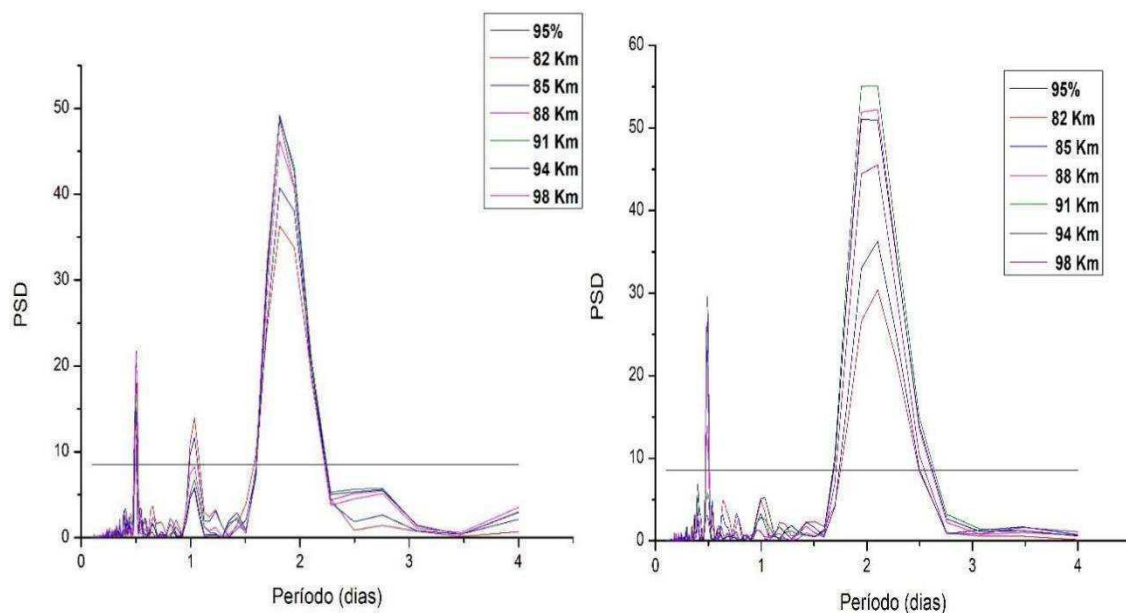


Figura 4.5- Periodograma de Lomb-Scargle da componente meridional de uma onda com período de 2 dias nos dias 13 de janeiro (dia 378, à esquerda) e 19 de janeiro (dia 384, à direita) de 2012.

É possível observar que a onda de dois dias está presente em ambas as componentes, com níveis significativos de densidade espectral, sugerindo que seja um fenômeno de grande escala na atmosfera da Antártica. Para isso é necessário realizar análise de outras características

da onda além da densidade espectral, como a amplitude e a fase, para entender melhor como ela se comporta na atmosfera da Antártica.

4.1.2 Amplitude, fase e comprimento de onda vertical

A amplitude é uma característica importante das ondas, que pode ser interpretada como o grau ou a intensidade da perturbação periódica. Em outras palavras, ela é medida a partir da representação matemática da onda pelo deslocamento máximo a partir da posição de equilíbrio. Por exemplo, uma oscilação periódica na temperatura pode ser modelada por uma senoide, mas a amplitude não pode ser associada a uma altura física da onda. Ela pode variar ao longo do tempo e é um indicador da magnitude da perturbação que a onda produz em um meio. Ao analisar a amplitude da onda, é possível identificar se ela está se intensificando ou enfraquecendo, o que pode ser útil para entender como a onda se comporta ao longo do tempo.

Também é possível comparar a amplitude em diferentes locais para entender como a onda se propaga e como ela pode afetar o meio em que está se propagando. Mas a amplitude não é a única característica de uma onda, mas sim uma das principais, juntamente com a frequência e a fase como será apresentado.

São apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7 a evolução da estrutura vertical da Amplitude, para a componente zonal e meridional, da onda de 2 dias entre os dias 01 de janeiro à 4 de fevereiro de 2012.

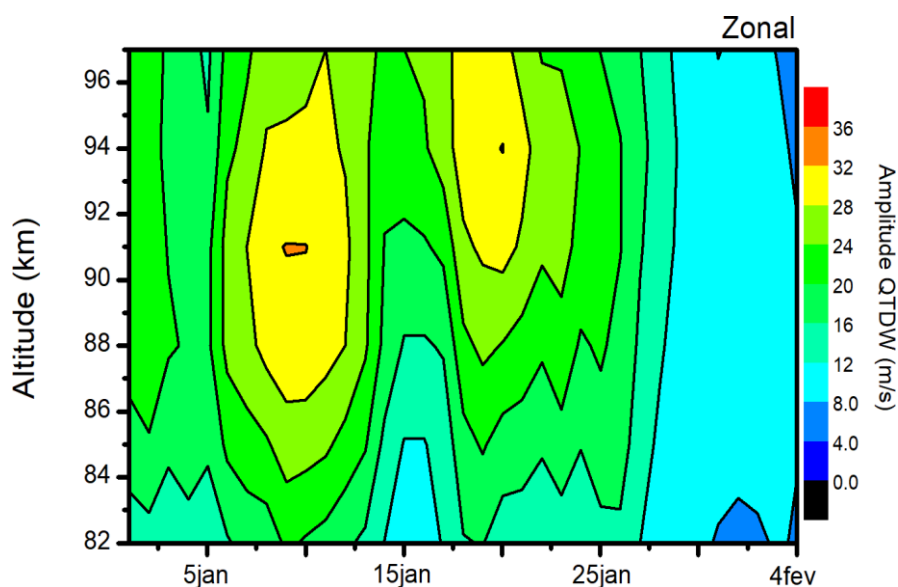


Figura 4.6 - Evolução da estrutura vertical da Amplitude, para a componente zonal, da onda de 2 dias entre os dias 01 de janeiro e 4 de fevereiro de 2012 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.

A onda de 2 dias apresenta amplificações em duas ocasiões no mês de janeiro de 2012, em altitudes superiores a 87 km e 91 km, com amplitudes superiores a 32 m/s. A análise da Wavelet não indicou a presença significativa da onda em nenhum outro período do ano, apenas em janeiro, para ambas as componentes de vento.

Na Figura 4.7 é possível observar que a amplitude na componente meridional do vento atinge até 36 m/s em torno do dia 13 de janeiro de 2012 (dia 378) em altitudes acima de 91 km. Além disso, ela varia entre 24 m/s e 36 m/s entre os dias 07-13 de janeiro em altitudes acima de 85 km. Esses resultados indicam a presença de uma onda com altas amplitudes durante o verão antártico em comparação aos outros dias analisados.

Comparando com os estudos de Tunbridge et al.,(2009), a onda de dois dias foi observada no ártico e na antártica. Vista no verão antártico com amplitudes significativas entre janeiro e fevereiro, nas altitudes entre 88 e 100 km, sendo que as observações foram realizadas no período de 2005 a 2008 em Rothera e de 1999 a 2008 em Esrange. Sua amplitude variou significativamente durante o período de observação, atingindo valores entre 15 à 25 m/s.

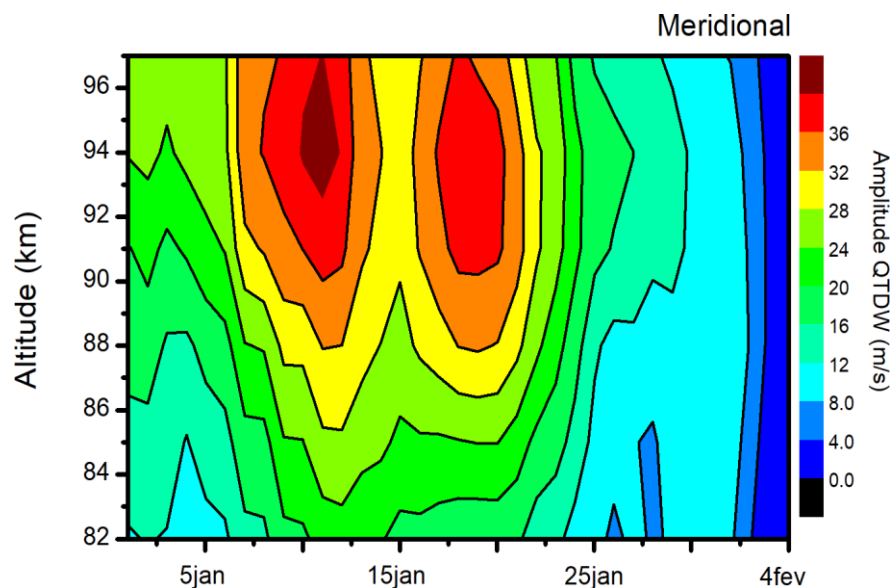


Figura 4.7- Evolução da estrutura vertical da Amplitude, para a componente meridional, da onda de 2 dias entre os dias 01 de janeiro e 4 de fevereiro de 2012 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.

Ao analisar as componentes zonais e meridionais da amplitude no mesmo período, foi observado que a amplitude dos ventos meridionais foi mais intensa do que a amplitude dos ventos zonais, indicando que a variação na velocidade do vento na direção norte-sul foi mais pronunciada do que na direção leste-oeste nesse período.

Estudos sobre a amplitude da onda de 2 dias mostram que a amplitude na componente meridional é aproximadamente duas vezes maior do que na componente zonal. Em algumas análises realizadas com dados do hemisfério norte, foi observado que a razão entre as amplitudes zonal e meridional da onda de 2 dias aumenta em regiões de médias para altas latitudes, onde as amplitudes nas duas componentes do vento se tornam comparáveis (CHSHYOLKOVA, 2007).

Thayaparan et al. (1997), observou as manifestações da onda de 2 dias na média atmosfera em diferentes épocas do ano, destacando que elas ocorrem tipicamente no verão, sendo maximizadas em janeiro/fevereiro e julho/agosto nos hemisférios Sul e Norte, respectivamente. Também como Lima et al. (2004), relatam em seus estudos que a onda de dois dias foi observada em diferentes estações do ano, com menor amplitude e regularidade do que durante o verão (A região mencionada no estudo de Lima et al. (2004) é Cachoeira Paulista, localizada no estado de São Paulo, Brasil).

Além da análise da amplitude é necessário analisar o atraso de fase da onda de dois dias na componente meridional – componente na qual a onda de 2 dias mostrou uma amplitude mais elevada em ambos os dias analisados. Assim o gráfico apresentado a seguir mostra a relação entre o atraso de fase e a altitude de uma onda, destacando dois eventos em particular.

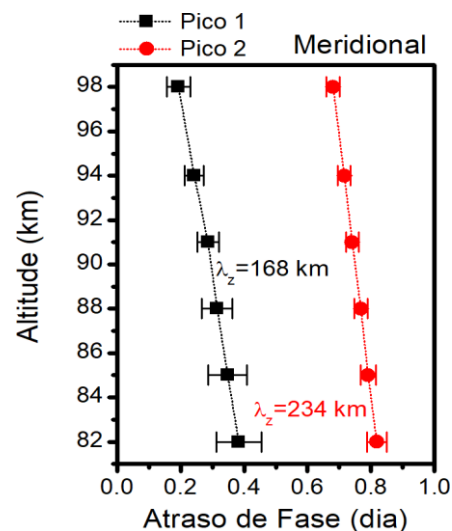


Figura 4.8- Estrutura vertical da Fase de janeiro a fevereiro de 2012.

O gráfico na Figura 4.8. apresenta a relação entre o atraso de fase e a altitude de uma onda, destacando as duas ampliações da onda em particular. Na abcissa -eixo x - temos o

atraso de fase, que representa a diferença entre o tempo que a onda leva para chegar em diferentes altitudes. Na ordenada - eixo y- temos a altitude, que representa a distância vertical em relação a um ponto de referência.

É possível observar que a fase da onda de 2 dias apresenta uma inclinação descendente. A inclinação descendente da estrutura vertical de fase indica que a onda se propaga ascendentemente e este comportamento é observado em ambos os picos que são destacados no gráfico. Além disso, podemos observar que o comprimento de onda vertical médio é diferente em cada pico. No primeiro, o comprimento de onda vertical médio foi de ~168 km, enquanto no segundo um comprimento de onda vertical médio de ~234 km foi estimado.

No primeiro pico, o comprimento de onda vertical médio observado foi de 168 km, resultou de uma velocidade de fase média de aproximadamente 84 km/dia. Já no segundo pico, o comprimento de onda vertical médio observado foi de 234 km, indica uma velocidade de fase média de cerca de 117 km/dia.

Baumgaertner et al. (2008) e Phillips (1989) realizaram estudos sobre a onda de dois dias na Antártica. Phillips (1989) realizou observações e análises durante os meses de verão do hemisfério sul, de dezembro a fevereiro dos anos 1986 e 1987. Utilizando radares de monitoramento em Mawson (67°S, 63°E) e comparando-os com dados de Adelaide (35°S, 138°E). Encontrou oscilações regulares da onda com amplitudes de 10-15 m/s em altas latitudes durante o verão.

Já Baumgaertner et al. (2008) analisaram as ondas planetárias na mesosfera sobre a Antártica, com períodos entre dois e quatro dias. Utilizando dados de radares MFSA em Scott Base, Rothera e Davis, juntamente com medidas de temperatura do instrumento EOS MLS a bordo do satélite Aura e dados de velocidade do vento do UKMO. Em suas observações em Davis, eles identificaram uma oscilação com um período de aproximadamente 2 dias no final de janeiro e início de fevereiro de 2005. A amplitude máxima da oscilação ocorreu em torno de 90 km de altitude, e uma estrutura de propagação zonal para oeste foi observada. Além disso, em Scott Base, foram registradas oscilações com períodos entre 2 e quatro dias durante o inverno, com amplitudes máximas abaixo de 80 km.

4.2 Onda de 4 dias

4.2.1 Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 4 dias

Com o objetivo de identificar com mais precisão a periodicidade observada na análise de wavelet, as séries temporais dos dados de vento foram submetidas a uma análise espectral utilizando o periodograma de Lomb-Scargle. Para essa análise, foi utilizada uma janela de 12 dias, a fim de garantir uma resolução adequada para a identificação de períodos significativos.

Na Figura 4.4, os gráficos (A) e (B) apresentam os resultados da análise espectral usando o Periodograma de Lomb-Scargle para diferentes altitudes.

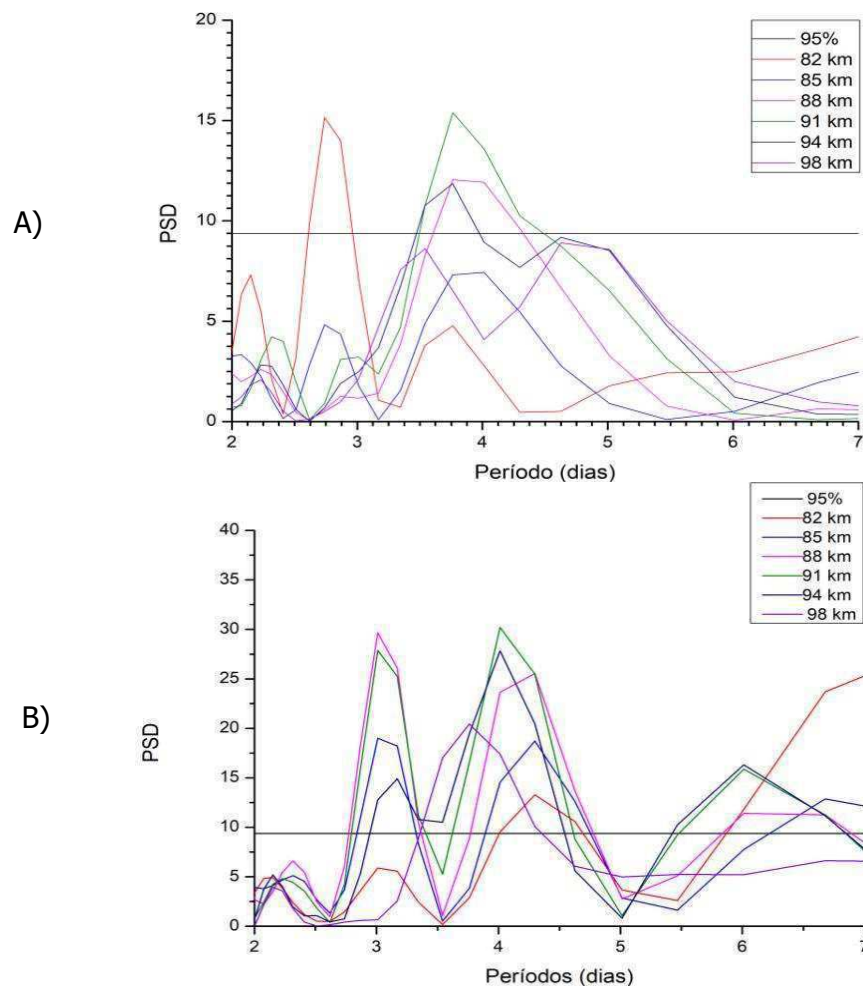


Figura 4.9 – Periodograma de Lomb-Scargle da onda de 4 dias na componente zonal no dia, 170 (A) e dia 320(B).

Na Figura 4.9 (A), é possível observar que um dos picos que ultrapassam a reta de significância é para o período da onda de 4 dias, que aparece em altitudes de 85km, 88km e 91km, comum nível de confiança acima de 95%.

A Figura 4.9 (B), representa os dados do mês de novembro, o Periodograma indica vários picos de densidade espectral de energia em períodos distintos em todas as altitudes. No entanto, o período em que a onda prevaleceu com níveis acima de 95% de significância em todas as altitudes foi a de 4 dias. Portanto, podemos concluir que a onda de 4 dias foi identificada como um sinal robusto em ambas as análises de Wavelet e de Periodograma.

Allen (1996), em seus estudos sobre as ondas com períodos de 4 dias relata que ela é uma característica em movimento para leste, quasi-não dispersiva, que ocorre perto da estratopausa polar de verão. Estudo esse que utilizou da cobertura e a resolução vertical do Microwave Limb Sounder (MLS) a bordo do Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) para examinar a onda de 4 dias durante os invernos austrais tardios de 1992 e 1993.

Liu et al. (2013) investigaram a ocorrência da onda de 4 dias na alta mesosfera da Antártica e descobriram que ela está associada com uma estrutura de vento vertical que é produzida pela convergência horizontal de ondas de gravidade de menor escala. Eles também descobriram que a ocorrência dessa onda está fortemente correlacionada com a atividade solar e que ela tem uma importante influência na dinâmica da mesosfera.

4.2.2 Amplitude, fase e comprimento vertical da onda de 4 dias

As Figuras apresentadas nesta seção mostram os resultados da análise harmônica dos dados de vento. Com base nessa análise, foram estimadas as amplitudes, fases e comprimento vertical da onda de 4 dias, permitindo sua caracterização. Na Figura 4.3, a transformada de Wavelet foi usada para identificar a periodicidade da onda. Com base nesses períodos, foram realizados os cálculos necessários.

A Figura 4.10 exibe as amplitudes estimadas de junho a início de setembro (do dia 150 ao 250). Durante o solstício de inverno, a onda de 4 dias apresentou considerável variabilidade, particularmente no final de junho e início de julho, com amplitudes variando entre 10-16 m/s em altitudes acima de 88km.

Durante o solstício de inverno, as ondas de 4 dias geralmente apresentam uma maior amplitude, como mostrado na Figura 4.10.

4.2.2 Amplitude, fase e comprimento vertical da onda de 4 dias

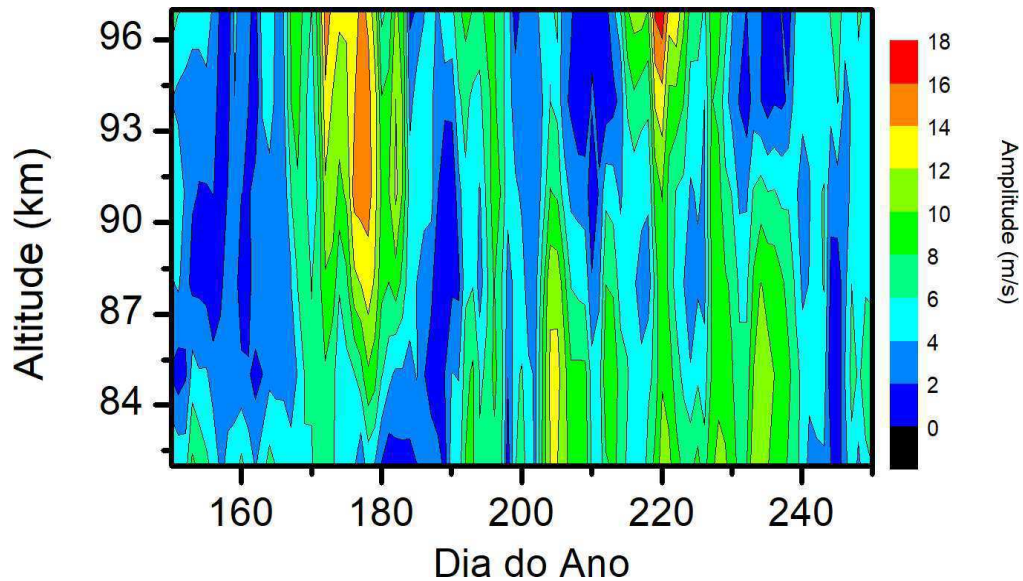


Figura 4.10 – Evolução da estrutura vertical da Amplitude da onda de 4 dias entre os dias 150 à 250, de junho -30 de maio a 7 de setembro de 2011- sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.

A amplitude da onda de 4 dias atingiu seu pico de 18 m/s em meados de agosto (dia 220) em altitudes acima de 96 km. No entanto, nos dias restantes observados, a amplitude não ultrapassou 12 m/s. A Figura 4.11 apresenta a evolução da estrutura vertical da amplitude para o Período de dias entre 300 e 350.

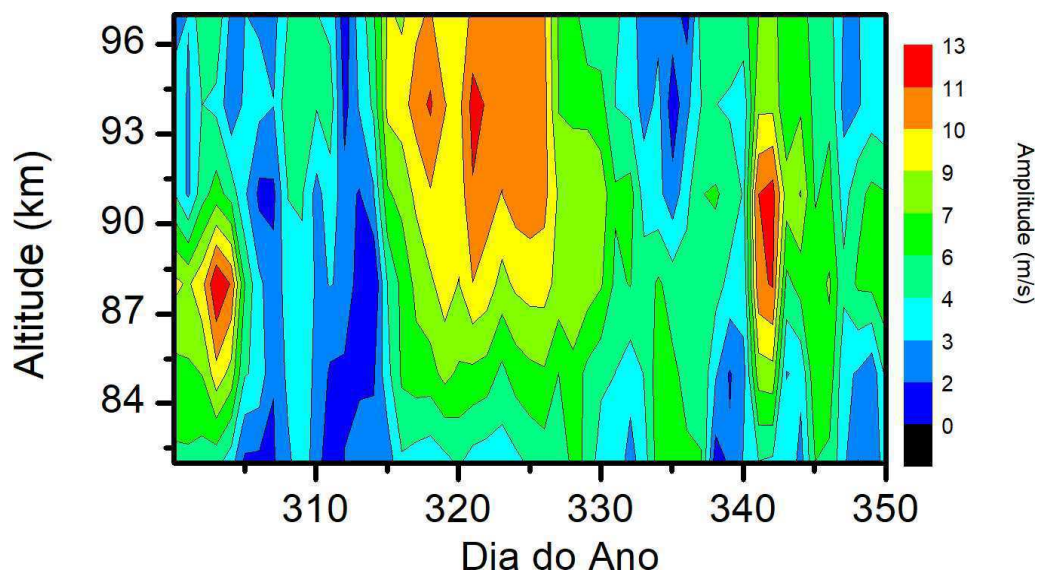


Figura 4.11 – Evolução da estrutura vertical da Amplitude da onda de 4 dias entre os dias 300 à 350 - 27 de outubro a 16 de dezembro de 2011 - sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida.

4.2.2 Amplitude, fase e comprimento vertical

Durante o equinócio de primavera, a onda de 4 dias apresentou uma amplitude de 13 m/s no início de novembro em altitudes entre 85-88 km e em meados de novembro acima de 90 km. A amplitude se tornou importante novamente com a mesma intensidade em meados de dezembro.

A análise indica que a onda manteve amplitudes acima de 10 m/s nas altitudes entre 88-97 km durante meados até o final de novembro, permanecendo estável até meados de dezembro. Dessa forma, é possível afirmar que a onda de 4 dias esteve presente com valores relevantes de amplitude em dois momentos distintos: em junho e novembro de 2011.

O estudo da estrutura vertical de fase é importante em diversas áreas da ciência, como na meteorologia, na física da atmosfera e na astrofísica. Na meteorologia, por exemplo, a análise da estrutura vertical de fase é fundamental para a compreensão dos processos de formação de nuvens, previsão de tempestades e previsão do tempo.

Já na física da atmosfera, a estrutura vertical de fase é importante para a investigação de processos de transporte de energia, estudo das camadas da atmosfera e para o entendimento de fenômenos como as auroras boreais. Na astrofísica, o estudo da estrutura vertical de fase é importante para a compreensão das propriedades de ondas eletromagnéticas que se propagam através do meio interplanetário.

No estudo da estrutura vertical, foram analisados dados sobre a amplitude e a fase da onda de 4 dias na atmosfera durante um período específico, de meados de junho (entre os dias 168 e 182). Esses dados foram apresentados em duas Figuras: a Figura 4.12 (A), que mostra a variação da amplitude da onda em relação à altitude, representada no eixo das ordenadas, e a figura 4.12 (B), que mostra a variação da fase da onda em relação à altitude, também representada no eixo das ordenadas, e ao tempo, representado no eixo das abscissas.

Na Figura 4.12 (A), o eixo das abscissas representa a amplitude em metros por segundo. Já na Figura 4.12 (B), o eixo das abscissas representa a fase em dias. Durante o período de 168 a 182 dias do ano, as amplitudes da onda de 4 dias aumentaram com a altitude, atingindo um pico de 16 m/s em altitudes acima de 91 km no dia 178. No dia 168, a amplitude alcançou 6,4 m/s em altitudes superiores a 88 km, e a estrutura vertical de fase apresentou uma inclinação descendente, o que indica uma propagação ascendente de energia.

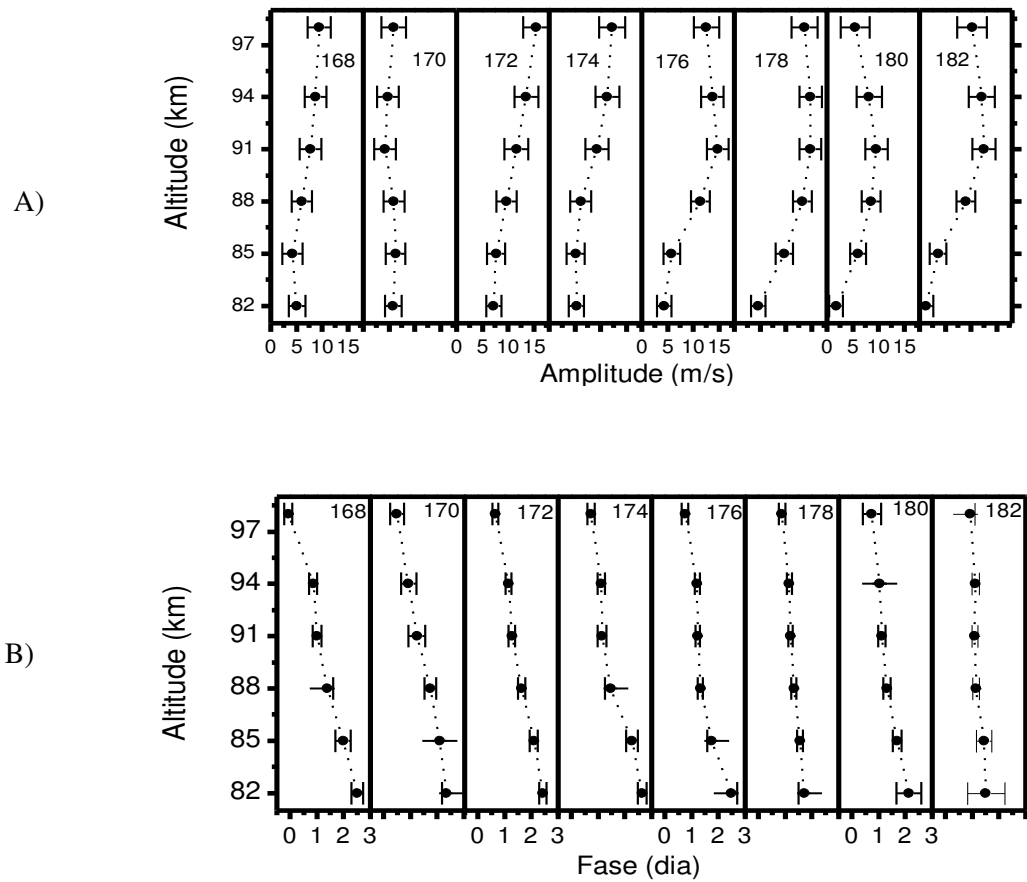


Figura 4.12 – Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) de meados de junho a início de julho.

Com base nas informações das estruturas verticais de fase, os comprimentos de onda vertical para os eventos destacados foram inseridos e estão representados na Tabela 4.1, que apresenta o dia do ano, a velocidade de fase e o comprimento de onda vertical.

Tabela 4.1 – Velocidade de fase vertical e seus respectivos comprimentos de onda verticais para a ondas de 4 dias

Dia do ano	Velocidade de fase (km/dia)	λ_z (km)
168	6,4	25,6
170	6,7	26,8
172	7,2	28,8
174	6,6	26,4
176	7,6	30,4
180	8,1	32,4

4.2.2 Amplitude, fase e comprimento vertical

Durante meados de junho, a onda de 4 dias apresentou uma velocidade de fase média de 7,1 km/dia e um comprimento de onda vertical de 28,4 km de extensão. Neste período, a amplitude da onda também foi significativa, atingindo valores altos em altitudes acima de 91 km. Além disso, em novembro foi observada uma nova ocorrência da onda com um nível significativo de amplitude.

A Figura 4.13 apresenta informações relevantes sobre a Estrutura Vertical da Amplitude (A) e da Fase (B) da onda de 4 dias, referentes ao evento ocorrido no mês de novembro.

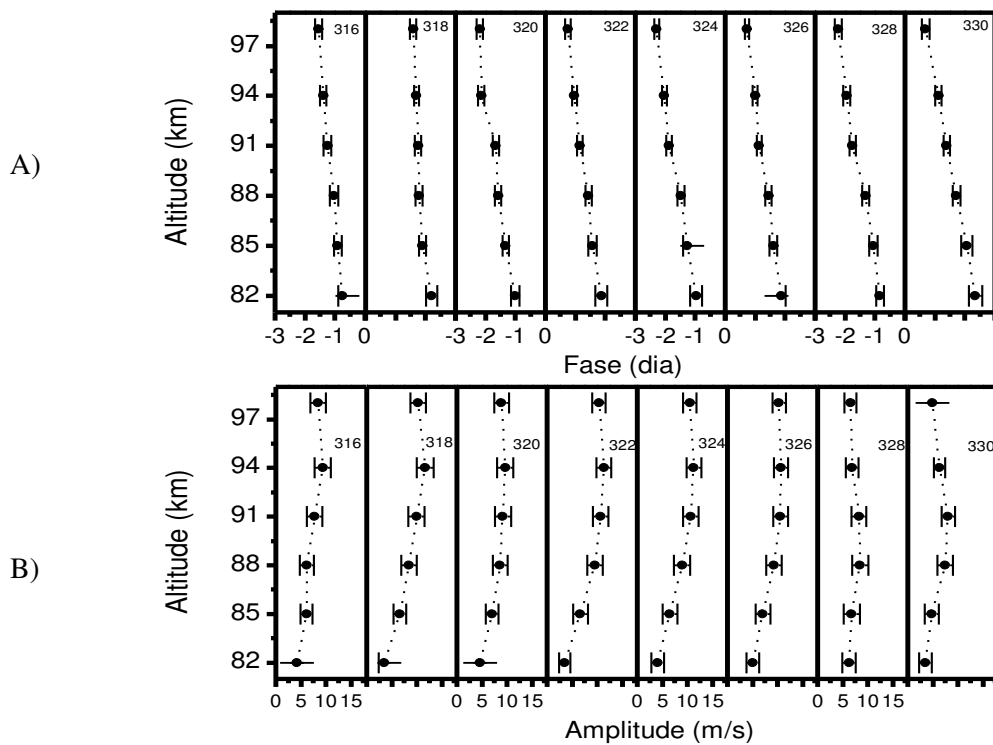


Figura 4.13 - Estrutura vertical da Amplitude (A), Fase (B) da onda de 4 dias para o evento do mês de novembro.

A estrutura vertical da amplitude (A) na Figura 4.13 mostra um aumento gradual entre os dias 316 e 326, atingindo uma máxima de 13 m/s no dia 322. Nesse mesmo dia, a estrutura vertical da fase apresenta uma inclinação descendente. Nos dias 328 e 330, a onda de 4 dias começa a se quebrar, com amplitudes descendentes em altitudes acima de 88 km. Por outro lado, na Figura 4.13 (B) a inclinação das estruturas verticais de fase permanece descendente durante os eventos analisados. A Tabela 4.1 apresenta informações sobre a velocidade de fase e comprimento vertical da onda de 4 dias em diferentes dias do ano. Cada linha contém o dia do ano, seguido pela velocidade de fase e comprimento de onda vertical correspondentes.

4.2.2 Amplitude, fase e comprimento vertical

A Tabela 4.2 segue o mesmo formato, fornecendo informações adicionais sobre a onda de 4 dias em diferentes períodos de tempo.

Tabela 4.2 – Velocidade de fase vertical e seus respectivos comprimentos de onda verticais para a ondas de 4dias- mês de novembro.

Dia do ano	Velocidade de fase (km/dia)	λ_z (km)
316	19,3	77,2
320	19,2	76,8
324	20,3	81,2
326	23,6	94,4
328	20,4	81,6
330	13,3	53,2

A Tabela acima apresenta os valores médios de velocidade de fase de 19,3 km/dia e comprimento vertical de 77,4 km para os dias do mês de novembro. É possível observar que, durante todo o período analisado, as velocidades de fase foram maiores em comparação com os dados da Tabela 4.1, indicando que a onda de 4 dias apresentou uma média de velocidade de fase maior em novembro em relação aos dados de junho. A onda de 4 dias, na antártica, foi estudada por Lawrence et al. (1995), Ding et al. (2019), Mitchell et al. (2020) através de radar de meteoros com dados de diferentes estações.

Nos estudos de Lawrence et al. (1995) utilizaram dados de um radar de meteoros localizado na Estação Davis, na Antártica Oriental, para investigar a ocorrência da onda de 4 dias na alta atmosfera da região e sua relação com outros fenômenos atmosféricos. Os resultados indicaram que a onda de 4 dias é um fenômeno recorrente na região, com amplitudes variáveis ao longo do ano e que estão relacionadas às marés atmosféricas. Além disso, os autores também identificaram a influência da onda de 4 dias na circulação atmosférica em altitudes superiores a 90 km.

Fraser et al. (1995), apontam que a onda de 4 dias se estende até a mesosfera superior da Antártica. Os autores utilizaram observações de radar e análises estratosféricas para coletar dados sobre a onda de 4 dias na região da Antártica. O radar de meteoros da Estação Zhongshan foi uma das ferramentas principais utilizadas para coletar os dados.

Já na pesquisa de Allen et al. (1997), foi investigado a onda de 4 dias observada pelo instrumento Microwave Limb Sounder (MLS) em agosto-setembro de 1992 e 1993. Foram encontrados eventos fortes da onda de 4 dias, com uma estrutura de dois picos na temperatura, máximos na estratosfera superior e mesosfera inferior, e variação de fase vertical.

Em conclusão, os estudos de Lawrence et al. (1995); Fraser et al. (1995) e Allen et al. (1997) fornecem informações importantes sobre a onda de 4 dias na atmosfera. Esses estudos destacam que a onda de 4 dias é um fenômeno recorrente na região da Antártica, com amplitudes variáveis ao longo do ano.

4.3 Onda de 5 dias

4.3.1 Periodograma de Lomb-Scargle

As Figuras 4.9 apresentam a densidade espectral de energia para a componente zonal e meridional. Essas componentes são importantes para entender a dinâmica da atmosfera e a variação do clima em diferentes regiões do planeta. Na figura, a linha horizontal contínua preta representa o nível de confiança de 95%, o que significa que qualquer sinal acima dessa linha é considerado significativo.

A densidade espectral de energia é uma medida que descreve a distribuição de energia em diferentes frequências de um sinal. É uma ferramenta importante para analisar dados temporais e entender os processos físicos que geram esses dados. Em outras palavras, a densidade espectral de energia pode ajudar a identificar os padrões de comportamento em um sinal e descobrir se há alguma tendência ou ciclo que possa ser relevante para o estudo em questão.

Observa-se que a onda de 5 dias, que foi identificada por meio da transformada de Wavelet na Figura 4.3, estando presente nas duas componentes, como evidenciado nas Figuras 4.14 (A) para a componente zonal do vento e (B) para a componente meridional.

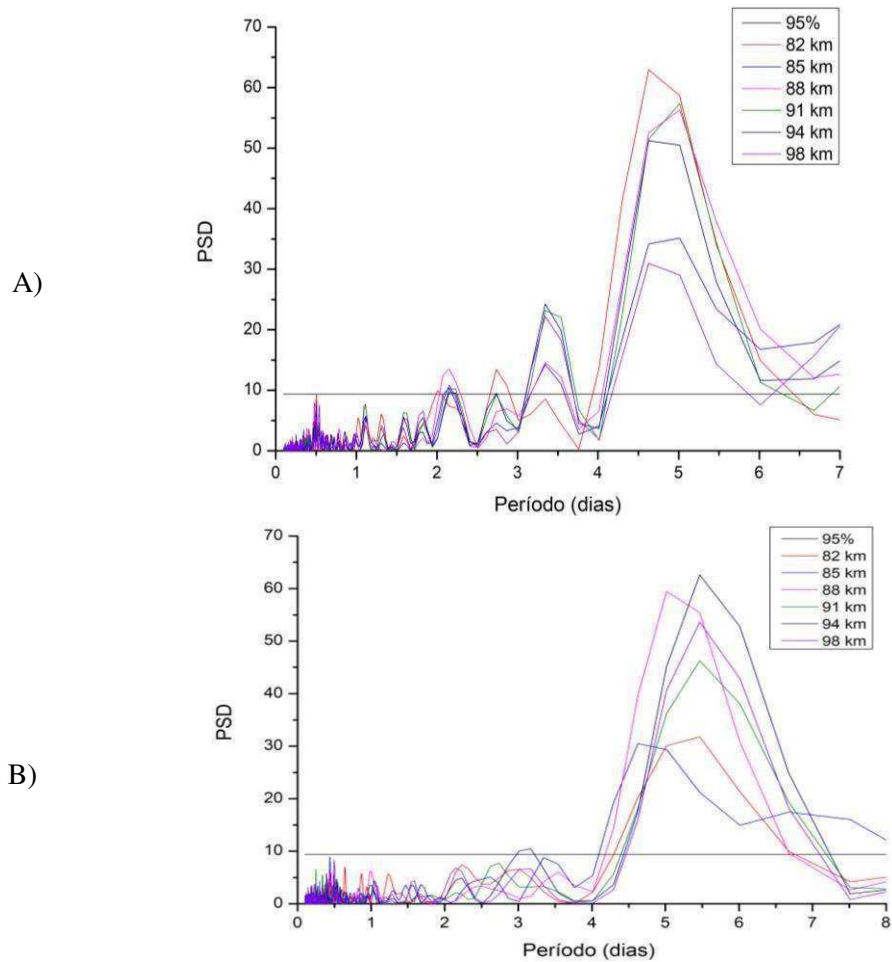


Figura 4.14- Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 5 dias na componente zonal (A) e meridional (B).

A onda de 5 dias apresenta densidade espectral de energia em ambas as componentes, ao contrário da onda de 4 dias. Na Figura 4.14(A), o periodograma mostra picos que ultrapassam a linha de significância em todas as altitudes do período de 5 dias, com um nível de confiança acima de 95%. Embora haja outros períodos em que a densidade de energia ultrapasse o nível de significância, nada se compara aos níveis encontrados na onda de 5 dias.

A Figura 4.14 (B) apresenta o gráfico do Periodograma de Lomb-Scargle na componente meridional, observa-se que o nível de significância para a densidade espectral de energia foi ultrapassado na onda de 5 dias. No entanto, a resposta da onda de 5 dias foi mais atrasada na componente meridional em comparação com a componente zonal.

Estudos anteriores, como o de Talaat et al. (2001, 2002), propuseram que a onda de 5 dias é gerada por interações não lineares entre ondas de grande escala na troposfera e estratosfera, e que se propaga para cima até a Mesosfera e Baixa Termosfera (MLT).

4.3.2 Amplitude, fase e comprimento vertical da Onda de 5 dias

Os dados de vento da região do MLT sobre a estação Comandante Ferraz, localizada na Antártida, também registrou a presença de uma onda de 5 dias. No entanto, na transformada de Wavelet mostrada na figura 4.3, essa onda foi observada apenas no início do ano de 2011 nas componentes zonal e meridional. As amplitudes dessa onda nos dias 37 a 70 são apresentados nos gráficos da Figura 4.15, para ambas as componentes, fornecendo uma análise mais detalhada dessa onda na estação de pesquisa.

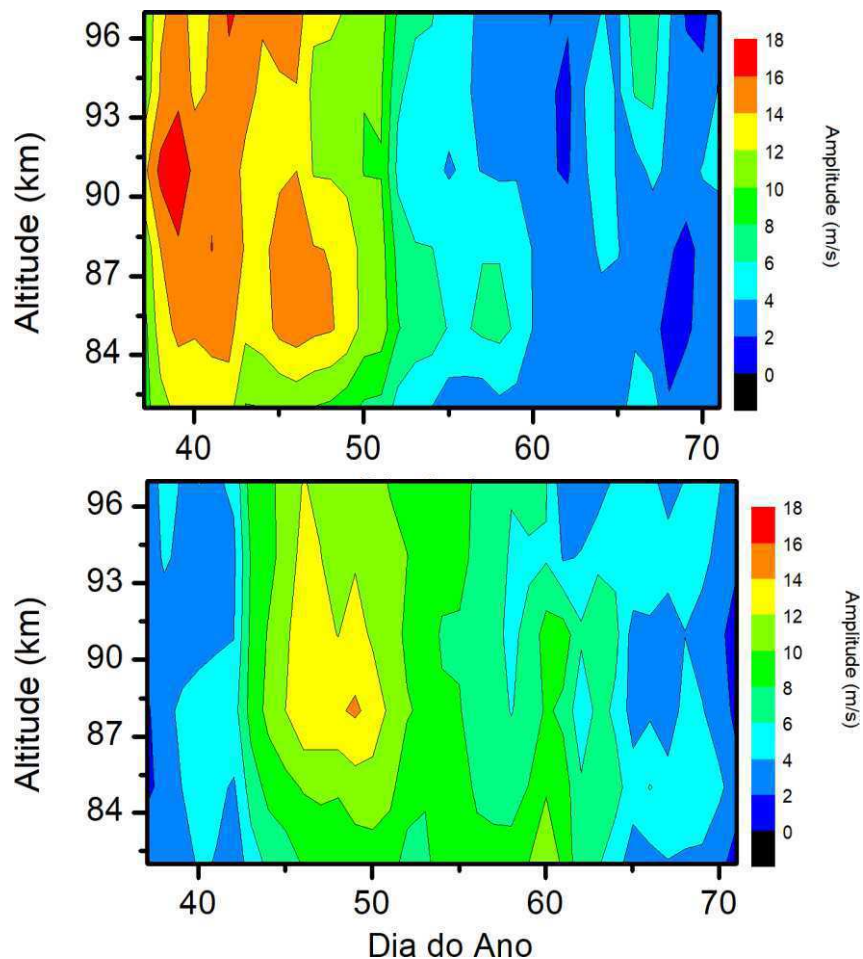


Figura 4.15– Evolução da estrutura vertical da amplitude da onda de 5 dias entre os dias 37 à 70, de junho - 6 de fevereiro a 11 de março de 2011- sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para as componentes zonal (superior) e meridional (inferior) do vento.

4.3.2 Amplitude, fase e comprimento vertical da onda de 5 dias

Para a componente zonal, conforme visto na Figura 4.15 (superior), a onda de 5 dias alcançou sua maior amplitude de 18m/s no dia 39, em altitudes entre 88km e 93km. De forma geral, entre os dias 37 e 47, a onda apresentou valores significativos de 14m/s a 16m/s em todas as altitudes acima de 84 km. Porém, nos demais dias observados, a onda de 5 dias não apresentou amplitudes significativas.

Já para a componente meridional, conforme apresentado na Figura 4.15 (inferior), foi observada uma amplitude máxima de 16m/s a uma altitude de 88 km no dia 49, que ocorreu em fevereiro. A partir deste dia, a onda manteve valores entre 10 m/s e 12 m/s, para todas as altitudes entre os dias 51 à 63, não apresentando valores significativos após este período.

A análise da estrutura vertical permite identificar as regiões onde ocorrem as maiores amplitudes e as maiores variações de fase, o que pode ser útil para entender os mecanismos envolvidos na geração e propagação da onda. Além disso, a estrutura vertical da onda de 5 dias também pode estar relacionada a outros fenômenos atmosféricos, como a presença de ventos fortes e cisalhamento, que podem afetar a propagação e a dissipação da onda.

O estudo da estrutura vertical da amplitude e fase da onda de 5 dias é importante para entender como ela se propaga e afeta a atmosfera na Antártica. No caso específico do estudo citado, foram construídas representações gráficas dessas estruturas em intervalos de dois dias, abrangendo um período de 15 dias (do 37 ao 51 dia), como apresentado nas Figuras 4.16 e 4.17 para as componentes zonal e meridional, respectivamente.

A Figura 4.16(A) ilustra a estrutura vertical da amplitude na componente zonal em oito dias distintos. É possível observar que, nos quatro últimos dias apresentados, a onda de 5 dias apresenta um comportamento simétrico crescente com a altitude, atingindo valores de 10 m/s em 82 km e 15 m/s em 88 km. Em todos os dias apresentados no gráfico, a amplitude é máxima nos dias 39 e 41, chegando a atingir valores maiores que 15 m/s na altitude de 91 km.

Na Figura 4.16 (B) é apresentada a estrutura vertical de fase na componente zonal, demonstrando inclinações descendentes em todos os eventos e altitudes representados. A velocidade de fase em média chegou a atingir 28,6 km/dia e um comprimento vertical médio de 143 km no componente zonal, considerando os intervalos de dias mencionados na figura.

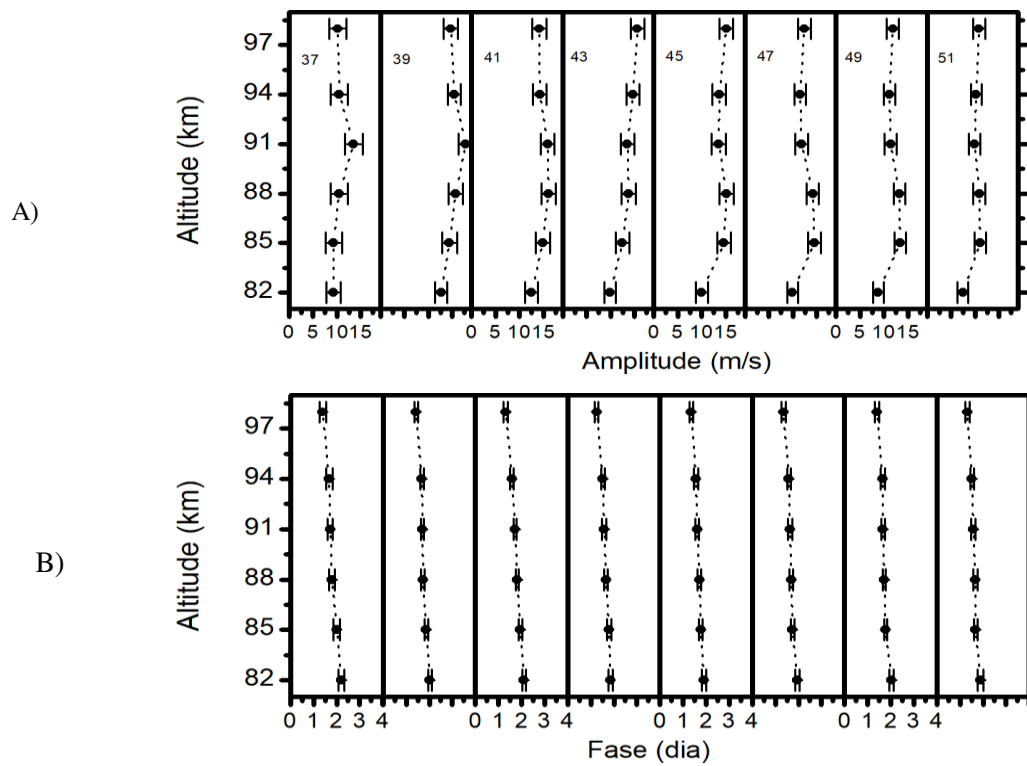


Figura 4.16 – Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) da onda de 5 dias na componente zonal do vento, durante fevereiro de 2011.

A Figura 4.17 (A) e (B) apresentam a estrutura vertical da amplitude e da fase para a componente meridional no mesmo período abordado na figura anterior.

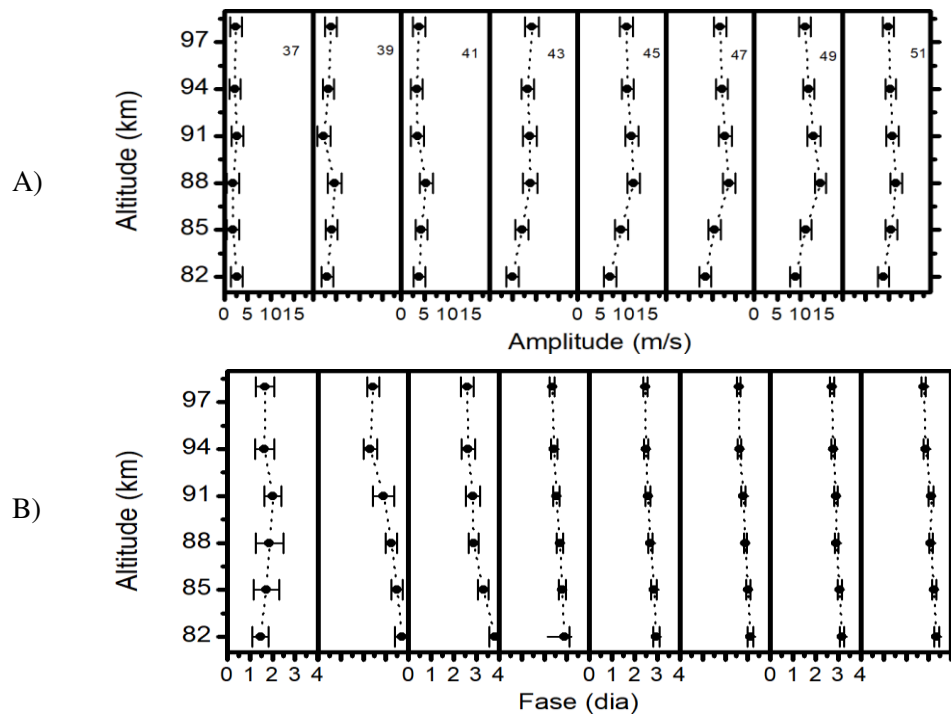


Figura 4.17 – Estrutura vertical da Amplitude (A) e Fase (B) da onda de 5 dias na componente meridional do vento, durante fevereiro de 2011.

Na Figura 4.17(A), é possível observar que a estrutura vertical da amplitude apresenta valores máximos maiores que 15 m/s na altitude de 88 km nos dias 47 e 49. Porém, nos demais dias entre 37 e 43, os valores de amplitude foram inferiores a 10 m/s em todas as altitudes. Já na Figura 4.17(B), é mostrado que a inclinação da estrutura vertical da fase foi ascendente até a altitude de 91 km para o dia 37, que é o dia em que a amplitude da onda de 5 dias não apresentou níveis significativos. Porém, nos demais dias, a inclinação prevaleceu como sendo descendente. Em média o comprimento de onda vertical atingiu 152km assim a velocidade de fase para componente meridional em média foi de 30,4km/dias para onda de 5 dias neste período analisado.

Esses resultados evidenciam a variabilidade do comportamento da onda na componente meridional e a importância de considerar tanto a amplitude quanto a fase para uma compreensão completa da propagação dessa onda na atmosfera antártica.

De acordo com um estudo de Takahashi et al. (2013), a propagação de ondas atmosféricas na alta atmosfera é influenciada por diversos fatores, incluindo a variação da temperatura e densidade atmosférica, o que pode levar a uma variabilidade significativa na amplitude e fase das ondas em diferentes altitudes e dias.

Limura et al. (2015) realizou estudos sobre a onda de 5 dias. Este estudo utilizou dados coletados por radar de meteoros em latitudes conjugadas nos hemisférios Norte e Sul para investigar a onda quase 5 dias (5DW). Durante o período de junho de 2010 a dezembro de 2012, foram realizadas medições simultâneas em altitudes de 84-96 km nos locais de Erange, Suécia (68° N), Juliusruh, Alemanha (55° N), Tierra del Fuego, Argentina (54° S) e Estação Rothera, Antártica (68° S). Os resultados revelaram que a onda de 5 dias apresentou uma variabilidade significativa em curto prazo, sazonal e interanual em todos os locais estudados, com amplitudes máximas de aproximadamente 20 m/s.

Outros estudos como Hall et al. (1998) e Murphy et al. (2007), também realizaram estudos sobre a onda de quase 5 dias. Hall et al. (1998) mostraram a existência da 5DW no componente zonal para os meses de fevereiro e março. Já Murphy et al. (2007), examinou as variações sazonais da onda de 4 a 8 dias utilizando dados de vento do radar MF na Estação Davis, localizada na Antártica, durante o período de 1997 a 2005 e descobriram que a amplitude da onda aumentava nos meses de julho a agosto. Esses resultados sugerem um padrão sazonal consistente de intensificação da onda durante essa época do ano na região estudada.

O estudo de Hall et al. (1998) foi realizado durante o inverno de 1996/1997 na região norte da Noruega. Utilizou-se o radar MF da Universidade de Saskatchewan. Relatam que a onda de 5 dias é visível em uma região, em torno de 87 km, durante o inverno desaparecendo durante o mês de março. No entanto, no meio da mesosfera, ela reaparece e se torna aparente novamente no mês de maio, sugerindo uma variação sazonal na presença e comportamento da onda de 5 dias para essa região.

Na região da Antártica, durante o ano de 2011, observações das características da onda de 5 dias revelaram que ela ocorreu exclusivamente durante o verão austral. A análise das componentes da onda demonstrou uma predominância de valores maiores na componente zonal do vento. A intensidade máxima da onda de 5 dias na componente zonal atingiu 18 m/s, enquanto a velocidade de fase média foi de 28,6 km/dia. Além disso, o comprimento vertical médio da onda na componente zonal foi estimado em 143 km.

4.4 Onda de 10 dias

4.4.1 Periodograma de Lomb-Scargle

Nesta seção, será estudado o Periodograma de Lomb-Scargle. O enfoque será na componente zonal, uma vez que na análise wavelet da componente meridional, essa onda não foi detectada. Por outro lado, na componente zonal, uma onda com período de 10 dias foi identificada, indicando que a onda de 10 dias foi observada somente nesta componente.

A onda de 10 dias foi bem estudada por Barbosa (2021), investigando as ondas planetárias de quase 10 dias na região da alta mesosfera e baixa termosfera. Utilizando medidas de vento de diferentes localidades, observou-se a presença dessas ondas durante os invernos austrais e boreais, com amplitudes mais pronunciadas/significativas na componente zonal. No gráfico da Figura 4.18 é apresentado o Periodograma de Lomb-Scargle da onda de 10 dias para meados de outubro.

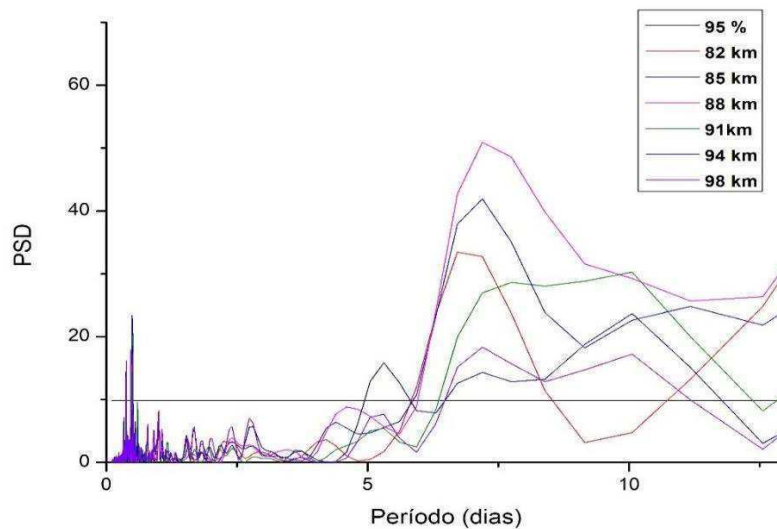


Figura 4.18- Periodograma de Lomb-Scargle para a onda de 10 dias na componente zonal – mês de outubro.

Na Figura 4.18, o Periodograma revela picos que excedem a linha de significância em altitudes acima de 88 km para o período de 10 dias, com um nível de confiança superior a 95%. É possível observar densidades espectrais significativas, principalmente nas altitudes de 91 km, 94 km e 98 km para esse período específico. Essas observações indicam que há uma presença notável de atividades de ondas planetárias com um período próximo a 10 dias nessas altitudes da atmosfera.

A onda de 10 dias foi analisada em outras regiões e os estudos de YU et al. (2019) investigou a onda de quase 10 dias em medidas de ventos da região MLT durante o aquecimento final da estratosfera polar ocorrido na primavera boreal de 2015, em diferentes latitudes do hemisfério norte. Neste estudo os autores relatam que houve uma ocorrência de ondas planetárias com períodos próximos a 10 em torno do SFW-Stratospheric Final Warming (Aquecimento Final Estratosférico). Na troposfera, essa onda apresentou amplitudes próximas a 10 m/s no vento. Na estratosfera, atividades de ondas fortes surgiram antes do SFW, enquanto no MLT, as ondas amplificaram-se após o SFW.

Comparando com os dados da Estação Comandante Ferraz – Hemisfério sul - com os estudos de YU et al., (2019), pode-se perceber de início, que enquanto na região do hemisfério sul no ano de 2011, a onda de 10 dias esteve presente na primavera austral em regiões do hemisfério norte (2015) esteve na primavera boreal. Essas observações sugerem que a presença da onda de 10 dias pode ser comum durante os períodos de transição sazonal, tanto na primavera boreal quanto na primavera austral.

Assim é possível estabelecer uma conexão entre a ocorrência da onda de 10 dias e os eventos de aquecimento estratosférico. Essa conexão sugere que a onda de 10 dias pode ser influenciada por fenômenos atmosféricos globais que ocorrem durante os períodos de transição sazonal, independentemente do hemisfério.

4.4.2 Amplitude, fase e comprimento vertical para onda de 10 dias

A partir da análise do Periodograma, que revelou a periodicidade da onda de 10 dias, fez-se necessário realizar a caracterização completa dessa onda, incluindo amplitude, fase e comprimento vertical. Esses parâmetros são essenciais para caracterizar e quantificar as propriedades das ondas que se propagam na atmosfera, desde a superfície terrestre até as camadas superiores. Nesta seção, examinaremos em detalhes a amplitude das ondas, sua variação vertical ao longo da atmosfera, a fase associada a essas oscilações e o comprimento vertical característico dessas perturbações para um período de 10 dias.

O gráfico da Figura 4.19 mostra a evolução da estrutura vertical da onda de 10 dias entre os meses de maio e novembro de 2011, para componente zonal, sendo que a onda não mostrou-se presente para a componente meridional.

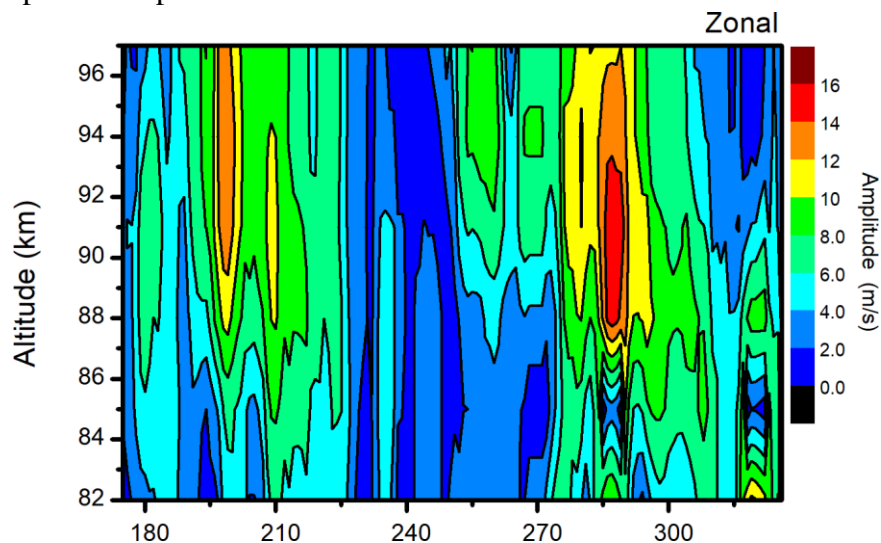


Figura 4.19 – Evolução da estrutura vertical da amplitude da onda de 10 dias entre os dias 175 à 325, de 28 de maio à 22 de novembro- sobre a estação Comandante Ferraz, Antártida, para a componente zonal do vento.

Na Figura 4.19, é possível observar a evolução vertical da amplitude ao longo dos meses de maio até setembro. A partir dessa análise, torna-se evidente a presença da onda de dez dias no início de julho, com amplitudes atingindo 12 m/s acima de 99 km. Conforme avançamos em

4.4.1 Amplitude, fase e Comprimento Vertical

direção ao início de outubro, essa onda alcança seu pico máximo de 14 m/s abaixo de 93 km e acima de 88 km. Vale ressaltar que a onda começa a se manifestar com amplitudes de 10 m/s já no final de setembro, intensificando-se de maneira significativa a partir do dia 10 de outubro e mantendo-se relevante até o dia 20 de outubro.

Os resultados apresentados por Barbosa (2021) indicam uma clara variabilidade interanual na estrutura vertical das amplitudes da onda de quase 10 dias em ambos os hemisférios. No hemisfério sul, durante os equinócios de outono e primavera, ocorrem amplificações da onda em pelo menos uma dessas estações. Isso sugere que as condições atmosféricas nesses períodos favorecem o desenvolvimento e a intensificação da onda de 10 dias. Durante o inverno austral, a presença da onda de 10 dias é observada em quase todos os anos, com amplitudes significativas.

A análise da evolução vertical da amplitude da onda de 10 dias - conforme apresentada na Figura 4.19 - está em consonância com os resultados de Barbosa (2021), que indicam uma clara variabilidade interanual nas amplitudes da onda de quase 10 dias em ambos os hemisférios. Observa-se que a onda de 10 dias se manifesta com amplitudes significativas durante os equinócios de outono e primavera no hemisfério sul, períodos em que as condições atmosféricas favorecem seu desenvolvimento e intensificação. Além disso, a presença da onda de 10 dias é observada de forma consistente durante o inverno austral, com amplitudes consideráveis em quase todos os anos analisados. A Figura 4.20 apresenta a estrutura vertical da fase dos dois eventos observados e discutidos na Figura 4.19.

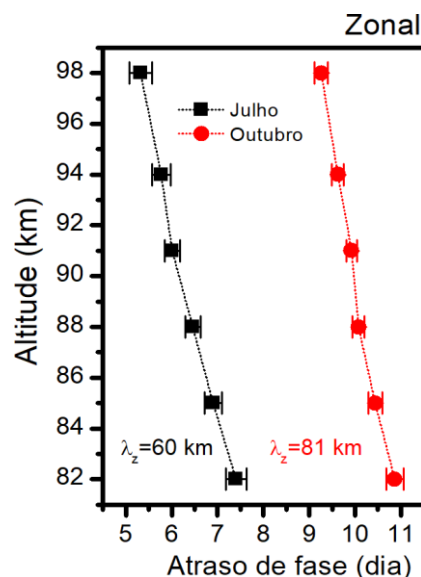


Figura 4.20 - Estrutura vertical do atraso Fase da onda de 10 dias na componente zonal do vento, em dois eventos – Julho e Outubro.

4.4.2 Amplitude, fase e comprimento de onda vertical

Na Figura 4.19, a onda de 10 dias exibiu valores de amplitudes elevados em duas épocas do ano, sendo mais significativa em outubro do que em julho. Portanto, a Figura 4.20 nos permite observar de forma mais clara o comportamento da fase dessa onda e seu respectivo comprimento de onda vertical.

Nos dois eventos apresentados no gráfico da Figura 4.20, é observada uma inclinação descendente na fase da onda de 10 dias, o que indica que essa onda se propaga ascendentemente. Além disso, o gráfico também mostra o comprimento de onda vertical médio de cada evento. Em julho, o comprimento de onda vertical médio foi de aproximadamente 60 km, enquanto em outubro a onda apresentou um comprimento de onda vertical médio de cerca de 81 km.

No mês de julho, a velocidade de fase média da onda de 10 dias é de aproximadamente 6 km/dia, enquanto que em outubro essa velocidade é de cerca de 8,4 km/dia. É importante ressaltar que, em outubro, essa onda apresenta uma maior amplitude, um comprimento vertical mais pronunciado e uma velocidade de fase mais elevada quando comparada às outras épocas do ano.

Em seu estudo, Barbosa (2021) analisou a fase da onda de 10 dias em três regiões e concluiu que a inclinação da fase apresentou uma tendência descendente em todos os eventos observados. Esses resultados corroboram com o resultado da observado na região da Antártica para o ano de 2011. Ou seja, quando a fase de da onda apresentou inclinação descendente, isso indica que a onda estava se propagando ascendentemente na atmosfera.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a onda de 10 dias na região do hemisfério sul apresenta características sazonais. Durante o inverno austral, a presença da onda de 10 dias foi observada. Além disso, no mês de julho, a velocidade de fase média da onda de 10 dias é de aproximadamente 6 km/dia, enquanto em outubro essa velocidade aumenta para cerca de 8,4 km/dia. Em outubro, a onda de 10 dias também exibe uma maior amplitude, um comprimento vertical mais pronunciado e uma velocidade de fase mais elevada em comparação com outras épocas do ano.

5 Conclusões

Neste estudo, foram exploradas as características das ondas planetárias em altas latitudes, com base em dados de ventos coletados pelo radar de meteoros Drake Antarctic Agile Meteor Radar (DrAAMER). Especificamente, foram investigadas as oscilações das ondas com períodos de 2, 4, 5 e 10 dias, em altitudes entre 82 km e 98 km. Com o objetivo de caracterizar essas ondas foram aplicadas técnicas de análise como a transformada de wavelet, o periodograma de Lomb-Scargle e a análise harmônica.

Através da transformada de wavelet, foi possível examinar a distribuição de frequência dessas oscilações ao longo do tempo e identificar possíveis variações na frequência das ondas. O periodograma de Lomb-Scargle foi empregado para determinar as frequências dominantes e avaliar sua importância. A análise harmônica foi utilizada para obter informações mais detalhadas sobre as ondas planetárias estudadas. Isso incluiu a determinação das amplitudes das oscilações, o comprimento de onda vertical correspondente e a velocidade de fase associada a essas ondas.

Os resultados obtidos nesta pesquisa forneceram uma confirmação sólida da presença e características das ondas planetárias na região da Antártica sobre a Estação Antártica Comandante Ferraz ($62,1^{\circ}\text{S}$, $58,4^{\circ}\text{W}$), localizada na Ilha Rei George, com os seguintes resultados:

- Onda de 2 dias: Na análise dos dados, foi observado uma assinatura da onda de 2 dias tanto na componente zonal quanto na componente meridional do espectro Wavelet, especificamente em janeiro de 2012. Utilizando o periodograma de Lomb-Scargle, confirmou-se que a oscilação correspondia realmente a uma onda de 2 dias. Além disso, por meio da análise harmônica, foram obtidos valores correspondentes a amplitudes de 32 m/s em altitudes entre 87 km e 91 km na componente zonal, e 36 m/s na componente meridional, com inclinação de fase descendente. O comprimento de onda vertical médio foi estimado entre aproximadamente 168 km e 206 km, e a velocidade de fase média variou entre 84 km/dia e 117 km/dia. Esses resultados comprovam, de acordo com a literatura, que essa onda é típica do verão austral.
- Onda de 4 dias: A análise da Wavelet revelou a presença da onda de 4 dias exclusivamente no componente zonal durante os meses de junho e novembro de 2011. Essa observação foi

posteriormente confirmada pelo periodograma de Lomb-Scargle, que identificou a presença dessa oscilação em altitudes entre 85 km e 91 km em ambos os meses. A amplitude da onda variou entre 10 m/s e 16 m/s, com um comprimento de onda vertical médio de 28,4 km e uma velocidade de fase média de 7,1 km/dia em junho. Já em novembro, a onda exibiu uma velocidade de fase média de 19,3 km/dia e um comprimento de onda vertical de 71,4 km. Esses resultados fornecem evidências significativas de que a onda de 4 dias desempenha um papel relevante durante o solstício de inverno.

- Onda de 5 dias: Na análise da Wavelet, observou-se a assinatura da onda de 5 dias em ambas as componentes, porém com maior expressividade no componente zonal em comparação ao componente meridional. A amplitude atingiu valores de 18 m/s (zonal) e 16 m/s (meridional), apresentando inclinação de fase descendente. No componente zonal, o comprimento de onda vertical médio foi de 143 km, com velocidade de fase média de 28,6 km/dia. Já no componente meridional, o comprimento de onda vertical foi de 152 km, com velocidade de fase média de 30,4 km/dia. Vale ressaltar que essa onda ocorreu exclusivamente durante o verão austral.
- Onda de 10 dias: A onda de 10 dias foi observada exclusivamente no componente zonal e sua presença foi confirmada pelo períodograma, principalmente em altitudes entre 91 km e 98 km nos meses de julho e outubro. As amplitudes registraram valores entre 10 m/s e 14 m/s, sendo mais elevadas em outubro. Em julho, a onda apresentou um comprimento vertical médio de 60 km e uma velocidade de fase de 6 km/dia. Já em outubro, o comprimento vertical médio da onda foi de 81 km, com uma velocidade de fase de 8,1 km/dia. Essa onda de 10 dias exibe características sazonais durante o inverno austral.

Essas conclusões fornecem uma base sólida para o entendimento das características das ondas planetárias na região estudada. Os métodos de análise utilizados se mostraram eficazes na identificação e confirmação das oscilações, bem como na obtenção de parâmetros importantes para descrever suas propriedades.

Portanto, os resultados desta pesquisa têm relevância para os estudos atmosféricos na Antártica e podem contribuir para a compreensão dos fenômenos climáticos e das interações entre a atmosfera e o meio ambiente polar. Futuros trabalhos podem se beneficiar dessas informações para investigar ainda mais o papel das ondas planetárias em eventos atmosféricos específicos e em processos meteorológicos de maior escala.

Referências

- ALLEN, D.; STANFORD, J.; ELSON, L.; FISHBEIN, E.; FROIDEVAUX, L.; WATERS, J. **The 4-day wave as observed from the up-per atmosphere research satellite microwave limb sounder**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(3), 420–434, 1997.
- ALEXANDER, S.P.; SHEPHERD, M. G. **Planetary wave activity in the polar lower stratosphere**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010.
- ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. **Middle atmosphere dynamics**. Orlando: Academic press, inc, 1987. v. 489p.
- ANDRIOLI, V. F. **VARIANCIA E FLUXO DE MOMENTO DEVIDOS AS ONDAS DE GRAVIDADE NA REGIAO MLT**. Tese (Geofísica Espacial/Ciência Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- ARAÚJO, L. R. **Sazonalidade de ondas planetárias nos ventos meteóricos observados em são João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista –SP**. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.
- BARBOSA, E. E. S. **Observações da onda de 10 dias nos ventos da mesosfera tropical austral e em média latitude boreal**. Dissertação (mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande/CG, 2021.
- BAUMGAERTNER, A. J. G.; MCDONALD, A. J.; HIBBINS, R. E.; FRITTS, D. C.; MURPHY, D. J.; VINCENT, R. A. **Short-period planetary waves in the Antarctic middle atmosphere**, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, 70, 1336–1350, doi:10.1016/j.jastp.2008.04.007, 2008.
- BEER, T. **Atmospheric Waves**. London: Adam Hilder, 1975. v. 300p.
- CHSHYOLKOVA, T., MANSON, A. H. and MEEK, C. E. **Climatology of the quasi two-day wave over Saskatoon (52 degrees N, 107 degrees W): 14 Years of MF radar observations**. *Advances in Space Research*. v.35, 11, p.2011- 2016, 2005.
- CHSHYOLKOVA, T.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; AVERY, S. K.; THORSEN, D.; MACDOUGALL, J. W.; HOCKING, W.; MURAYAMA, Y.; IGARASHI, K. **Planetary**

wave coupling processes in the middle atmosphere (30-90 km): A study involving MetO and MFR data. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics. v.68, 3-5, p.353-368, 2006.

DIAS, A. A.; NETO, A.V.; MILTÃO, M.S.R. **A Atmosfera Terrestre: Composição e Estrutura.** Caderno De Física da UEFS, P. 21-40, 2007.

PHILLIPS, A. **Simultaneous observations of the quasi 2-day wave at Mawson, Antarctica, and Adelaide, South Australia.** Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. Volume 51, Issue 2, 1989. Pag: 119-124. ISSN 0021-9169 <[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(89\)90111-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90111-6)>

FILHO, G. C. M. **Análise de sequências de polos geomagnéticos virtuais do Cretáceo através de um periodograma Bayesiano.** Tese (Ciências) - Universidade de São Paulo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Departamento de Geofísica, 2010.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** - 6. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, F. E. **Efeito das Ondas Planetárias na Aeroluminiscencia.** Instituto Nacional de Pesquisa Espacial – INPE. São José dos campos, 2013. Disponível em <http://www.inpe.br/posgraduacao/ges/arquivos/teses/tese_fabio_do_egito_2013.pdf> Acesso em 20 de Julho de 2021.

FRASER G. J.; VINCENT, R. A.; PHILLIPS, A. **The 4-day wave in the Antarctic mesosphere.** J. Geophys. Res., 100, 18 899–18 908. 1995.

Hall, C. M., Manson, A. H., and Meek, C. E.: **Spectral characteristics spring arctic mesosphere dynamics.** Ann. Geophys., 16, 1607–1618, doi:10.1007/s00585-998-1607-3, 1998.

Hartmann, D.L. **A ESTRUTURA DA ESTRATOSFERA NO SUL HEMISFÉRIO DURANTE O FINAL DO INVERNO DE 1973, CONFORME OBSERVADO PELO SATÉLITE J.** Atmos. Sci., 33, 1141-1154, 1976.

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology,** San Diego, Calif., Academic Press, 1992. 535p.

HOLTON, J. R. **An Introduction to dynamic meteorology.** 4e. San Diego: Elsevier Academic Press. v. 529p, 2004.

KODERA, K. **Acoplamento vento solar-magnetosfera-ionosfera-atmosfera e seu**

- impacto no clima da Terra.** Space Science Reviews, 113(1-2), 237-258, 2004.
- LAWRENCE, B. N.; FRASER, G. J.; VINCENT, ROBERT ALAN; PHILLIPS, A. **The 4-day wave in the Antarctic mesosphere,** Journal of Geophysical Research, 1995.
- LIMA, L. M., BATISTA, P. P., CLEMESHA, B. R., AND TAKAHASHI, H. **The 6.5-day oscillations observed in meteor winds over Cachoeira Paulista (22.7° S).** Adv. Space Res., 36, 2212–2217, doi:10.1016/j.asr.2005.06.005, 2005.
- LIMURA, H.; FRITTS, D. C.; JANCHES, D.; SINGER, W.; MITCHELL, N. J. **Interhemispheric structure and variability of the 5-day planetary wave from meteor radar wind measurements.** Ann. Geophys., 33, 1349 – 1359, 2015.
- LUBKEN, F. J. **Sobre a dinâmica da mesosfera polar no verão.** Jornal de Física Atmosférica e Solar-terrestre. 61(8-9), p. 657-678, 1999.
- MACHADO, M. C.; BRITO, T.; **Coleção explorando o ensino v.9.** Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica. Brasília, 2006.
- MEYER, C. K.; FORBES, J. M. **Uma onda planetária de propagação para o oeste de 6,5 dias: Origem e características,** J. Geophys. Res., 102, 26173–26178, doi:10.1029/97JD01464, 1997.
- MURPHY, D. J.; FRENCH, W. J. R.; AND VINCENT, R. A. **Long-period planetary waves in the mesosphere and lower thermosphere above Davis, Antarctica.** J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 69, 2118– 2138, doi:10.1016/j.jastp.2007.06.008, 2007.
- OLIVEIRA, J. B. **Sistemas Inteligentes E Wavelets Para Previsões De Vento E Geração Eólica.** Dissertação (mestrado em Engenharia elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco/Recife, 2008.
- PANCHEVA, D.; MUKHTAROV, P.; MITCHELL, N. J.; ANDONOV, B.; MERZLYAKOV, E.; SINGER, W.; MURAYAMA, Y.; KAWAMURA, S.; XIONG, J.; WAN, W.; HOCKING, W.; FRITTS, D. C.; RIGGIN, D. C. M.; MANSON, A. **Acoplamento de ondas latitudinais da estratosfera e da mesosfera durante o grande aquecimento estratosférico em 2003/ 2004.** Ann. Geophys., 26, 467-483, 2008.
- PANCHEVA, D. V., MUKHTAROV, P. J., MITCHELL, N. J., FRITTS, D. C., RIGGIN, D. M., TAKAHASHI, H., BATISTA, P. P., CLEMESHA, B. R., GURUBARAN, S. and RAMKUMAR, G. **Planetary wave coupling (5-6-day waves) in the low-latitude**

atmosphere-ionosphere system. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.70, 1, p.101-122, 2008.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** 2.ed. Novo Hamburgo: Freevale, 2013.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric Physics.** Academic Express. New York. USA. 1995.

SASSI, F. ; GARCIA, R. R. **The Role of Equatorial Waves Forced by Convection in the Tropical Semiannual Oscillation.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 54, n. 15, p. 1925-1942, 1997.

SIMÕES. J.C.; ARIGONY-NETO, J.; BREMER, U.F. **O uso de mapas antárticos em publicações.** Pesquisa Antártica Brasileira, 4: 191-197, 2004.

THAYAPARAN, T.; HOCKING, W. K.; MACDOUGALL, J. **Amplitude, phase, and period variations of the quasi 2-day wave in the mesosphere and lower thermosphere over London, Canada (43 degrees N, 81 degrees W), during 1993 and 1994.** Journal of Geophysical Research-Atmospheres. v.102, D8, p.9461-9478, 1997.

TALAAT, E. R.; YEE, J. H.; ZHU, X.. **Observations of the 6.5-day wave in the mesosphere and lower thermosphere,** J. Geophys. Res.-Atmos, 106, 20715–20723, doi:10.1029/2001JD900227, 2001.

TALAAT, E. R.; YEE, J. H.; ZHU, X . **The 6.5-day wave in the tropical stratosphere and mesosphere,** J. Geophys. Res.-Atmos., 107, 1-1–1-5, doi:10.1029/2001JD000822, 2002.

TAKAHASHI, H., SHIOKAWA, K., EGITO, F., MURAYAMA, Y., KAWAMURA, S.; WRASSE, C. M. **Planetary wave induced wind and airglow oscillations in the middle latitude MLT region.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.In press, 2013.

WATANABE, S.; TOMIKAWA, Y.; SATO, K.; KAWATANI, Y.; MIYAZAKI, K.; TAKAHASHI, M. **Simulation of the eastward 4-day wave in the Antarctic winter mesosphere using a gravity wave resolving general circulation model.** Journal Of Geophysical Research, Vol. 114, 2009.

VOLLAND, H. **Atmospheric tidal and planetary waves.** Dordrecht: Kluwer Academic

Publ.,1988. v. 348p.

YU, F. R. et al. **Quasi 10- and 16-Day Wave Activities Observed Through Meteor Radar and MST Radar During Stratospheric Final Warming in 2015 Spring.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 124, n. 12, p. 6040–6056, 2019. ISSN 21698996

Wu, D. L.; Hays, P. B.; W. R. Skinner, **Observations of the 5-day wave in the mesosphere and lower thermosphere,** Geophys. Res. Lett., 21, 2733-2736, 1994.